



## **ETAPAS E CUSTOS ASSOCIADOS A PRODUÇÃO DE FERRO-NIÓBIO E CONCENTRADO DE URÂNIO A PARTIR DE MINÉRIOS COM OCORRÊNCIA NATURAL DE RADIONUCLÍDEOS**

**Vanderlei V. Moura<sup>1</sup>, Fidéllis Bitencourt<sup>1</sup>, Raoni Jonusan<sup>1</sup>, Carlos E.  
Velasquez<sup>1</sup>, Talita Oliveira Santos<sup>2</sup>, Antonella L. Costa<sup>1</sup>, Claúbia Pereira<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Nuclear - Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antônio Carlos, 6627, campus UFMG, CEP 31.270-901, Belo Horizonte, MG Tel/fax: 55-31-34096662

<sup>2</sup> Departamento de Anatomia e Imagem - Faculdade de Medicina  
Universidade do Federal de Minas Gerais

Av. Prof. Alfredo Balena, 190 - Santa Efigênia, Belo Horizonte - MG, Brazil, 30130-100  
fidellis01@gmail.com, vandermoura@gmail.com, rjonusan@gmail.com,  
carlosvelcab@nuclear.ufmg.br, talitaolsantos@yahoo.com.br, claubia@nuclear.ufmg.br

**Palavras-Chave:** urânio; lixiviação; flotação

### **RESUMO**

Os diversos tipos de mineração e beneficiamento mineral apresentam fases em comum: seleção de áreas, prospecção, avaliação de jazidas, montagem, comissionamento, desmonte de mina, britagem e moagem. As etapas subsequentes dependem do mineral de interesse. No caso do urânio é necessário processamento químico (lixiviação e extração por solvente) e físico (filtração, secagem). No caso da columbita, mineral NORM (*naturally occurring radioactive materials*) que é insumo para a produção de nióbio, seguem etapas de processamento físico, químico (flotação) e metalúrgico. O resíduo desta etapa é uma escória (um TENORM - *technologically enhanced naturally occurring radioactive material*) que possui teores de  $U_3O_8$  de 1,78 % - valor superior ao de Caetité-BA e Santa Quitéria-CE. Este material poderia ser processado para a recuperação do urânio e os custos envolvidos – caso exista massa de alimentação para as plantas – estariam na mesma ordem de grandeza das mineradoras do ciclo do combustível nuclear. Caso as indústrias NORM/TENORM optem por não processar a escória cabe uma tomada de decisão: construir depósitos de material radioativo ou transferir para a CNEN mediante pagamento de uma taxa. Assim, este artigo tem como objetivo apresentar os custos relativos à implantação de uma mina do ciclo do combustível e os custos dos principais insumos; e verificar se o tratamento da escória para a recuperação de urânio é vantajoso em relação a construção de depósitos ou a transferência do TENORM para a CNEN. O custo com insumos foi estimado na faixa entre 2,2 milhões e 3,6 milhões de dólares; já a transferência para a CNEN em 71,4 milhões de reais (12,7 milhões de dólares).

### **1. INTRODUÇÃO**

É comum a mineralização do urânio juntamente com outros elementos de interesse tais como terras-raras, estanho, nióbio, tântalo, cobre, ouro, carvão, fósforo dentre outros. Este tipo de mineral é denominado *naturally occurring radioactive materials* (NORM) [1, p. 73]. Já os produtos, subprodutos e resíduos provenientes do processamento do mineral são denominados de *technologically enhanced naturally occurring radioactive material* (TENORM) [2, p. 3].



No Brasil a exploração do NORM/TENORM pode ser realizada pelas mineradoras e usinas não ligadas ao ciclo do combustível nuclear (indústrias não nucleares ou indústrias NORM/TENORM). No entanto, o urânio é patrimônio da União [3, p. Art. 1º]. Assim, além dos concentrados, as indústrias não nucleares ficam com subprodutos, resíduos ou rejeitos com teores variáveis de óxido de urânio ( $U_3O_8$ ) que precisam ser armazenados [1, p. 165]. Uma solução para sua exploração é a criação de parcerias público-privadas entre as instalações e as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) – detentora do monopólio dos minerais nucleares. Um exemplo é o Consórcio Santa Quitéria celebrado entre a INB e uma produtora de fertilizante. Uma vai explorar o fósforo e a outra o urânio [4].

