Principais minérios de tório e sua importância para a área nuclear.

Aline Viana de Morais[1] , Hélio Jeremias [2]

RESUMO

O presente trabalho contempla a viabilidade técnica da geração de energia nuclear com a utilização de elementos combustíveis fabricados com tório em reatores regeneradores térmicos. O tório apresenta alto rendimento de nêutrons, o que é desejável em reações nucleares em cadeia. Essa tecnologia possibilita alongar a vida do combustível nuclear, bem como tem o potencial de reduzir os seus custos de fabricação quando comparados aos custos dos combustíveis nucleares atuais, produzidos com urânio ou com urânio e plutônio reciclado. Dentre outras características, o tório destaca-se por ser fértil, apresentar estabilidade de irradiação e possibilidade de reciclagem. O uso deste combustível está associado à sustentabilidade em regeneradores industriais e diminuição da quantidade necessária de urânio para produção de energia nuclear. Os novos modelos de reatores que têm como combustível o tório apresentam maior segurança, quando comparados aos atuais reatores que utilizam elementos combustíveis de urânio enriquecido, porque, entre outras medidas de segurança, trabalham à pressão atmosférica.

Palavras-chave: Tório. Geração de energia, Energia nuclear

[1] Graduada em Ciências Biológicas com ênfase em Biologia Marinha - Universidade Santa Cecília (2009), Mestranda em Tecnologia Nuclear pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)/Universidade de São Paulo. E-mail: alinevmorais@gmail.com

[2] Engenheiro Mecânico, Pós - graduado em Engenharia de Segurança do Trabalho, Administração Industrial, Planejamento Empresarial e Estratégia Competitiva, Sistema de Gestão Integrada. Quarenta anos de experiência nas áreas de Engenharia, Manutenção Industrial, Projeto e Montagem de Plantas de Processo e de Embalagem. Operação de fábricas, Administração de Projetos Industriais e Obras Civis. Professor de pós Graduação na área de Energia e Gestão Ambiental. E-mail: heliojerema@gmail.com

ABSTRACT

This article discuss the viability of generating nuclear power by using thorium in thermal breeder reactors to create fuel elements. Thorium has a high yield of neutrons, which is desirable in nuclear chain reactions. This technology makes it possible to increase the life of the nuclear fuel and has the potential to reduce their manufacturing costs, compared to current costs of nuclear fuel produced from uranium or recycled plutonium and uranium. Among other features, thorium is notable for being fertile, presenting irradiation stability and recyclability. The use of this fuel is associated with sustainability in industrial regenerators and also decreases the required amount of uranium for nuclear energy production. New types of reactors that use thorium as fuel have better security compared to current reactors that use enriched uranium fuel elements, because, among other security measures, it works at atmospheric pressure.

Keywords: thorium, power-generation, nuclear energy

INTRODUÇÃO

Os minerais estão entre os insumos básicos mais utilizados pela civilização moderna, seja na indústria, construção civil, cerâmica, vidros, papel, assim como também compõem matérias-primas para a confecção de joias. (BRASIL, 2013).

O tório é um elemento químico associado a minerais que ocorre naturalmente na crosta terrestre. A média de sua abundância tem sido estimada em aproximadamente 10ppm sendo que essa proporção equivalente a três vezes a quantidade de urânio (BENJAMIN, 1983). O tório é um metal

radioativo, naturalmente presente no solo e em rochas, fazendo parte de minerais como a monazita, torita, torianita, etc. (BHATTI et. al. 2012).

Na natureza as maiores concentrações de tório ocorrem nos minerais torita (óxido de tório + óxido de urânio) e torianita (silicato de tório), onde a porcentagem de tório pode variar de aproximadamente 30% a 90%. (FLORÊNCIO, 1952). A torita é um silicato, que se assemelha ao zircão (silicato de zircônio) na forma e no comportamento e é geralmente, encontrado com mais facilidade em minerais pretos. A torita tem aspecto alaranjado-claro. Em sua composição tem-se até 65% de tório, associado com silicatos de urânio, ferro, manganês, cobre, chumbo, estanho, alumínio, sódio e potássio (FLORÊNCIO, 1952). As principais reservas de torita conhecida estão localizadas na Nova Zelândia e na parte ocidental dos Estados Unidos. Porém, ricos depósitos de torita são escassos, e o comércio de tório voltado a esse mineral é pequeno. O mineral mais rico de tório é a torianita, que pode conter elevada concentração de dióxido de tório (ThO^2), além de urânio e metais de terras raras (BENJAMIN, 1983).

