

# COMPARAÇÃO DE CICLOS ABERTOS DE URÂNIO E ÓXIDOS MISTOS DE TÓRIO-URÂNIO UTILIZANDO REATORES AVANÇADOS

Letícia C. Gonçalves<sup>1</sup> e José R. Maiorino

Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas  
Universidade do Federal do ABC  
Av. dos Estados, 5001  
09210-580 Santo André, SP  
goncalves.leticia@gmail.com

## RESUMO

Realizou-se um estudo comparativo do balanço de massa e custos de produção dos combustíveis de óxido de urânio para um reator AP1000 e de óxido misto de tório-urânio em uma proposta de reator utilizando Tório denominada AP-Th1000. Assumindo os valores de massa de entrada para uma carga de combustível determinou-se o enriquecimento médio para ambos os reatores bem como sua massa de alimentação. Com estes parâmetros, calculou-se os custos em cada processo de preparação do combustível, admitindo os preços fornecidos pela World Nuclear Association. Compararam-se quantitativamente os custos totais de combustível para os dois reatores considerando ciclos abertos de 18 meses. Considerando enriquecimento de 20 % para o ciclo aberto de combustível de óxido misto U-Th, o consumo total de urânio desta opção foi maior 50 % e o custo devido ao enriquecimento foi maior 70 %. Os resultados mostram que o uso de combustíveis de óxidos mistos de U-Th podem ser vantajosos pode ser vantajosos levando em conta questões de sustentabilidade. Neste caso outros parâmetros e condições devem ser investigados, principalmente aqueles ligados à reciclagem do combustível, armazenagem do combustível irradiado e redução da quantidade de rejeitos radioativos transurânicos.

## 1. INTRODUÇÃO

A duração das reservas conhecidas de urânio, mantendo a taxa atual de consumo deste energético, é estimada em cerca de 40 anos para custos de extração inferiores a US\$ 80/kg U, de cerca de 60 anos para custos de extração inferiores a US\$ 130/kg U, e cerca de 100 anos para custos de extração inferiores a US\$ 260/kg U. Portanto, o urânio como fonte de energia primária, é limitado a este século se apenas reatores de potência térmicos forem utilizados e ciclos de combustível sem qualquer tipo de reciclagem ou reaproveitamento do urânio e plutônio remanescente no combustível irradiado for empregado [1].

Outra alternativa como fonte primária de energia nuclear é o tório [1-3]. Sua utilização em reatores nucleares tem sido motivo de várias pesquisas a nível internacional, tendo em vista a utilização desta fonte primária de energia nuclear para complementar a utilização de urânio em reatores nucleares e aumentar a sustentabilidade da fonte nuclear [4,5]. O tório (Th) é um elemento metálico de actínido com abundância na crosta terrestre, cerca de três vezes maior que o urânio, sendo encontrado naturalmente em seu isótopo  $^{232}\text{Th}$  (100 %).

A seção de choque de fissão para energia térmica seja zero (material não fissil) e somente a fissão rápida é possível usando o tório. Contudo, o  $^{232}\text{Th}$  é um material fértil. Dada a alta seção de choque de captura de nêutrons pelo  $^{232}\text{Th}$  é possível produzir  $^{233}\text{U}$  que é fissil e que surge

após dois decaimentos beta. Assim o Th pode produzir  $^{233}\text{U}$  (fissil) quando utilizado como combustível ou em blankets de reatores rápido [2,3].

Além da abundância de tório na natureza e a perspectiva de utilização sistemas baseados no  $^{233}\text{U}$ , as razões essenciais para o interesse em tório são boas propriedades neutrônicas, bom comportamento sob irradiação, a possibilidade de otimização do consumo de material fissil e melhor gestão de resíduos do ponto de vista de sustentabilidade [2-5].

O presente trabalho apresenta um estudo comparativo do balanço de massa e custos de produção dos combustíveis de óxido de urânio para um reator AP1000 e de óxido misto de tório-urânio em uma proposta de reator utilizando Tório denominada AP-Th1000 [6]. Considera-se uma carga de combustível para um ciclo de 18 meses aberto, isto é, sem reciclagem via reprocessamento. Na próxima seção apresenta-se o ciclo de combustível do urânio e do tório para salientar suas diferenças e indicar elementos importantes para o balanço de massa e para estimativa de custos. Na seção seguinte apresentam-se os métodos e dados utilizados neste trabalho e depois os resultados, discussões e conclusões.