Este tipo de parceria pode ser ampliado em direção a outras indústrias não nucleares. Um exemplo são as mineradoras, usinas e metalurgias que exploram a columbita e o pirocloro. Estes minerais têm teores de nióbio, foco da exploração, mas também de urânio que fica concentrado na escória dos fornos – resíduo da produção [1, p. 105]. Atualmente, para o atendimento às exigências legais, este TENORM é armazenado em depósitos [5, p. 10, 6, p. 4]. Assim, ele poderia ser tratado, de modo a diminuir as exigências em relação ao armazenamento e, caso seja viável técnica e economicamente, constituir um complemento ao ciclo do combustível nuclear.

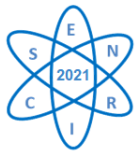
Deste modo, para justificar o tratamento do resíduo radioativo, são apresentados neste artigo as etapas de abertura de uma mina e de beneficiamento mineral para a obtenção de urânio e os custos relacionados comparando uma mineradora do ciclo combustível nuclear e uma indústria NORM/TENORM. Como exemplo desta última, é tomada a produção de ferro-ligas de nióbio que tem como insumo a columbita e como resíduo principal uma escória com concentração na ordem de 1,78% de  $U_3O_8$  [7].

## 2. MINERAÇÃO E BENEFICIAMENTO DE URÂNIO E DO NORM/TENORM

Antes da mineração e do beneficiamento mineral, é necessário investigar e caracterizar áreas potenciais para o estabelecimento de uma mina e plantas concentradoras. Apenas após estas fases é que se inicia o comissionamento e, posteriormente, a exploração e a produção propriamente dita [8, pp. 22-3].

A seleção de área ou análise regional é a fase inicial da investigação. Ela tem como objetivo elencar regiões candidatas aos diversos tipos de exploração mineral. É de importância fundamental, pois permite a redução de custos de logística no futuro, por exemplo. Envolve essencialmente trabalhos e levantamentos geológicos utilizando análises geoespaciais, aerofotografias, aeroespectrometria, coleta de amostras no solo e, no caso tanto do urânio quanto do NORM, levantamentos radiométricos (aéreos e no campo). Inicia-se com regiões extensas, na ordem de 100.000 km<sup>2</sup> [8, p. 22, 9, p. 17].

A fase seguinte de investigação é a prospecção que tem como objetivo refinar a seleção de áreas restringindo os locais de interesse e detectando anomalias minerais. Utiliza técnicas de amostragem e análise semelhantes a anterior, mas numa escala mais detalhada, e os refinamentos dados pelas sondagens. Assim, efetua-se a coleta de amostras



em áreas cada vez menores eliminando, ao fim do estudo, de 80% a 90% dos locais da fase de análise regional [9, p. 18].

Na sequência tem-se a fase de avaliação de jazidas onde seleciona-se, dentro da anomalia detectada na fase de prospecção, os depósitos minerais que são viáveis economicamente. Envolve a prospecção do solo, subsolo, rocha e seu detalhamento geoquímico; a elaboração programa de desenvolvimento da exploração; definição do tipo de mina a ser estabelecida; tecnologia de extração e de beneficiamento; e a avaliação do custo-benefício [9, p. 19].

Finalmente, segue a fase de montagem da planta de exploração; das plantas de beneficiamento, de armazenamento e tratamento de resíduos; engenharia, tecnologia e instrumentação necessárias ao funcionamento; infraestrutura interna; cronograma de desenvolvimento e produção; comissionamento. Juntamente a esta última tem-se o licenciamento da exploração que visa, principalmente, a mitigação de potenciais impactos ocupacionais e ambientais: a avaliação das condições iniciais da região através de estudos geológicos, hidrológicos, meteorológicos, arqueológicos, socioeconômicos, de fauna, flora; a previsão e planos de tratamento de resíduos/rejeitos; a previsão de descomissionamento das estruturas, plantas e do empreendimento; o plano de fechamento de mina; os planos de emergência e de proteção física; o plano de proteção ocupacional; o plano de monitoramento ambiental [9, pp. 43-44, 10].

Após a montagem da planta segue o comissionamento que marca o início da produção. Mas ainda existem etapas operacionais comuns às diversas mineradoras: o desmonte, a britagem e moagem da rocha. Apenas após este processamento inicial é que se observam diferenças no beneficiamento [11].

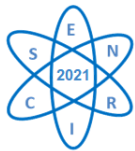
### 2.1. Desmonte, britagem e moagem

Após o comissionamento da mina inicia-se a exploração mineral. A primeira etapa é o desmonte que, em geral, é realizado por escavação direta utilizando perfuratrizes e/ou por implosão. Envolve custos elevados em virtude dos insumos e equipamentos necessários [12, p. 3].