Sabe-se que a monazita é a maior e a mais importante fonte de tório. A monazita é composta por fostatos de metais do grupo do cério, lantânio e didímio, além de tório e metais do grupo do ítrio. O tório pode estar também na forma de silicatos (FLORÊNCIO, 1952). A monazita está principalmente associada a depósitos de areia, que são originados pela ação da água e intemperismos das rochas que formam os leitos de rios e praias (ALLEN, 1968). Nem sempre os minerais estão disponíveis na natureza na forma em que serão consumidos, quer seja pela sua granulometria, por estarem associados a outros minerais que não têm interesse ou não são desejáveis ao

processo industrial ao qual serão destinados (BRASIL, 2013). Geralmente, as fontes mais abundantes de areia monazítica devem passar por processos para a remoção da areia leve. Esse procedimento é seguido de uma fina separação com o emprego de gravidade, eletromagnetismo ou técnicas eletrostáticas (BENJAMIN, 1983).

O tório tem aplicações industriais diversas por sua resistência ao calor em função de seu alto ponto de fusão. Assim, é utilizado em lanternas, lâmpadas de arco elétrico, eletrodos de solda e cerâmica entre outros. Ao se incorporar óxido de tório ao vidro, esse passa a ter um elevado índice de refração e baixa dispersão, sendo utilizado em lentes de elevada qualidade para câmeras e instrumentos científicos (WNA, 2013).

O tório pode ainda ser utilizado para a produção de material físsil em reatores nucleares regeneradores (WNA, 2013).

DISCUSSÃO

A fonte mais importante de extração de tório para uso industrial são as areias monazíticas que contêm muita quantidade de tório com urânio e fosfatos de metais de cério presentes em terras raras. As maiores ocorrências de areias monazíticas estão localizadas principalmente no Brasil, Índia, Indonésia, Malásia, Austrália, África do Sul e Estados Unidos (BENJAMIN, 1983).

Dos isótopos do tório, o ^{232}Th é isótopo dominante com ocorrência de praticamente 100% do mineral encontrado na natureza, cuja concentração é da

ordem de 10 ppm. Em sua forma pura apresenta-se como um metal prateado com densidade próxima à do chumbo (Figura 1). Pode-se considerar que o único isótopo natural de tório é o ^{232}Th (RAMOS, 2010).



FIGURA 1: Tório metálico (Google, 2013. Disponível em: http://rogerhelmermep.wordpress.com/2013/01/08/thinking-about-thorium/).

As concentrações de tório na água são muito baixas, geralmente menor que o limite de detecção dos sistemas de medição. Esse fato pode ser explicado pela baixa solubilidade do tório na água que faz com que este elemento fique retido preferencialmente na fase sólida ou na interface sólido – água. Além disso, não evapora do solo ou da água para a atmosfera (FREITAS, 2008).

A extração do tório, urânio e elementos das terras raras pode ser dividida em dois processos ou estágios: processo de digestão alcalina (com soda cáustica) e digestão com ácido sulfúrico.

O processo alcalino de digestão da monazita resulta em uma conversão de fosfatos em trifosfato de sódio solubilizado, enquanto o tório, urânio e os elementos de terras raras tornam-se óxidos e hidróxidos insolúveis. Em

seguida são retirados e dissolvidos em uma concentração quente de acido clorídrico, e então, corrige-se o pH. O precipitado de hidróxidos e óxidos é assim produzido e contem 96% de tório e urânio, além de 2 a 3% de elementos de terras raras. Para obter maior purificação de tório e urânio, faz-se a separação de cada elemento através da extração por solvente da solução de nitrato por meio da dissolução de hidróxido de sódio precipitado em ácido nítrico. Formam-se os seguintes elementos $Th(C_2O_4)_2$ e $U_2O_7(NH_4)_2$. (BENJAMIN, 1983).

