



## **ESTUDO PARAMÉTRICO DE COMBUSTÍVEL SEED-BLANKET (Th-U)O<sub>2</sub> com (U-Zr)**

**José R. N. Carneiro<sup>1</sup>, Maria V. A. de Oliveira<sup>1</sup>, Marcelo V. da Silva<sup>1</sup>, Diego M. E. Gonçalves<sup>1</sup>, Giovanni L. de Stefani<sup>1</sup> e Daniel A. P. Palma<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.  
[jrcarneiro@nuclear.ufrj.br](mailto:jrcarneiro@nuclear.ufrj.br), [maria.oliveira@coppe.ufrj.br](mailto:maria.oliveira@coppe.ufrj.br), [giovanni.laranjo@coppe.ufrj.br](mailto:giovanni.laranjo@coppe.ufrj.br)

**Palavras-Chave:** Thorium; Seed-blanket; PWR; Monte Carlo; Serpent code; SMR

### **RESUMO**

O reprocessamento do combustível usado em usinas nucleares é uma estratégia crucial para mitigar problemas de armazenamento e proliferação de armas nucleares, especialmente ao utilizar plutônio reciclado de reatores de água pressurizada (PWR) em reatores pequenos modulares (SMRs). Esses reatores têm se destacado por suas vantagens, em relação as taxas de queima de combustível superiores quando comparado aos reatores convencionais, além de apresentarem maior segurança e economia em larga escala. A utilização de um combustível que combina tório e urânio pode reduzir a produção de resíduos de longa vida e mitigar proliferação nuclear. Entretanto, a escassez de dados experimentais sobre materiais para reatores em temperaturas elevadas (2000-3500 K) representa um desafio significativo, pois a alta volatilidade do urânio pode comprometer a estabilidade do combustível e a eficiência do reator. Este estudo visa analisar parametricamente um reator SMR utilizando combustível reprocessado de um PWR, dividindo a pesquisa em duas partes: a primeira investiga a proporção ideal entre plutônio e urânio para a supercriticalidade, enquanto a segunda compara o desempenho neutrônico dessa combinação com um blanket de tório-urânio. A metodologia envolve simulações com o código SERPENT, considerando configurações de combustível tipo placa e pastilha, onde foram avaliadas variações na espessura das placas e revestimentos. Os resultados indicam que a combinação de combustíveis é adequada para reatores térmicos, especialmente no ciclo de tório-urânio, com a liga de zircônio contribuindo para a manutenção da supercriticalidade, ao contrário do aço inoxidável, que tende a capturar nêutrons. Embora a configuração proposta gere um volume menor de combustível usado, ela apresenta desafios para o reprocessamento, oferecendo vantagens em termos de não proliferação. Foi possível concluir que os combustíveis baseados no ciclo de tório em SMRs demonstram alta taxa de conversão e notório potencial para serem reatores breeders, destacando a necessidade de investigações futuras que incluam análises termo-hidráulicas para garantir a viabilidade e segurança do design proposto.

### **1. INTRODUÇÃO**

O modelo de combustível manta-semente no SMR foi escolhido nesse trabalho principalmente por apresentar uma interessante possibilidade de configuração dos elementos combustíveis de forma que aproveitem ao mesmo tempo o melhor do combustível do tipo pastilha e do tipo placa, proporcionando uma melhor utilização dos recursos já que na faixa dos nêutrons térmicos apresenta uma maior probabilidade de taxa de fissão no meio do que em reatores convencionais, além de produzir menos nuclídeos tóxicos de Plutônio. O conceito do modelo é baseado no controle da geometria do núcleo da troca do arranjo dos elementos combustíveis visando que o combustível mais esgotado seja acionado pelo combustível mais novo. Comparando com reatores tradicionais, o modelo placa-pastilha apresenta uma dificuldade maior para o reprocessamento do combustível usado contribuindo também para a redução na proliferação de armas nucleares.