Os resíduos do desmonte são os estéreis – material removidos da mina e que por não apresentarem teores viáveis economicamente não são encaminhados às etapas de beneficiamento [13, p. 106]. Em geral, não tem limitações operacionais ou ambientais e podem ser devolvidos a cava após o encerramento da mina.

Após o desmonte segue a etapa de cominuição que consiste na redução das dimensões da rocha e contempla a britagem, a moagem, o peneiramento e, muitas vezes, um circuito de pré-concentração gravimétrica, ou seja, separação com base na massa e/ou densidade do mineral. A dimensão final desejada está ligada ao tipo de processamento posterior, ao tipo de mineral que se deseja beneficiar e ao seu teor [12, pp. 113-14].

Os resíduos desta etapa apresentam grandes volumes e são encaminhados para bacias de sedimentação que ocupam grandes áreas nas mineradoras. Este material já apresenta restrições a devolução ao meio ambiente sendo regulados pela Agência Nacional de



Mineração (ANM) [14] e, quando se trata de material radioativo, também pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) [15].

## 2.2. Mineração e beneficiamento de urânio

Em geral os teores de óxidos de urânio na rocha são relativamente baixos, por exemplo na mina de Lagoa Real na Bahia é de 0,3 %; já em Santa Quitéria no Ceará é de 0,1 % [16, p. 74]. Mas existem minas no Canadá e Austrália que chegam a ultrapassar 20 % de  $U_3O_8$  [17, p. 24]. Em todos estes casos, o mineral passa, após a cominuição, por etapas de concentração (classificação) magnética, peneiramento e novamente a gravimétrica [17, p. 26].

Na sequência, tem-se uma fase química muito utilizada para minerais de baixo teor: a lixiviação. Ela consiste na remoção de uma fração solúvel de um material sólido por meio de um solvente que pode ser um ácido ou uma base [18, p. 459]. No caso do urânio, o mais comum é o uso do ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) associado um agente oxidante [19, p. 305]. Assim, a rocha moída é colocada em pilhas ou em tanques sendo adicionado o  $H_2SO_4$ . O licor de urânio, fase aquosa da lixiviação, é coletado, filtrado e purificado [17, p. 31].

Posteriormente, inicia-se a fase de extração por solvente (extração líquido-líquido), onde é inserido um solvente insolúvel no licor que dissolverá preferencialmente os compostos de urânio promovendo sua separação do restante da lixívia [19, pp. 159-160].

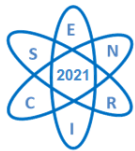
Finalmente, têm-se etapas de concentração, purificação e precipitação. Nesta última ocorre a formação de compostos sólidos de urânio que, após nova purificação e secagem, torna-se o concentrado de urânio – *yellow cake* [8, p. 36, 17, p. 30].

As etapas listadas acima referem-se à mineração *open pit*, ou seja, com a formação de pilhas para a lixiviação. Existe outro tipo: a lixiviação *in situ* (*in situ leach* – ISL), onde o agente lixiviante é inserido diretamente no subsolo sendo o licor de urânio retirado posteriormente por bombeamento [20].

Os resíduos da etapa química da mineração de urânio precisam ser tratados e armazenados por apresentarem em sua composição produtos de decaimento do U-238, tais como o rádio-226 e o chumbo-210. Assim, é necessário a construção de depósitos ou de repositórios [5, p. 10, 6, p. 4].

## 2.3. Mineração e beneficiamento do NORM/TENORM – caso da columbita

O beneficiamento da columbita inicia-se com o desmonte, britagem e moagem da rocha, conforme tratado em 2.1. A próxima etapa é a concentração gravimétrica: o minério moído passa por peneiras, posteriormente por espirais separadoras, filtragem e secagem. O concentrado segue para uma etapa de flotação e o resíduo para bacias de sedimentação. [21, p. 86].



A flotação consiste na separação de minerais presentes numa polpa. Para tanto são inseridas bolhas de ar na mistura e ocorre adesão de alguns materiais [12, p. 411]. Assim, a parte de interesse é encaminhada para filtragem, secagem, separação elétrica e magnética onde é obtida a columbita [22, p. 576]. O resíduo também é encaminhado para bacias de sedimentação.

A etapa seguinte é a metalurgia. Assim, a columbita junta-se a insumos, tais como barita, carvão, alumínio e ferro, é inserida em fornos de redução e aluminotermia. Este beneficiamento resulta nos produtos de interesse que são as ferro-ligas de nióbio e num resíduo que é a escória. Esta última possui teores de óxido de urânio variáveis – que dependem dos teores da rocha, do tipo de processamento realizado além de outros fatores [22, p. 576].