## 2. CICLO DOS COMBUSTÍVEIS DE URÂNIO E DE TÓRIO

O ciclo do combustível ou seu ciclo de vida apresenta várias etapas. O urânio natural, encontrado na natureza, contém apenas 0,7% de  $^{235}\text{U}$ , enquanto o restante dos 99,3% do urânio é  $^{238}\text{U}$ , que não se fissiona. A Figura 1 apresenta, de forma simplificada, as etapas do processo de produção do combustível urânio. Extraído do minério de urânio, purificado e concentrado sob a forma de um sal de cor amarela, conhecida como *yellowcake* ( $\text{U}_3\text{O}_8$ ), o urânio é então convertido, através de tratamento químico, em hexafluoreto de urânio ( $\text{UF}_6$ ). Esta forma facilita o processo de enriquecimento, uma das mais importantes do ciclo de vida do combustível. Após enriquecido, deve-se realizar a reconversão, onde ocorre o retorno do gás  $\text{UF}_6$  ao estado sólido, sob a forma de pó de dióxido de urânio ( $\text{UO}_2$ ). Realizado estes processos, o pó é então processado e, após rigorosos testes químicos afim de eliminar impurezas, é adicionado à varetas que, por sua vez, são dispostas no elemento combustível.

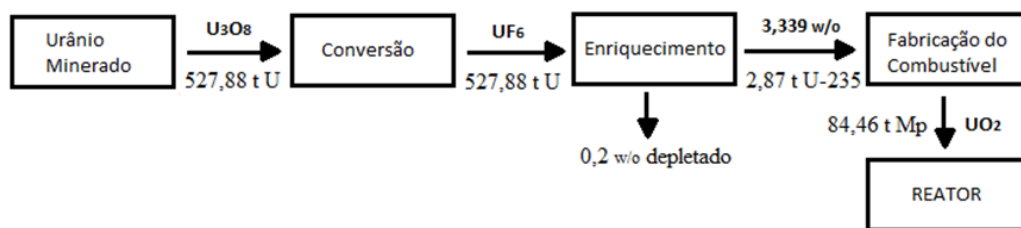


Figura 1: Fluxograma de preparação do combustível a base de urânio ( $\text{UO}_2$ ).

O  $^{232}\text{Th}$  é um elemento fértil que possui a propriedade de poder ser convertido no nuclídeo fissil  $^{233}\text{U}$  dentro de um reator [1-3]. A Figura 2 apresenta o ciclo do combustível de óxidos mistos de urânio e tório. O ciclo deste combustível é igual ao do combustível de urânio, com o acréscimo do dióxido de tório extraído diretamente da mina e sem necessidade de outras etapas de preparação. O dióxido de tório é misturado ao dióxido de urânio para então ser produzido o combustível de óxido misto de U-Th,  $(\text{U-Th})\text{O}_2$ .

### 3. MÉTODOS E DADOS

O equacionamento do balanço de massa é apresentado na seção 3.1 e o equacionamento para a estimativa do custo do combustível é apresentado na seção 3.2. Considera-se uma carga de combustível para um ciclo de 18 meses aberto, isto é, sem reciclagem via reprocessamento. Os custos calculados são relacionados à fabricação do combustível (enriquecimento). Não há considerações de custo de estocagem de combustível irradiado. A seção 3.3 apresenta a origem dos dados e as quantidades de combustível consideradas.

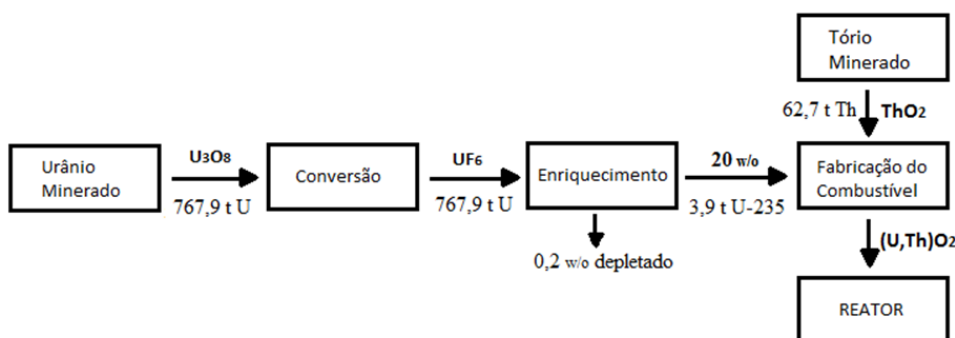


Figura 2: Fluxograma de preparação do combustível de óxido misto urânio-tório (U-Th)O<sub>2</sub>.