O processo de digestão por ácido sulfúrico para extração da monazita começa com uma concentração a quente (93%) de ácido sulfúrico. O tório, urânio e elementos de terras raras passam em uma solução de ajuste de pH com hidróxido de amônia, de maneira que praticamente todo tório é precipitado, restando aproximadamente 5% de elementos de terras raras. Em decorrência do grande predomínio desses elementos na areia monazítica, o precipitado consiste em metade de fosfatos de tório e metade de sulfatos de terras raras. O urânio e a massa de terras raras permanecem em solução, mas, elevando-se o pH e adicionando-se mais amônia, a maioria do urânio e os elementos de terras raras são precipitados. Os precipitados de tório e urânio são purificados pela remoção dos elementos de terras raras e extração por solventes depois de dissolver em ácido nítrico. Os compostos de tório e urânio apresentam rendimentos semelhantes (BENJAMIN, 1983).

Atividades humanas que exploram tais recursos podem ocasionar um aumento significativo na concentração destes elementos e também alterações relevantes da concentração dos radionuclídeos naturais nos vários compartimentos do ecossistema. No Brasil, um exemplo importante desta

situação são as indústrias de fertilizantes fosfatados que tem como subprodutos, os radionuclídeos (ALENCAR, 2008).

O tório tem um papel importante no ciclo do combustível nuclear devido à reação de captura de nêutron pelo ^{232}Th gerando o ^{233}U, que é um isótopo físsil (ALENCAR, 2008).

A absorção de nêutrons feitas pelo tório natural (^{232}Th) produz o isótopo radioativo ^{233}Th. O ^{233}Th decai com a emissão de uma partícula beta e forma o protactínio (Pa) que por sua vez, decai com a emissão de outra partícula beta e forma o isótopo físsil ^{233}U.

Dos isótopos físseis, o ^{233}U é o que tem o maior Fator de Reprodução quando fissionado por nêutrons térmicos (que ocorre na maioria dos reatores nucleares). Para o ^{233}U o Fator de Reprodução é de 2.27 nêutrons produzidos, por nêutron absorvidos. Comparando-o com os demais, temos 2.1 para o ^{235}U e 2.0 para o ^{239}Pu, sendo esse, outro isótopo físsil, que pode ser obtido a partir do urânio. Desses 2.7 nêutrons produzidos por nêutron absorvido, um nêutron é suficiente para sustentar a reação de fissão em cadeia. Temos então uma boa sobra (1,7 nêutrons) disponível para absorção pelo material fértil adicional e pelos demais materiais componentes do núcleo do reator (ALLEN, 1968). 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 ^{232}Th, que vai gerar o ^{233}U. Este isótopo é depois retirado no núcleo do reator, separado do ^{232}Th, concentrado, e com ele é feito o novo combustível do reator. Dessa forma o reator estará queimando indiretamente o tório, que é um elemento mais abundante que o urânio.

O tório na forma de ligas metálicas ou de compostos cerâmicos, tem sido utilizado como material fértil para potencializar ciclos combustíveis de urânio. O ciclo de combustível de urânio-plutônio teve um bom desenvolvimento e está bem estabelecido. No entanto, o desenvolvimento da tecnologia do ciclo de combustível de tório e urânio tem encontrado inúmeros problemas em decorrência da presença de ^{232}U e ^{228}Th (produtos do decaimento radioativo natural do tório no elemento combustível), que contaminam o ^{233}U (BENJAMIN, 1983).

Na década dos anos 60, houve interesse de muitos países pelo uso do tório em reatores, justificado pelo fato de que o ^{233}U (produzido pela captura de nêutrons no tório) é um combustível melhor que o ^{239}Pu (produzido por captura de nêutrons no ^{238}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) (IAEA, 1966).

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 ^{233}U produzido com tório fértil proporciona um aumento da vida do combustível, contudo aumenta muito a intensidade da radiação nas instalações de reprocessamento por causa dos decaimentos radioativos dos produtos de fissão. O manuseio dos combustíveis gastos e a refabricação de novos elementos combustíveis, em plantas de reprocessamento, sob tal intensidade

de radiação, exige manipulação remota e blindagens pesadas (BENJAMIN, 1983).

O tório ocupou um lugar de vanguarda nos anos 1970 como combustível nuclear em reatores “breeders” ou regeneradores. Devido à sua propriedade fértil de poder ser transformado em ^{233}U a partir de uma reação de captura neutrônica e desintegração beta (FREITAS, 2008).

$$_{90}Th^{232} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{90}Th^{233} \xrightarrow{-\beta} {}_{91}Pa^{233} \xrightarrow{-\beta} {}_{92}U^{233}$$

Esta característica permite um aproveitamento mais racional dos combustíveis nucleares, proporcionando uma redução nos custos da energia produzida, aumentando a vida útil das reservas nucleares de urânio no país (FREITAS, 2008).