No caso da escória tomada como estudo de caso, o teor medido foi de 1,78% de  $U_3O_8$  [7] e existia, em 2017, 50.000 toneladas estocadas num depósito inicial na empresa [23].

#### 2.4. Beneficiamento da escória

O tratamento da escória inicia-se com sua cominuição, ou seja, britagem, moagem e peneiramento. Aqui deve-se ressaltar que os equipamentos não são do porte aos necessários ao fracionamento da rocha uma vez que as dimensões da escória são inferiores [7].

Após a cominuição seguem etapas químicas semelhantes às necessárias a produção de *yellow cake*: lixiviação, extração por solvente, concentração, purificação, precipitação e secagem [8, p. 36, 19, pp. 159-160, 17, p. 30, 7].

Os resíduos gerados também serão semelhantes aos da mineração e beneficiamento de urânio, deste modo, são necessários depósitos ou mesmo repositórios para seu armazenamento [5, p. 10, 6, p. 4].

### 3. CUSTOS DA PRODUÇÃO DE URÂNIO

#### 3.1. Custos relativos de mineração e beneficiamento de urânio – mina *open pit*

Os custos ligados às fases anteriores ao comissionamento são semelhantes aos dos diversos tipos de mineradora e estão ligados às quantidades de análises necessárias. Assim, por exemplo, na fase de análise regional, o custo fica em torno de 1 a 2 dólares por quilômetro quadrado; na fase de prospecção de 15 a 50 dólares por quilômetro quadrado; e, na avaliação de jazidas, 75 a 200 dólares por quilômetro quadrado [9, pp. 17-18].

Já nas fases de produção os custos absolutos variam muito em relação ao tipo, teor, cotação e preço do minério; tipo de mina (subterrânea, terrestre, mina *open pit*, ISL); disponibilidade energética; logística; dificuldades operacionais; dentre outras [24]. Entretanto, é possível fazer uma estimativa com custos relativos, conforme a Fig. 1 – considerado para uma mina *open pit* [9, pp. 79-80].

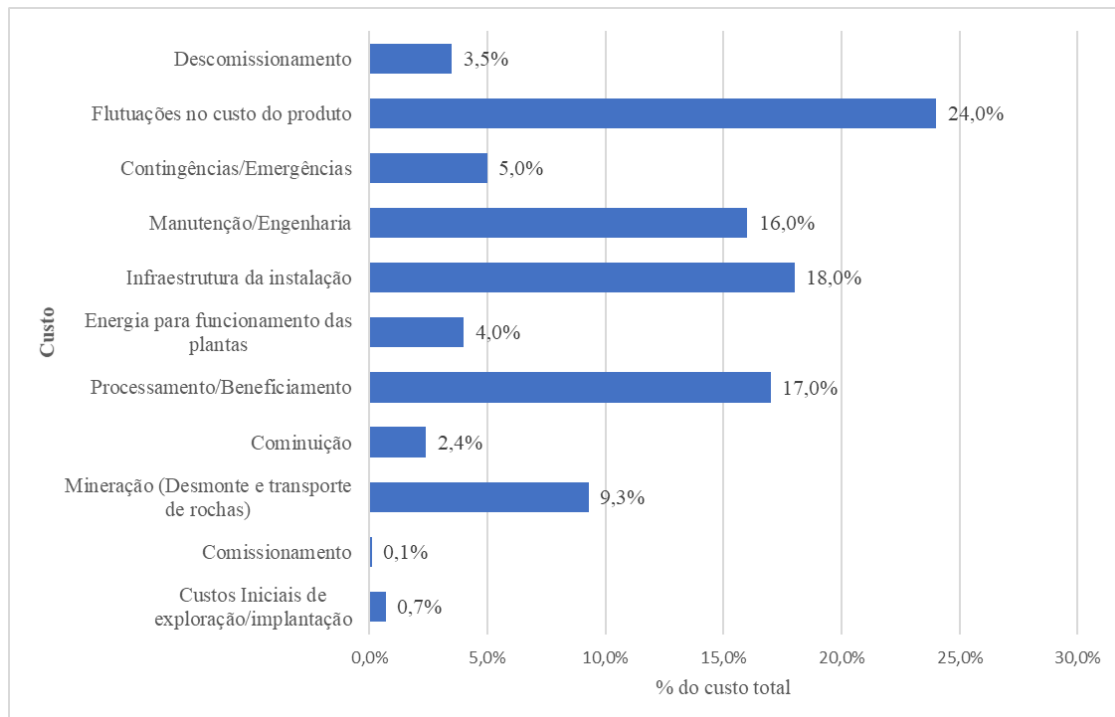


Fig. 1. Estimativa de custos para processamento de urânio (mina *open pit*).