#### 3.1. Balanço de Massa

A Figura 3 apresenta esquematicamente o processo de enriquecimento. A partir das massas de <sup>235</sup>U ( $M_{235}$ ) e de <sup>238</sup>U ( $M_{238}$ ) fornecidas, é possível determinar a massa do produto,  $M_p$ , pela equação (1) e, assim, quantificar a massa de alimentação,  $M_a$ , isto é, a massa de urânio natural necessário para a produção do combustível, que é conhecido pela equação (2):

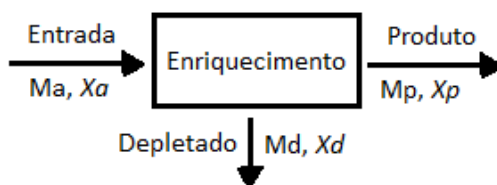


Figura 3: Balanço de materiais no processo de enriquecimento

$$M_p = M_{235} + M_{238} \quad (1)$$

$$M_a = M_p + M_d \quad (2)$$

Onde  $M_d$  é a massa de urânio empobrecido (depletado). Como a quantidade total de U-235 é a mesma antes e após o enriquecimento, então fazendo as manipulações necessárias e eliminando  $M_d$ , tem-se:

$$X_a M_a = X_p M_p + X_d M_d \quad (3)$$

$$M_a = \left( \frac{x_p - x_d}{x_a - x_d} \right) M_p \quad (4)$$

Em que  $X_a$  e  $X_d$  são, respectivamente, o enriquecimento do urânio natural e o enriquecimento do urânio depletado, que assumem, tipicamente, os valores  $X_a = 0,00711$  e  $X_d = 0,002$ , e  $X_p$  é o enriquecimento do produto obtido pela equação (5):

$$X_p = M_{235} / M_p \quad (5)$$

Nota-se que, no caso de um reator AP1000, trata-se de um enriquecimento médio visto que, em sua configuração, há 3 regiões de distintos enriquecimentos.

### 3.2. Balanço de Custos

A partir da massa de alimentação, é possível calcular os custos de produção de todo o ciclo de produção do combustível nuclear. Realizando uma cotação destes custos, obteve-se custos de extração de um quilo de urânio por \$80 (PU), preço de \$12 por kg de urânio para a conversão de  $U_3O_8$  para  $UF_6$  (PC), um custo médio de \$135 por kg de uma unidade de trabalho separativo (PSWU) e um custo de produção do elemento combustível de urânio, após enriquecido, por \$300 por kg (PE) [7].

Para determinar o custo de uma unidade de trabalho separativo (SWU), faz-se necessário calcular primeiramente, pela equação (6), a função  $V(X)$ , que é resolvida para os enriquecimentos,  $X_p$ ,  $X_a$  e  $X_d$ . Desta forma, o SWU pode então ser resolvida pela equação (7):

$$V(X) = (1 - 2X) * \ln \left( \frac{1-x}{x} \right) \quad (6)$$

$$SWU = M_p * [V(X_p) - V(X_d)] - M_a * [V(X_a) - V(X_d)] \quad (7)$$

Após determinado o valor do trabalho separativo, pode-se então calcular o custo total (CT) para a produção do combustível nuclear, dado pela equação (8):

$$CT = M_a * (PU + PC) + (PSWU * SWU) + M_p * PE$$

$$CT = 92 * M_a + 135 * SWU + 300 * M_p \quad (8)$$

Para a produção do combustível de óxidos mistos de tório-urânio, tem-se, além dos custos associados à produção do urânio, o custo de extração do óxido de tório, que é de cerca de \$80 por kg de tório<sup>[8]</sup> (PT). Assim, o custo total do combustível misto (CTM) será dado também pela equação (8), assumindo os valores para este reator, com a diferença do acréscimo tanto da massa de entrada do tório,  $M_T$ , nos custos de produção do elemento combustível além do custo de extração do tório. Desta forma, o custo total será:

$$CTM = 92 * M_a + 135 * SWU + 300 * (M_p + M_T) + 10 * M_T \quad (9)$$

### 3.3. Núcleos de referência e massa total de combustíveis

O reator PWR escolhido como referência para os cálculos do combustível de urânio foi o AP1000, desenvolvido pela empresa Westinghouse. Este reator é considerado como um dos mais seguros e modernos da atual Geração III [1,2]. Em contrapartida, para fins de cálculo do combustível de urânio-tório, foi escolhido o AP-Th1000, uma proposta de núcleo de reator modelado à partir das configurações do AP1000 [6]. Desta referência tomaram-se os dados necessários para se realizar os balanços de massa e custo, desconsiderando perdas e o tempo.

Os dados fornecidos indicam que, para um reator AP1000 foi necessário uma massa de entrada de  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$  no reator de, respectivamente, 2.866,4 kg e 81.598,4 kg. Para o reator AP-Th1000 as massas de  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$  são, respectivamente, 3.963,76 kg e 15.855,0 kg. Não há entrada de Th-232 no reator AP1000, mas no núcleo AP-Th1000 há a adição é de 62.725,0 kg.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Assumindo os valores de massa fornecidos pela Ref. 6 e substituindo nas equações acima, determinaram-se os seguintes balanços de massa e custo para ambos os reatores. Considerou-se uma carga de combustível para um ciclo de 18 meses aberto. Nenhuma consideração sobre reciclagem via reprocessamento foi considerada. A seção 4.1 apresenta os resultados relativos ao reator AP1000 e a seção 4.2 apresenta os resultados relativos ao núcleo APTh1000. Na seção 4.3 discutem-se os resultados.

### 4.1. Reator AP1000

Utilizando a equação (1) para determinar a massa do produto e a equação (5) para obter o enriquecimento médio, tem-se, respectivamente, 84464,8 kg e 0,0339, que equivale a 3,34 %. Substituindo esses valores na equação (4), definiu-se que a massa de alimentação necessária é de 527880,7045 kg.

Para calcular o balanço de custo, é necessário calcular o trabalho separativo. Para isso, calculou-se a função  $V(X)$ , pela equação (6), para os enriquecimentos médio do produto, da alimentação e do depletado, assim obtendo  $V(X_p) = 3,1215$   $V(X_a) = 4,8690$  e  $V(X_d) = 6,1878$ . Substituindo esses valores na expressão (7), tem-se que o trabalho separativo é de 437213,689. Desta forma, pela equação (8), tem-se por fim que o custo total final foi de 133 milhões de dólares.

## 4.2. Reator AP-TH1000

Repetindo os passos anteriores, a massa do produto e seu enriquecimento são, respectivamente, 19818,76 kg e 0,2000, que equivale a 20 %. Desta forma, a massa de alimentação é de 767930,0352 kg.

Da mesma forma, admitindo que  $V(Xa)$  e  $V(Xd)$  são os mesmo que do reator AP1000 e calculando  $V(Xp)$ , tem-se 0,8318. Assim, o trabalho separativo será 906652,725 e o custo total para este combustível misto, utilizando a equação (9), é de 223 milhões de dólares.

## 4.3. Discussão dos resultados

Analisando o ciclo aberto da fabricação dos combustíveis de urânio e de urânio-tório, e organizando o balanço de massa, obtêm-se os fluxogramas indicados nas Figuras 1 e 2. Desta forma, é possível observar que, para um reator AP1000, é necessário apenas um enriquecimento médio em massa do  $^{235}\text{U}$  de 3,34 %, enquanto para o AP-Th1000 este sobe para 20 %. Também é possível notar que, com a adição do tório, uma menor fração de  $^{238}\text{U}$  é adicionada ao reator AP-Th1000, embora este necessite de uma maior massa de alimentação para seu funcionamento. Isto ocorre devido à necessidade de mais massa de alimentação para enriquecer o combustível até o nível de 20 %.