O reprocessamento do combustível usado de uma usina nuclear ajuda a resolver parte do problema do armazenamento seguro, mas não é suficiente como resistência à proliferação de



armas nucleares, utilizar parte do combustível usado de um reator de água pressurizada padrão para o enriquecimento de um reator pequeno modular (SMR) como, por exemplo, o plutônio reciclado, que traz também vantagens significativas como maior tempo de campanha e maiores taxas de nível de queima de combustível do que os reatores convencionais consequentemente a criticidade e a potência [1-2].

Principalmente pelas vantagens de segurança intrínsecas e pela economia de escala, os SMR têm ganhado cada vez mais espaço como candidatos para a próxima geração de reatores a serem comissionados que poderão utilizar combustível formado por um blanket de tório com urânio, que além de economizar recursos naturais de urânio, produzir menos resíduos de vida longa produzidos pelo tório, o combustível de ThO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub> leva a moderada redução no potencial de proliferação nuclear apesar dos custos do reprocessamento [2-3].

Existe poucos trabalhos relevantes com dados experimentais sobre materiais para projeto de reatores na faixa de temperatura entre 2000-3500K, tornando um grande desafio prever e avaliar com precisão informações sobre estabilidade, e segurança dos materiais combustíveis nucleares. A falta de dados dificulta também a tomada de decisões em projetos, e que por sua vez impede a otimização e diminui a confiabilidade dos sistemas nucleares [4].

Para aplicações em altas temperaturas o dióxido e o carboneto de urânio parecem ser bons candidatos para combustíveis nucleares para temperaturas entre 2000-3500 K, a evaporação do combustível é o fator mais importante para o design do combustível nuclear e a temperatura de evaporação é o segundo mais importante. São necessários formas especiais para otimizar a transferência de calor e garantir uma troca de calor eficaz, no entanto, a natureza frágil desses matérias combustíveis a altas temperaturas são um desafio na montagem das configurações desejadas que não comprometa a integridade do combustível [4].

Operar com altas taxas de evaporação de combustível a base de urânio acima de 2.000K é o fator limitante mais importante para combustíveis nucleares em altas temperaturas. A alta volatilidade do urânio em alta temperatura leva a perda significativa do material por evaporação o que não somente resulta na perda do material físsil, mas também afeta a estabilidade do combustível, alterando propriedades como condutividade térmica, resistência mecânica e estabilidade química que impactam o desempenho do reator [4].

Entender os limites térmicos e mecânicos do material utilizado para o elemento combustível (EC), para o revestimento do EC e de todos os outros materiais ligados diretamente ao núcleo do reator são importantes para garantir a operação segura do reator, evitar superaquecimentos e danos estruturais. Diferente do combustível nuclear de dióxido de urânio (UO<sub>2</sub>), o combustível de carboneto de urânio (UC) e de urânio metálico (U-Zr), apresentam os valores de condutividade térmicos mais elevados e proporcionam a maior margem de segurança para a temperatura do combustível [5-6].

Nesse contexto, o estudo paramétrico detalhado da composição do combustível e do material estrutural do reator nuclear é fundamental para otimizar o desempenho dos reatores. O objetivo desse trabalho é fazer o estudo paramétrico de um reator do tipo SMR utilizando combustível usado de um reator PWR convencional, que normalmente seria descartado, e que através do reprocessamento pode ser reutilizado, evitando gastos excessivos com o descarte seguro e também evitando a proliferação de armas nucleares.

Esse estudo será dividido em duas partes principais, sendo a primeira parte focada no estudo detalhado do material das placas do elemento combustível, buscando encontrar a proporção ideal entre Plutônio e Urânio que mantém um Keff supercrítico para uma campanha de 2 anos, respeitando os limites térmicos dos materiais que compõem a liga do elemento combustível. Esse estudo será conduzido utilizando o SERPENT, um código de transporte de partículas tridimensional baseado no método de Monte Carlo de energia contínua.

A segunda parte do estudo consiste em utilizar o elemento combustível com maior valor de conversão e maior Keff da primeira fase desse trabalho, ou seja, a melhor proporção da combinação da mistura entre Plutônio e Urânio (Pu-U)MOX encontrada anteriormente será



comparada com um blanket de Tório e Urânio (Th-U)MOX em termos de desempenho neutrônico.