### 3.2. Considerações sobre os custos de produção de urânio a partir da escória

Na produção de concentrado de urânio a partir da escória cabem algumas observações em relação às etapas descritas na Fig. 1:

i) Custos Iniciais de Exploração/Implantação. Estes custos não recairão sobre a escória uma vez que estão relacionados a fase anterior ao comissionamento, tais como a pesquisa mineral para a descoberta e avaliação da jazida. Assim, já foram realizados para a mineração de columbita/tantalita antes da geração da escória.

ii) Mineração (Desmonte e transporte de rochas). Trata-se de um custo que não será necessário ao processamento uma vez que a escória pode ser direcionada diretamente aos britadores e moinhos.

iii) Comissionamento, Processamento/Beneficiamento, Manutenção/Engenharia, Infraestrutura da Instalação e Contingência/Emergência. Supõe-se que sejam custos de mesma dimensão uma vez que os equipamentos e processos para processamento da escória são semelhantes ao da rocha.

iv) Energia para funcionamento das plantas. O custo relativo ao uso da energia depende da disponibilidade do sistema nacional de distribuição. Mas pode-se supor que sejam da mesma dimensão do necessário ao processamento da rocha.



v) Flutuações no custo do produto. Como depende do mercado este custo tem mesma grandeza nas duas opções.

vi) Descomissionamento. Precisa levar em consideração todas as fases do estudo de local até desmonte das plantas e a recuperação ambiental. Pode-se supor que seja da mesma dimensão do necessário ao processamento da rocha.

vii) Grandes variações na quantidade de escória. Este é um fator que pode impactar negativamente no custo de produção, pois o foco das indústrias NORM/TENORM não é a produção de escória, mas sim de ferro-ligas de nióbio – assim a quantidade de escória é inferior a quantidade de rocha disponível ao processamento. Apesar disso, existem instalações em Minas Gerais, Goiás, Amazonas e Rondônia com material, em tese, disponível [25, p. 6].

### 3.3. Custos absolutos relacionados ao uso de insumos

Em relação ao uso de insumos, custo significativo para a fase de Processamento/Beneficiamento (vide Fig. 1), segundo [9, p. 135], para produzir 159 toneladas de *yellow cake*, a partir de 60.000 toneladas de rocha e com teor de 0,3% de  $U_3O_8$  são necessários os materiais listados na Tab. 1.

Tab. 1. Estimativa de insumos para a produção de 159 toneladas de *yellow cake* a partir de 60.000 toneladas de rocha com teor de 0,3 % de  $U_3O_8$ .

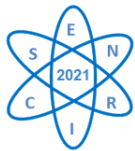
| Insumo                         | Consumo (t.mês <sup>-1</sup> ) | Insumo                               | Consumo (t.mês <sup>-1</sup> ) |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Ácido sulfúrico                | 3.000 - 5.000                  | Solventes                            | 2 - 3                          |
| Cal (neutralização da lixívia) | 2.000 - 3.000                  | Querosene                            | 20 - 40                        |
| Floculantes                    | 20 - 30                        | Cloreto de bário (precipitação do U) | 1,0                            |
| Amônia                         | 40 - 70                        | Bolas de moinho                      | 50 - 90                        |

Na Tab. 2 seguem o preço dos insumos e o custo mensal de cada um, de acordo com a Tab. 1.

No caso da escória, espera-se que os custos relativos aos insumos sejam da mesma dimensão dos apresentados na Tab. 2. Entretanto, a quantidade de *yellow cake* a ser produzida pode ser maior, uma vez que o teor de  $U_3O_8$  na escória é cerca de 6 vezes maior do que o da rocha apresentada nas considerações da Tab. 1.