Analisando com mais detalhe esses os resultados, nota-se que embora a massa de urânio do produto para o AP-Th1000 seja 4 vezes menor que o AP1000, seu alto valor de enriquecimento torna necessário uma massa de alimentação quase 1,5 vezes maior. Sendo esta etapa no processo a mais dispendiosa, um maior enriquecimento somado com os custos de extração do óxido de tório tornou o combustível 70 % mais caro do que o combustível para um reator AP1000. Consequentemente, considerando ciclo aberto, o custo de fabricação do combustível de óxido misto de urânio-tório torna-se 50 % mais caro comparado com o custo da fabricação do combustível de óxido de urânio.

Esses resultados mostram que para uma carga de 18 meses em ciclo aberto a introdução de óxidos mistos de tório não apresenta vantagens econômicas. Contudo ciclos abertos não são sustentáveis e outros parâmetros e condições devem ser investigados, como a reciclagem do combustível, armazenagem do combustível irradiado e redução da produção de rejeitos radioativos transurânicos [4,5]. Para atender adequadamente questões de sustentabilidade é necessário considerar ciclos fechados de combustíveis.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma avaliação do custo de combustível de óxidos mistos de U-Th em reatores PWR avançados. Os núcleos de reatores considerados no estudo foram o AP1000 e o APTh1000. Foi analisado os custos por meio de um balanço de massa dos ciclos de combustível abertos de 18 meses sem considerações de reciclagem de combustível via reprocessamento.

Analisando apenas uma carga de 18 meses nesses reatores em um ciclo aberto, o combustível de óxido misto de tório é 70 % mais caro. Contudo ciclos abertos de combustíveis tem baixa sustentabilidade. Para avaliar as vantagens do uso de óxidos mistos de Th em PWRs devem-se

considerar outros parâmetros sustentáveis. Um primeiro estudo é a avaliar um balanço de massa e custos para as 3 cargas do ciclo aberto de combustível. Um segundo estudo nesta linha é considerar um ciclo fechado com o reprocessamento do combustível de óxido misto. Neste caso outros parâmetros e condições devem ser investigados, como reciclagem do combustível, armazenagem do combustível irradiado e redução da quantidade de rejeitos radioativos transurânicos.

## AGRADECIMENTOS

O primeiro autor gostaria de agradecer aos professores João Manoel Losada Moreira e Pedro Carlos Russo Rossi pelo apoio durante a pesquisa. Ela gostaria de agradecer também a Universidade Federal do ABC pelo apoio financeiro fornecido que lhe permitiu participar do INAC de 2017.

## REFERENCIAS

1. Maiorino, J. R.; Moreira, João M. L. Recycling and transmutation of spent fuel as a sustainable option for the nuclear energy development. *Journal of Energy and Power Engineering*, 8, 1505-1510, 2014.
2. Maiorino, J. R., Carluccio, T. A review of Thorium utilization as an option for advanced fuel cycles - potential option for Brazil in the future, in ANES 2004: Americas Nuclear Energy Symposium, Miami Beach, Florida, USA, 2004.
3. OECD Nuclear Energy Agency. Introduction of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle: Short-to long-term considerations, NEA No. 7224, 2015.
4. Moreira, J. M. L.; Cesaretti, M. A.; Carajilescov, P. ; Maiorino, J. R. Sustainability deterioration of electricity generation in Brazil. *Energy Policy*, 87, 334-346, 2015.
5. Maiorino, J. R., Moreira, J.M.L., Laranjo, S. G., Busse, A., Santos, T. Oferta e Demanda de Energia – o papel da tecnologia da informação na integração dos recursos, in. X Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (CBPE), SBPE, Gramado, RS, Brasil, 2014.
6. Maiorino, J. R.; Stefani, G. L.; Moreira, J. M. L.; Rossi, P. C. R.; Santos, T. A. Feasibility to convert an advanced PWR from UO<sub>2</sub> to a mixed U/ThO<sub>2</sub> core - Part I: Parametric studies. *Annals of Nuclear Energy*, 102, 47-55, 2017.
7. Ayoub, J. M. S. Estudo de Diferentes Rotas de Preparação de Óxidos Binários de Tório e Urânio. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
8. World Nuclear Association <<http://www.world-nuclear.org/>> Acessado em 14 de novembro de 2016.
9. World Nuclear Association <<http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx>> Acessado em 15 de novembro de 2016.