Para esse trabalho será considerado uma geometria singular, com o núcleo do reator anisotrópico em configuração tipo placa e pino ao mesmo tempo, a versão final será considerado com barras de controle e então será apresentado os resultados dos parâmetros cinéticos como o  $\beta_{eff}$  e o coeficiente de radioatividade de temperatura que serão comparados com o desempenho de queima do elemento combustível do NuScale.

## 2. METODOLOGIA

Nesta seção, apresentamos a análise dos dados gerados pelo simulador estatístico de transporte de nêutrons Serpent, aplicado a um reator térmico do tipo SMR (Small Modular Reactor) com uma configuração inovadora. A malha utilizada possui dimensões de 17x17 e é moderada a água. Avaliamos duas configurações distintas de combustível: tipo placa e tipo pastilha.

### 2.1 Caracterização dos Combustíveis

**Combustível tipo placa:** Este tipo, é comum em reatores de pesquisa em que consiste em várias placas finas de liga de zircônio e urânio, moldadas em forma de paralelepípedos e revestidas com um óxido de alumínio com Urânio.

**Combustível tipo pastilha:** Frequentemente utilizado em reatores de potência, esse combustível é feito de uma liga cerâmica composta por 10% de isótopos de urânio e 90% de tório, preenchido com gás hélio a 25 bar. As variáveis consideradas foram o raio da pastilha, a distância do gap e a espessura do revestimento.

### 2.2 Simulações

Para determinar a taxa de conversão e o fator de multiplicação ótimos, foram realizadas uma série de simulações de forma que inicialmente fixamos os raios concêntricos da pastilha ( $R_1$ ), gap ( $R_2$ ) e clad ( $R_3$ ) (Fig. 1) e variamos a espessura da placa de combustível ( $e_1$ ) e do revestimento ( $e_2$ ) conforme Fig. 1. A partir dos resultados obtidos, analisamos a razão de conversão (CR) e fator de multiplicação infinito ( $k_{\infty}$ ). A seguir invertemos, mantivemos a espessura das placas fixas ( $e_1$  e  $e_2$ ) e variamos o raio das varetas conforme. Variando  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ . Por fim, fixamos a espessura das placas e os raios das varetas e variamos o número de placas para um comprimento da região de placas fixa (seed), o esquema deste elemento combustível pode ser visto na Fig. 2.

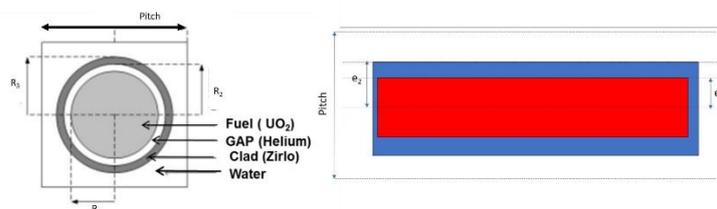


Fig. 1. A esquerda vista radial das varetas de combustível (blanket) e a direita Vista radial das placas de combustível (Seed)

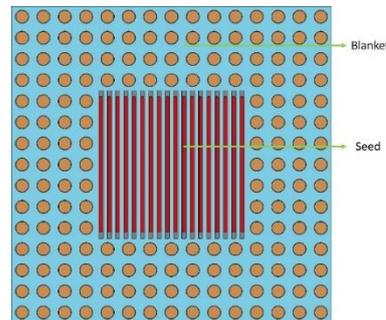


Fig. 2. Vista radial do elemento combustível mutigeométrico.