Tab. 2. Custo mensal dos insumos da Tab. 1.

| Insumo          | Preço (USD.t <sup>-1</sup> ) | Fonte | Custo mínimo (USD.mês <sup>-1</sup> ) | Custo máximo (USD.mês <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|------------------------------|-------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Ácido sulfúrico | 190 - 240                    | [26]  | 570.000,00                            | 1.200.000,00                          |
| Cal             | 399 - 699                    | [27]  | 31.920,00                             | 2.097.000,00                          |
| Floculantes     | 1200 - 2900                  | [28]  | 1.440.000,00                          | 87.000,00                             |
| Amônia          | 45 -90                       | [29]  | 5.062,50                              | 15.750,00                             |



|                   |             |      |              |              |
|-------------------|-------------|------|--------------|--------------|
| Solventes         | 5000 - 7000 | [30] | 10.000,00    | 21.000,00    |
| Querosene         | 591,3*      | [31] | 11.826,00    | 23.652,00    |
| Cloreto de bário  | 165**       | [32] | 165.000,00   | 165.000,00   |
| Bolas de moinho   | 550         | [33] | 27.500,00    | 49.500,00    |
| Total dos insumos |             |      | 2.261.308,50 | 3.658.902,00 |

\*Preço unitário de USD 0,73.L<sup>-1</sup> convertido a partir da densidade 0,8 g.cm<sup>-3</sup> [34]. \*\* Preço unitário de USD 165,00.kg<sup>-1</sup>

#### 4. COMENTÁRIOS E OBSERVAÇÕES

Em relação a receita,  $R$ , que seria gerada pela venda do *yellow cake*, considerando a cotação atual,  $C$ , do  $U_3O_8$  em USD 64,71 por quilograma<sup>1</sup> e a massa gerada,  $m$ , de 159 toneladas por mês [9, p. 135]:

$$R = C.m = 64,71 \times 159 \times 1000 = \text{USD } 10.288.890,00 \quad \text{Eq. 1}$$

O valor acima é uma estimativa, pois a molécula de *yellow cake*<sup>2</sup> tem 60,4% de urânio e difere da molécula de óxido de urânio<sup>3</sup> – forma pela qual ele é comercializado [35]. Mas é uma boa aproximação.

Comparando o valor acima com o custo, mesmo o máximo, pode-se imaginar, num primeiro momento, que seria “lucro certo”. No entanto, deve-se levar em conta que os valores apresentados na Tab. 2 contemplam apenas o custo mensal com insumos. Assim, para uma estimativa mais real, devem ser levados ainda em consideração outros custos, tais como os relativos à mão de obra e ao frete, por exemplo.

O mesmo raciocínio pode ser realizado para a escória: receita e custo semelhantes – desde que exista massa suficiente para alimentar mensalmente. Entretanto, aqui existe um dado a mais a ser levado em consideração, que é o custo de não tratar a escória. Para isto existem duas opções para a indústria NORM/TENORM: construir depósitos ou transferir o TENORM.

No primeiro caso, construir repositórios, o custo envolvido é altíssimo. O projeto para construção do Repositório Nacional de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação<sup>4</sup>, por exemplo, foi estimado em R\$ 120 milhões ou USD 21,4 milhões [36, 37].

A segunda opção, transferir o TENORM para a CNEN, implica no pagamento de uma taxa de R\$ 5.000,00 por metro cúbico de rejeito depositado [38, p. 6]. Assim, para uma massa,  $m$ , de 50.000 toneladas de escória [7] e uma densidade,  $d$ , de 3.500 kg.m<sup>-3</sup> [23], o custo de armazenamento,  $CA$ , será de

<sup>1</sup> USD 29,35 por libra [35].

<sup>2</sup>  $UO_2(NO_3)_2$

<sup>3</sup>  $U_3O_8$  que possui 84,8 % de urânio.

<sup>4</sup> O NORM/TENORM é classificado como rejeito radioativo de baixo e médio níveis de radiação [41, pp. 1-2]



$$CA = 5.000 \times \frac{m}{d} = 5.000 \times \frac{50.000 \times 1000}{3.500} = R\$ 71.428.571,43 \quad \text{Eq. 2}$$

Ou seja, USD 12.753.280,14 [36]. Este valor vai aumentando ano a ano, pois a produção de escória como rejeito acompanha a produção de ferro-ligas de nióbio. O que é outro problema para a opção de transferência do TENORM, devido a limitação de volume dos depósitos da CNEN.

## 5. CONCLUSÃO

É necessária a busca de alternativas aos rejeitos produzidos pelas indústrias NORM/TENORM uma vez que tanto a construção/licenciamento de depósitos quanto a transferência do material envolvem custos elevados e constituem passivos para as empresas administrarem.