Vários trabalhos realizados no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), para a recuperação e purificação do tório partindo-se do sulfato de tório cristalizado, hidróxido de tório bruto, nitrato de tório e outros concentrados, mostraram a viabilidade no preparo de tório com elevada pureza na forma de peróxido de tório (FREITAS, 2008).

Reatores de tório tem uma vantagem adicional na medida em que alguns dos avançados conversores de tório tem a possibilidade de criar ^{233}U em quantidade suficiente para alcançar um sistema de reciclagem autossustentável por meio do suprimento dos isótopos físseis suficientes para se atingir o necessário grau de enriquecimento do novo combustível. O estabelecimento do uso da energia do tório deu-se em diferentes países, que consideram a importância dos combustíveis nucleares, em pequenas proporções, com a utilização de fontes de material físsil locais (ALLEN, 1968).

Conforme Allen (1968), as propriedades neutrônicas favoráveis do ^{233}U não somente têm potencial para reduzir o custo do ciclo combustível, bem como para conduzir à menor utilização das reservas de urânio que são necessárias para sustentar o atual sistema de energia nuclear, baseado quase que exclusivamente nesse elemento para as reações nucleares. Assim, a introdução do tório na produção de energia nuclear pode atrasar o aumento dos seus preços (que devem ocorrer com o esgotamento das reservas de urânio) ou pelo menos estimular o desenvolvimento comercial e competitivo dos reatores regeneradores.

Nos anos 60 e 70, as publicações de estudos feitas sobre energia nuclear previam que em longo prazo os regeneradores térmicos com o uso de tório, também fossem alternativas atrativas para linha de desenvolvimento de regeneradores rápidos, em decorrência da pequena quantidade de elementos físseis disponíveis e das grandes demandas de eletricidade consideradas. Segundo a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 1966), o uso de tório para esse propósito traria sustentabilidade em regeneradores industriais e diminuiria a quantidade necessária de urânio. De acordo com a IAEA, o preço do combustível gerado por tório tem menores custos de investimentos quando comparados a outros combustíveis. Além disso, o uso de energia nuclear com o emprego do ciclo de combustível do tório é capaz de gerar menos radioatividade no meio ambiente que a queima de grandes quantidades de carvão em termoelétricas (o carvão tem uma pequena quantidade de materiais radioativos) e não libera gases de efeito estufa para a atmosfera (BLAKE, 2009).

Em 2010, o Laboratório Nuclear do Reino Unido qualificou a tecnologia do tório como inovadora, embora tecnicamente imatura. Segundo essa Instituição, o uso desta técnica para fins de serviços públicos representa investimento financeiro significativo e de risco sem benefícios notáveis (WNA, 2013).

Entre as dificuldades de adoção do uso de tório como combustível para a produção de energia nuclear está a necessidade de realizar diversas análises, ensaios e licenciamento a serem desenvolvidos por pessoas que tenham qualificação adequada. Executar essas atividades gera um alto custo condicionado ao apoio e investimentos financeiros do governo. Além disso, o custo de fabricação do elemento combustível à base de tório é atualmente mais caro comparado ao combustível com urânio (o reprocessamento do plutônio também gera custos elevados) (WNA, 2013). Por outro lado, o urânio é atualmente um elemento disponível em abundância, o seu uso é mais difundido, e a sua tecnologia mais conhecida.

No entanto, o ciclo do combustível de tório oferece benefícios em termos de segurança energética a longo prazo devido ao seu potencial para se tornar um combustível auto-sustentável sem a necessidade de reatores de nêutrons rápidos (WNA, 2013). Diante dessas características, alguns países como a China e Índia tem investido no desenvolvimento e pesquisas com a finalidade de viabilizar o uso do tório.

A Academia Nacional de Ciências da China tem investido em contratações de pesquisadores de alto nível para desenvolverem projetos com o tório no Instituto de Física Aplicada e Nuclear de Xangai. O objetivo destes trabalhos é desenvolver tecnologia e reatores movidos a tório que substituam

os reatores de água pressurizada alimentados por urânio, originalmente concebidos para submarinos dos Estados Unidos na década de 1950.

Atualmente, a Índia ganhou destaque e liderança na área de tecnologia nuclear em função de sua experiência em reatores rápidos e ciclo de combustível de tório (BLAKE, 2009). Além disso, neste país há instituições de pesquisas como o Centro de Pesquisa Atômica Indira Gandhi que contribui com a elaboração de diversos trabalhos voltados a tecnologia nuclear, radioproteção e efeitos biológicos das radiações.