### 3. RESULTADOS

Nessa seção será apresentada a análise dos dados gerados pelo simulador estatístico de transporte de nêutrons Serpent de um reator térmico do tipo SMR com uma configuração não convencional, com uma malha de  $17 \times 17$ , moderado a água e com dois tipos diferentes de configurações de combustíveis, o combustível tipo placa e o combustível tipo pastilha. O combustível tipo placa, muito comum em reatores de pesquisa, consiste em várias placas finas com uma liga de Zircônio e Urânio no formato de um paralelepípedo revestido com um óxido de Alumínio com Urânio onde foi variado o número de placas e também a espessura dessas placas combustíveis. Já o combustível tipo pastilha, frequentemente usado em reatores de potência, constituído por uma liga de cerâmica de um óxido com 10% de isótopos de Urânio e 90% de Tório preenchido com gás Hélio a 25 bar no qual será variado o raio da pastilha combustível, a distância do gap e também a espessura do revestimento do combustível.

Assim como demonstrado em [7], o Carbetto de Urânico com Zircônio, é uma ótima opção tanto para propulsão térmica nuclear quanto para sistemas de potência, pois apresenta ótimas propriedades térmicas, podendo operar em altas temperaturas. E também como sugerido em [8], o revestimento Zircônio, que apesar de não transferir tão bem o calor, apresenta baixa seção de choque de captura e fissão, interagindo pouco com o nêutron.

Para chegar ao valor ótimo de taxa de conversão e fator de multiplicação foram realizados três pacotes de simulações. Primeiro a espessura da placa combustível e a espessura do revestimento foram variadas enquanto a pastilha combustível foi mantida inalterada, de acordo com os casos de 1 a 6 na Tab. 1, onde a espessura da placa combustível variou de 0,0415 até 0,5 centímetros e a espessura do revestimento variou entre 0,0735 a 0,082 cm, enquanto a pastilha combustível teve raios fixados em 0,475 cm para a pastilha, de 0,48315 cm para o gap e do revestimento em 0,54015 cm.

Desse modo, na primeira parte das simulações, com a diminuição da espessura da placa combustível houve também diminuição da quantidade de material físsil, como o U-233 e U-235, que apresentam alta seção de choque de fissão para nêutrons térmicos e apesar da moderada seção de choque de captura radioativa do U-235, consegue manter a reação em cadeia sustentável.

Em seguida tanto a espessura da placa combustível quando do revestimento foram mantidas fixas e os raios da pastilha combustível, o raio do gap entre o combustível e o revestimento e o raio do próprio revestimento foram modificados, conforme pode ser visto nos casos de 7 a 16 na Tab. 1, no qual a espessura da placa combustível e do seu revestimento foi mantida constante em 0,0415 e 0,7350 centímetros, o raio da pastilha combustível variou de 0,3 cm até 0,52 cm, o raio do gap muda de 0,30815 cm até 0,53315 e o raio do revestimento é alterado entre 0,36515 e 0,59015 centímetros.

Usando o caso 1 da primeira parte das simulações, foi escolhido como referência para a segunda parte, onde o tamanho das espessuras da pastilha, o tamanho do gap e a espessura do



revestimento cresceram significativamente, desta forma foi introduzido mais material fértil, que tem alta taxa de captura para nêutrons térmicos, convertendo para material fissil como o Th-232 que é convertido em U-233 que tem alta taxa de seção de choque de fissão para nêutrons térmicos, apesar da alta taxa de conversão gerada, houve uma grande queima de combustível.

Os resultados apresentados nesse trabalho estão em concordância com [9] que faz uma análise térmica, neutrônica e estrutural do combustível tipo placa e pastilha, comparando o desempenho com a diminuição do gap de Hélio de 0,08 para 0,04mm, que demonstrou pouca diferença considerável, comparada também com a utilização da liga metálica de Urânio-20% com Zircônio no combustível placa, que demonstrou um desempenho mais significativo.

Por fim, diferentes quantidades de placas combustíveis e suas distâncias foram simuladas para os melhores casos encontrados nos dois primeiros pacotes de simulações anteriores, segundo os casos de 17 a 21 na Tab. 2, nas quais os números de placas combustíveis mudaram de 18 a 22 elementos enquanto suas distâncias diminuíram de 0,44 cm até 0,36 cm, todos com espessura da placa combustível fixados em 0,0415 cm e espessura do revestimento em 0,0735 cm, sendo que no caso 17 os raios da pastilha, do gap e do revestimento foram de 0,3, 0,30815 e 0,36515 centímetros e nos casos 18 a 21 o raio da pastilha, do gap e do revestimento foram mantidos os mesmos de 0,475, 0,48315 e 0,54015 centímetros.