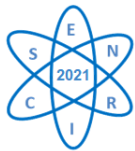
Deste modo, uma opção é o processamento, por exemplo, das escórias com teores economicamente viáveis de  $U_3O_8$  para a recuperação de urânio. Assim, pode-se gerar um resíduo com menores exigências de armazenamento e, talvez, até um complemento para o ciclo do combustível nuclear.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. REIS, NORM - Guia Prático, 1ª ed., R. G. d. Reis, Ed., Rio de Janeiro: CNPQ e IRD, 2016.
- [2] N. TSURIKOVA e J. KOPERSKIB, “Tenorm legislation — theory and practice,” em *IAEA-TECDOC-1271 - Technologically enhanced natural radiation (TENR II)*, Vienna, IAEA, 2002, pp. 3-9.
- [3] PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA - CASA CIVIL, LEI Nº 4.118, DE 27 DE AGOSTO DE 1962, Brasília: REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 1962.
- [4] INDUSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL, “INB Santa Quitéria – Consórcio Santa Quitéria,” INB, 2020. Online. Available: <http://www.inb.gov.br/A-INB/Onde-estamos/Santa-Quiteria>. Acesso em 03 08 2020.
- [5] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Norma CNEN NE 1.13 - Portaria CNEN DExI 03/89 - Licenciamento de Minas e Usinas de Beneficiamento de Minérios de Urânio e/ou Tório, Rio de Janeiro: CNEN, 1989.
- [6] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Resolução CNEN 168/14 Norma CNEN-NN 8.02 Licenciamento de Depósitos de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação, Rio de Janeiro: CNEN, 2014.
- [7] V. V. MOURA, T. O. SANTOS e C. PEREIRA, “Study of the physical properties of aluminothermic slags for the recovery of uranium and thorium,” *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, 2020.
- [8] COCHRAN, R. G, TSOULFANIDIS, N. e MILLER, W. F. , *The Nuclear Fuel Cycle : Analysis and Managemen*, 2ª ed., Chicago: American Nuclear Society, 1999.



- [9] INTERNATIONAL AGENCY OF ENERGY ATOMIC, IAEA-TECDOC-595 - Guidebook on the development of projects for uranium mining and ore processing, Viena: IAEA, 1991.
- [10] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR , Resolução CNEN 208/16 - Norma CNEN-NN 4.01 - Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Instalações Mínero-Industriais, Rio de Janeiro: CNEN, 2016.
- [11] INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL S. A., “INB - Indústrias Nucleares do Brasil - Mineração,” INB, Online. Available: <https://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear/Minerao>. Acesso em 01 11 2020.
- [12] M. A. C. GÓES, A. B. LUZ e M. V. POSSA, Tratamento de Minérios - Amostragem, 4ª ed., Rio de Janeiro: CETEM, 2004.
- [13] C. S. GOMIDE, T. P. COELHO, C. TROCATE, B. MILANEZ e L. J. M. WANDERLEY, Dicionário Crítico da Mineração, Marabá: Editorial iGuana, 2018.
- [14] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, “Legislação Barragens,” ANM, 04 02 2015. Online. Available: <http://antigo.anm.gov.br/portal/assuntos/barragens/legislacao-barragens>. Acesso em 02 12 2020.
- [15] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Resolução CNEN 07/80. Norma CNEN-NE 1.10 Segurança de Sistemas de Barragem de Rejeitos Contendo Radionuclídeos, Rio de Janeiro: CNEN, 1980.
- [16] DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNPM, Economia Mineral do Brasil, Brasília: Cidade Gráfica e Editora Ltda, 2009.
- [17] INTERNATIONAL AGENCY OF ENERGY ATOMIC, IAEA-TECDOC-1174 - Methods of exploitation of different types of uranium deposits, Vienna: IAEA, 2000.
- [18] C. K. GUPTA, Chemical Metallurgy, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.
- [19] M. BENEDICT, T. H. PIGFORD e H. W. LEVI, Nuclear Chemical Engineering, 2ª ed., D. D. Heiberg, Ed., Nova Iorque: McGraw-Hill Book Company, 1981.
- [20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA-TECDOC-1239 - Manual of acid in situ leach uranium mining technology, Vienna: IAEA, 2001.
- [21] M. A. P. RIO, Indústrias de Mineração Não Nucleares e o Aumento da Exposição à Radiação Natural, Tese (Doutorado em Ciências). Rio de Janeiro: UERJ, 1999.
- [22] V. MOURA e C. PEREIRA, “Mineradoras e Metalurgias NORM,” em *Anais da Quarta Semana de Engenharia Nuclear e Ciências das Radiações*, Belo Horizonte, 2018.
- [23] SAP - SYSTEMS, APPLICATIONS AND PRODUCTS IN DATA PROCESSING, SAP SE, Walldorf: SAP AG, 2017.
- [24] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, “Uranium Mining Overview,” World Nuclear Association, 2020. Online. Available: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/uranium-mining-overview.aspx>. Acesso em 01 12 2020.
- [25] AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, Anuário Mineral Brasileiro - Principais Substâncias Metálicas, Brasília: ANM, 2020.
- [26] [https://www.alibaba.com/product-detail/Sulfuric-Acid-Price-Sulfuric-Acid-Price\\_60111595175.html?spm=a2700.7735675.normal\\_offer.d\\_title.5bdc7503psQS8w&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Sulfuric-Acid-Price-Sulfuric-Acid-Price_60111595175.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_title.5bdc7503psQS8w&s=p). Acesso em 23 02 2021.
- [27] [https://www.alibaba.com/product-detail/Calcium-Oxide-Buy-Calcium-Oxide-Fcc\\_62184729985.html?spm=a2700.7735675.normal\\_offer.d\\_title.52d62fae9TqXf6&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Calcium-Oxide-Buy-Calcium-Oxide-Fcc_62184729985.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_title.52d62fae9TqXf6&s=p). Acesso em 23 02 2021.