A Índia tem como um de seus desafios satisfazer a crescente demanda energética em função de sua enorme população. Entre os anos 1990 e 2011 a demanda de energia mais que dobrou. Diante disso, a Índia criou um programa de energia nuclear no qual se espera ter capacidade energética de 14 600 MWe até o ano 2020 e fornecer energia nuclear correspondente a 25% da eletricidade até o ano 2050 (WNA, 2013).

Dentre as vantagens de programas como esse, destaca-se a diminuição de resíduos tóxicos (devido ao ciclo do tório) e o aumento da segurança (pelo desenvolvimento de reatores mais modernos e seguros).

O único isópoto físsil presente na natureza é o ^{235}U e sua disponibilidade em reserva natural é limitada. Por essas razões, justifica-se o uso do tório em usinas nucleares de energia e sua expansão nos ciclos de combustíveis. Porém, ainda não se encontra sedimentada a prática do uso do ^{232}Th e ^{233}U em usinas nucleares (COLLIER, 2001).

CONCLUSÃO

Acredita-se que o tório, por sua abundância, será elemento de grande interesse quando as reservas de urânio estiverem esgotadas, além de apresentar economia de energia em sua produção e em sua geração.

Há extensas reservas de tório em muitos países, que são suficientes para suprimir em larga escala a demanda de produção de energia nuclear por muitos séculos. Por causa dessas muitas vantagens, o desenvolvimento da tecnologia do tório em reatores regeneradores térmicos se apresenta competitivo para o uso em energia nuclear (IAEA, 1966). Além disso, o uso do tório implica em uma menor quantidade de rejeitos radioativos em seu processo de conversão em energia nuclear.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, M. M. **Determinação de isótopos de urânio e tório em amostras de liquens Canoparmerlia texana** [dissertação]. São Paulo: Universidade de São Paulo (USP); 2008. (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Aplicações).

ALLEN G.GRAY**. Fabrication of Thorium Fuel Elements. American Society for Metals. United States Atomic Energy Commission**. Monograph Series on Mettalurgy In Technology. Washington D.C. 1968. 208p

BENJAMIN, M. MA. **Nuclear Reactor Materials and Applications. Library of Congress in Publication Data**. United States of American. 1983. 250-279p.

BHATTI, I. A.; HAVAT, M. A., IGBAL, M. **Assessment of thorium in the environment (A Review)**. Journal of the Chemical Society of Pakistan. Journal Article. Vol. 34. Issue 4. 2012. 1012 – 1022p.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Portal do Pequeno Produtor Mineral (PORMIN). **Beneficiamento de Minérios**. Disponível em: http://www.pormin.gov.br/biblioteca/arquivo/beneficiamento_de_minerio.pdf. Acesso em: 16.07.2013

BLAKE, M. A **Priori - When Nuclear turns 100**. Nuclear News – A Publication of the American Nuclear Society. July, 2009. 129p.

COLLIER, D.E.; BROWN, S. A.; BLAGOJEVIC, N.; SOLDENHOFF, K.H.; RING, R.J.Thorium in mineral products. **Radiation Protection Dosimetry**. Journal Article. Vol. 97. Issue 2. 2001. 177 -180p.

FLORÊNCIO, W. **Minerais de Urânio e Tório**. Instituto de Tecnologia Industrial. Secção de Mecanografia e Desenho. Departamento de Economia – Secretaria da Agricultura. Belo Horizonte. 1952. P. 137p

FREITAS, A. A**. Recuperação de tório e terras raras via peróxido do resíduo originado na unidade de purificação de tório** [dissertação]. São Paulo: Universidade de São Paulo (USP); 2008. (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Materiais).

IAEA (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY). **Utilization of Thorium in Power Reactors**. The Agency. Vienna, Austria. 1966. 376p.

RAMOS, G. F. **Determinação de isótopos de urânio e tório e polônio em perfis de sedimentos da Baixada Santista, SP** [dissertação]. São Paulo: Universidade de São Paulo (USP); 2010. (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Aplicações).

WORLD NUCLEAR ASSOCIATED (WNA). **Thorium**. Disponível em: http://www.world-nuclear.org/info/Current-and-Future-Generation/Thorium/. Nov, 2013. Acesso em 09.11.2013