Para a última parte das simulações foi escolhida a menor espessura para o combustível tipo placa do primeiro pacote e as espessuras e raios do combustível tipo pastilha do caso 14 e forma mantidas constantes, variando o número de placas combustíveis, e assim, aumentando o número de combustível tipo placa, aumentou também a quantidade de material fissil, que com alta seção de choque de fissão consegue manter a reação em cadeia com um sistema levemente supercrítico a partir do caso 18, obtendo uma boa taxa de conversão.

Analisando a Tab. 2, percebemos que o caso 7 foi o que apresentou maior fator de multiplicação de 1,21047, representando um sistema supercrítico, condição ideal para elevar o nível de potência do reator, por isso os dados de entrada foram repetidos para o caso 17 como entrada inicial para novos testes no terceiro pacote de simulação, mas agora variando o número de placas e as distâncias a fim de encontrar um valor ótimo de taxa de conversão também.

Ainda sobre a análise do fator de multiplicação infinito da tab. 2, é importante mencionar que tanto a probabilidade de não fuga de nêutrons térmicos quanto de nêutrons rápidos foi considerado máxima, dessa forma não há fuga de nêutrons. Em todos os 21 casos o valor do fator de fissão rápido ( $\epsilon$ ) variou aproximadamente de 113% a quase 138%, a probabilidade de escape por ressonância (P) variou próximo de 44% a 78%, sendo menor no caso 16, onde o raio da pastilha combustível foi maior e maior no caso 7 onde o raio da pastilha foi o menor. Os valores do fator de utilização térmica (F) oscilaram em torno de 84% a 91% e o fator de reprodução (ETA), que é o número médio de nêutrons produzidos por nêutrons absorvidos pelo combustível manteve-se praticamente em torno de 160% em todos os casos.

A taxa de conversão, do inglês *conversion ratio* (CR), é a razão entre a taxa média de produção de átomos físseis para a taxa média de consumo de átomos físseis, por exemplo, é possível abastecer um núcleo de reator com Pu-239 e U-238 e então produzir mais Pu-239 que pode ser usado no futuro. Se a taxa de conversão for maior que a unidade é chamada de taxa de reprodução, do inglês *breeding ratio* (BR). Para reatores térmicos, o único ciclo de reprodução atrativo é o processo Th-232 para U-233, no entanto, reatores térmicos requerem uma quantidade mínima de material fissil para abastecimento [10].

A partir do primeiro pacote de simulações, onde se fixou os valores da espessura da placa de combustível, ficou claro que foram os melhores valores de taxa de conversão calculados, dessa forma, seguiu-se com essa premissa para o terceiro pacote de simulações, combinado com os melhores valores do segundo pacote de simulações, que foram os encontrados nos casos 7 e 14, observou-se que aumentando o número de placas e diminuindo a distância entre elas, os valores do combustível do tipo pastilha encontrado no caso 14 foi o que apresentou melhor desempenho. Portanto, seguindo com essa lógica, o caso 21 foi o que