- [28] <https://gyfengtai.en.made-in-china.com/product/ByHJPONbMvWT/China-Anionic-Polyacrylamide-Flocculant-Price.html>. Acesso em 23 02 2021.
- [29] <https://guidagas.en.made-in-china.com/product/pCFxThLofskM/China-Price-of-Anhydrous-Liquid-Ammonia-99-9-Nh3-Gas-Liquid-Ammonia.html>. Acesso em 23 02 2021.
- [30] [https://www.alibaba.com/product-detail/Alamine-Alamine-336-Or-N235-SDS\\_60433808333.html?spm=a2700.7735675.normal\\_offer.d\\_title.4a07726dumU6QZ&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Alamine-Alamine-336-Or-N235-SDS_60433808333.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_title.4a07726dumU6QZ&s=p). Acesso em 23 02 2021.
- [31] [https://www.globalpetrolprices.com/kerosene\\_prices/](https://www.globalpetrolprices.com/kerosene_prices/). Acesso em 2021 02 2021.
- [32] [https://www.chemicalbook.com/ProductList\\_En.aspx?kwd=Barium%20chloride&gclid=Cj0KCQiA7NKBBhDBARIsAHbXCB4MJ07h2B8DqoCqSMLVko2EE8GTGMxabGo5jaLqGyo66cBsmnn0S8AaAkprEALw\\_wcB&hp=true](https://www.chemicalbook.com/ProductList_En.aspx?kwd=Barium%20chloride&gclid=Cj0KCQiA7NKBBhDBARIsAHbXCB4MJ07h2B8DqoCqSMLVko2EE8GTGMxabGo5jaLqGyo66cBsmnn0S8AaAkprEALw_wcB&hp=true). Acesso em 23 02 2021.
- [33] <https://sygrindingball.en.made-in-china.com/product/AKqxMGdUabpf/China-Good-Wear-Rate-Forged-Steel-Grinding-Media-Ball-Price.html>. Acesso em 23 02 2021.
- [34] <http://www.inchem.org/documents/icsc/icsc/eics0663.htm>. Acesso em 23 02 2020.
- [35] <https://www.cameco.com/invest/markets/uranium-price>. Acesso em 23 02 2021.
- [36] BANCO CENTRAL DO BRASIL, “Gov.br,” Banco Central do Brasil, 2021. Online. Available: <https://www.bcb.gov.br/conversao>. Acesso em 04 03 2021.
- [37] R. M. GOUVEIA, “Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear,” CDTN, Online. Available: <https://www.cdtn.br/ultimas-noticias/121-newsletter/375-o-projeto-rbmn-e-a-sustentabilidade-do-setor-nuclear-nacional>. Acesso em 2021 03 04.
- [38] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, “Portaria CNEN número 1, de 07/01/1999,” em *Diário Oficial da União*, Brasília, CNEN, 1999.
- [39] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA-TECDOC-1271 - Technologically enhanced natural radiation (TENR II), Vienna: IAEA, 2002.
- [40] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Norma CNEN NE 6.06. Resolução CNEN 014/89. Janeiro / 1990. Seleção e Escolha de Locais para Depósitos de Rejeitos Radioativos, Rio de Janeiro: Diário Oficial da União, 1989.
- [41] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Resolução CNEN 167/14: Norma CNEN-NN 8.01 Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação, Rio de Janeiro: CNEN, 2014.
- [42] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, Resolução CNEN 012/02: Norma CNEN NN 6.09 Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação, Rio de Janeiro: CNEN, 2002.