Tab. 2. Fórmula dos 6 fatores

CASO	ETA		F		P		EPSILON		KINF		11	ETA		F		P		EPSILON		KINF	
	ETA	Δ	F	Δ	P	Δ	EPSILON	Δ	KINF	Δ		ETA	Δ	F	Δ	P	Δ	EPSILON	Δ	KINF	Δ
1	1,59506	0,00035	0,91143	0,00015	0,54322	0,00031	1,36631	0,0003	1,07891	0,00038	12	1,59827	0,00031	0,90294	0,00014	0,62898	0,00026	1,22015	0,00023	1,16588	0,00034
2	1,59827	0,00033	0,90875	0,00016	0,54512	0,0003	1,36412	0,00031	1,07993	0,00035	13	1,59687	0,00032	0,90818	0,00014	0,58831	0,00027	1,3046	0,00028	1,11298	0,00035
3	1,59769	0,00033	0,9094	0,00015	0,54798	0,0003	1,35725	0,0003	1,08053	0,00036	14	1,59616	0,00033	0,91069	0,00015	0,54272	0,00029	1,36743	0,0003	1,07869	0,00036
4	1,59498	0,00033	0,9109	0,00015	0,5406	0,00029	1,37203	0,00029	1,07754	0,00035	15	1,59832	0,00034	0,90888	0,00016	0,49389	0,00032	1,45031	0,00033	1,04041	0,00037
5	1,59398	0,00033	0,91281	0,00016	0,53979	0,0003	1,37173	0,00031	1,07725	0,00036	16	1,60282	0,00036	0,90167	0,00019	0,44251	0,00037	1,55977	0,00039	0,99735	0,00038
6	1,59478	0,00034	0,9127	0,00016	0,53737	0,00031	1,37718	0,00034	1,07707	0,00036	17	1,61971	0,00029	0,8417	0,00016	0,78238	0,00017	1,13489	0,00017	1,21047	0,00033
7	1,61971	0,00029	0,8417	0,00016	0,78238	0,00017	1,13489	0,00017	1,21047	0,00033	18	1,59506	0,00034	0,91231	0,00015	0,5412	0,00032	1,3682	0,00032	1,07741	0,00036
8	1,61311	0,00028	0,85874	0,00015	0,75822	0,00018	1,1489	0,00018	1,20667	0,00032	19	1,59591	0,00033	0,91131	0,00015	0,53778	0,00031	1,37756	0,0003	1,07732	0,00036
9	1,60819	0,00028	0,87346	0,00014	0,73055	0,0002	1,16778	0,00019	1,19832	0,00032	20	1,59131	0,00034	0,91438	0,00015	0,53681	0,00031	1,37593	0,00032	1,07461	0,00036
10	1,60208	0,00029	0,88598	0,00014	0,70067	0,00021	1,19003	0,00022	1,18347	0,00031	21	1,5918	0,00033	0,91552	0,00015	0,5351	0,00031	1,3775	0,00032	1,07409	0,00036

Tab. 3. Fórmula dos 6 fatores

CASO	TAXA DE CONVERSÃO	Δ									
1	0,72958	0,00071	12	0,62847	0,00069	6	0,73298	0,00069	17	0,45331	0,00078
2	0,72544	0,00068	13	0,675	0,00069	7	0,45331	0,00078	18	0,73282	0,0007
3	0,72538	0,00068	14	0,72853	0,00067	8	0,48304	0,00074	19	0,73092	0,00067
4	0,73041	0,00067	15	0,78813	0,00063	9	0,51395	0,00071	20	0,73792	0,0007
5	0,73308	0,00068	16	0,85661	0,00067	10	0,54976	0,0007	21	0,74018	0,0007

#### 4. CONCLUSÃO

Nesse trabalho, foi considerado uma geometria não convencional para a distribuição dos elementos combustíveis em reatores nucleares do tipo SMR. Utilizando simultaneamente o elemento combustível tipo placa, composto por uma liga metálica de Zircônio com Urânio, e o elemento combustível do tipo pastilha, constituído por uma liga cerâmica com 90% de Tório e 10% de isótopos de Urânio. Os parâmetros nucleares foram analisados através do software Serpent, principalmente a taxa de conversão e o fator de multiplicação.

Os resultados obtidos indicam que a configuração escolhida é ideal para reatores que operam com nêutrons na faixa térmica, pois, a combinado com a utilização do ciclo de Tório com Urânio no modelo seed-blanket, especialmente devido ao Th-232 que é convertido em U-233 e possui alta seção de choque de fissão, cria um ambiente propício com excesso de nêutrons que continuam o ciclo, transformando os isótopos férteis em físeis e contribuindo para uma reação em cadeia sustentável, onde o sistema foi mantido levemente supercrítica.



O estudo também demonstrou que a liga de Zircônio com Urânio no revestimento do combustível apresentou considerável contribuição para manter o sistema supercrítico, ao contrário do aço inoxidável, que possui alta taxa de seção de choque de captura de nêutrons, além de possuir propriedades térmicas necessárias para suportar o estresse térmico proveniente dos altos níveis de temperatura alcançados nessa configuração.

É importante mencionar que, apesar de gerar um combustível usado com volume menor do que o gerado em reatores convencionais, a configuração de combustível utilizada nesse estudo apresenta um maior obstáculo para o reprocessamento do combustível consumido, o que é também uma vantagem, por que contribui para a não proliferação de armas nucleares. Dessa forma, fica claro que combustíveis que utilizam o ciclo de Tório com Urânio em SMR térmicos apresentam uma alta taxa de conversão e um alto potencial para serem do tipo *breeder reactors*. Além disso, os benefícios já conhecidos, como o tamanho reduzido do SMR, a menor necessidade de área útil e a possibilidade da utilização em áreas remotas, onde o sistema elétrico interligado não consegue alcançar devido as adversidades ambientais e geográficas, tornam o combustível baseado em Tório uma atraente opção devida também a sua eficiência e por causa do menor acúmulo de plutônio e elementos transurânicos. No entanto, é necessário tomar cuidado com a configuração da geometria para evitar um reator subcrítico com fator de multiplicação abaixo de um.

Como sugestão para trabalhos futuros, para proporcionar uma visão mais completa sobre a viabilidade e também sobre a segurança, utilizando o mesmo design de configuração da distribuição dos elementos combustíveis proposto nesse trabalho para o núcleo do reator SMR, complementando o estudo apresentado, seria interessante incluir uma análise termo-hidráulica para investigar se os critérios de projeto ainda são satisfeitos, incluindo informações de transferência de calor, a distribuição de temperatura e a eficiência do sistema.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Utilization of nuclear waste plutonium and thorium mixed fuel in candu reactors, Sümer Şahin, Başar Şarer, Yurdunaz Çelik;
- [2] Preliminary FRAPCON-3Th Steady-State Fuel Analysis of ThO<sub>2</sub> and UO<sub>2</sub> Fuel Mixtures, E. Loewen, Arvind Kumar;
- [3] Assessment of Homogeneous Thorium/Uranium Fuel for Pressurized Water Reactors, A. Galperin, E. Shwageraus, M. Todosow;
- [4] Nuclear fuels for very high temperature applications, L. Lundberg, R. Hobbins;
- [5] Analysis of Burnup and Economic Potential of Alternative Fuel Materials in Thermal Reactors, S. Oggianu, H. No, M. Kazimi;
- [6] Thermal Aspects of Uranium Carbide and Uranium Dicarbide Fuels in Supercritical Water-Cooled Nuclear Reactors, L. Grande, B. Villamere, L. Allison, S. Mikhael, A. Rodriguez-Prado, I. Pioro,;
- [7] Nuclear Fuels for Very High Temperature Applications;
- [8] Microstructural characteristics of a fresh U(Mo) monolithic mini-plate: Focus on the Zr coating deposited by PVD;
- [9] Untraditional solution for enhancing the performance of U-20 % Zr metallic alloy as an ATF using liquid metal bonded gap;
- [10] Nuclear Reactor Analysis, J. Duderstadt, L. Hamilton;
- [11] Numerical design of the Seed-Blanket Unit for the thorium nuclear fuel Cycle, Mikołaj Oettingen and Katarzyna Skolik
- [12] Improvement of the VVER-1200 Fuel Cycle by Introducing Thorium with Different Fissile Material in Blanket-Seed Assembly, A. Abdelghafar Galahom
- [13] The Seed-Blanket Core Concept, Alvin Radkowsk;
- [14] Preliminary FRAPCON-3Th Steady-State Fuel Analysis of ThO<sub>2</sub> and UO<sub>2</sub> Fuel Mixtures;
- [15] Performance Analysis of a Thorium-Fueled Reactor with a Seed-Blanket Assembly Configuration.