

Avaliação do ciclo de vida da produção de elementos de terras raras em longo prazo através do uso de um modelo dinâmico

Life cycle assessment of the production of rare earth elements in the long term by the use of a dynamic model

Ligia Marcela Tarazona Alvarado

Bolsista Capacitação Institucional, Eng. Elétrica, M. Sc.

Francisco Mariano da Rocha de Souza Lima

Supervisor, Eng. Mineral, D. Sc.

Resumo

Os elementos terras raras (ETR) são recursos cruciais para o novo milênio por apresentarem características únicas a diversas aplicações tecnológicas. A crescente demanda por esses elementos vem associada à problemática das questões ambientais decorrentes da sua produção; por isso, estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) são necessários para se determinar os potenciais impactos gerados por essa produção. O objetivo deste trabalho é avaliar os impactos ambientais da produção de óxidos de terras raras (OTRs) a partir de um minério brasileiro utilizando a metodologia da ACV, baseada na norma ISO 14040 e uma projeção dinâmica para 10 anos. A modelagem e os cálculos do sistema em estudo foram estruturados a fim retratar as características da realidade brasileira, com a coleta de dados a partir de uma amostra de monazita do Brasil, proveniente dos resíduos do beneficiamento do nióbio. A metodologia de avaliação dos impactos utilizada foi a ReCiPe e o software utilizado para o tratamento dos dados foi o SimaPro 8.02. Os resultados mostraram o consumo significativo de H₂SO₄, HCl e NH₄OH afetam significativamente as categorias de impacto ambiental Mudanças Climáticas para a Saúde Humana, Mudanças Climáticas para os Ecossistemas e à Depleção de Combustíveis Fósseis para todos os cenários propostos.

Palavras chave: Avaliação do ciclo de vida; elementos de terras raras; sistemas dinâmicos minério brasileiro.

Abstract

Rare earth elements (REEs) are crucial resources for the new millennium because they present unique characteristics to multiple technological applications. The growing demand for these elements is associated with the problems of environmental issues arising from their production. Therefore, Life Cycle Assessment (LCA) studies are necessary to determine the potential impacts generated by this production. This work evaluates the environmental impacts of rare earth oxides (REOs) production from a Brazilian ore using the LCA methodology based on ISO 14040 and a dynamic projection for 10 years. The modeling and estimation of the system of this study were structured in order to portray the characteristics of the Brazilian reality. The data was obtained via a sample of Brazilian monazite from niobium beneficiation residues. The methodology of the evaluation of the impacts used was the ReCiPe and the software used for data processing was SimaPro 8.02. The results showed significant consumption of H₂SO₄, HCl and NH₄OH and their significantly affect on the environmental impact categories: Climate Change for Human Health, Climate Change for Ecosystems and Depletion of Fossil Fuels for all scenarios proposed.

Key words: Life cycle assessment; mining; rare earth elements; system dynamics; Brazilian ore.

1. Introdução

Os elementos de terras raras (ETRs) são definidos como 17 elementos da tabela periódica que estão presentes em minerais como a monazita, a bastnasita, o xenotímio e argilas iônicas (Koltun & Tharumarajah, 2014). Segundo Ortiz & Junior (2014), a demanda de ETRs vem se intensificando devido a suas propriedades físicas e químicas. Os ETRs estão incorporados em aplicações como supercondutores, ímãs de alto desempenho, catalisadores, entre muitas outras (Diamond, 2005). Por exemplo, a Petrobras depende de catalisadores para o refino de petróleo que são produzidos a partir de 900 toneladas de óxidos de lantânio (Villela, 2016).

Recentemente, no Brasil, os ETRs despertaram interesse governamental pela constatação da vulnerabilidade econômica na repentina elevação dos preços destes elementos frente ao mercado internacional. Segundo Souza & Serra (2014), há um grande potencial mineral brasileiro na extração de ETRs. Consequentemente, estes foram incluídos como mineral estratégico no Plano Nacional de Mineração-PNM 2030 (PNM, 2010) para o desenvolvimento do tecnológico-econômico do Brasil.

No entanto, Zaimes *et al.* (2015) evidenciou que a extração dos óxidos de terra raras (OTRs) ocasiona graves problemas e impactos. Tais como o esgotamento de recursos naturais, poluição da água, poluição do ar e a exposição a materiais radioativos; sendo assim, é fundamental destacar a importância de quantificar os impactos à saúde humana e ao meio ambiente de toda a produção desses elementos. Visando verificar os pontos críticos da mineração, aprimorando-os para obter a uma produção mais sustentável.

Os impactos ambientais causados por um produto ou processo, podem ser quantificados e avaliados corretamente através da metodologia dita, avaliação do ciclo de vida (ACV), que considera de forma integral o consumo de recursos e todos os tipos emissões para o ambiente ao longo de todos os estágios do ciclo de vida do objeto em estudo. Particularmente, fornece uma compreensão mais abrangente do perfil ambiental da produção brasileira desses elementos e inclui detalhes específicos para o Brasil através de uma avaliação completa da produção na indústria nacional num período de 10 anos.

2. Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo avaliar os impactos ambientais da produção de OTRs, a partir de um minério brasileiro utilizando ACV, baseada na norma ISO 14040 com um modelo de sistema dinâmico ao longo de um período de 10 anos. Desta forma, as características dinâmicas e não lineares serem avaliadas. Este trabalho visa gerar uma nova base de dados para produção de OTRs, bem com os impactos ambientais em todo o seu ciclo de vida.

3. Metodologia

3.1. Avaliação do ciclo de vida da produção de OTRs a partir da monazita brasileira

Definido o modelo, foi aplicada a metodologia da avaliação do ciclo de vida com base na ISO 14040 (2009). A metodologia da avaliação do ciclo de vida (ACV) inclui as seguintes etapas: 1) definição de objetivo e escopo; 2) análise do inventário do ciclo de vida; 3) avaliação dos resultados da ACV e seus impactos sobre diferentes parâmetros ambientais; 4) interpretação, (Vahidi et al., 2016).

O objetivo do estudo é avaliar o ciclo de vida da produção de OTRs a partir de um minério brasileiro, cuja unidade funcional definida de 1866,66 ton de óxidos de terras raras provenientes da fração leve e 466,67 ton de óxidos na forma de hidróxido 466,67 ton de óxidos na forma de hidróxido úmido das frações média e pesada para uma produção total de 2800 ton referente à taxa de recuperação definida.

A modelagem da produção de OTRs a partir da monazita brasileira, proveem do resíduo do beneficiamento do nióbio de Araxá/MG. Segundo Villela, 2016, após o processamento de nióbio, 70 mil toneladas de rejeitos são encaminhadas para as barragens. Os processos necessários para a obtenção dos OTRs e suas interações estão ilustrados na Figura 1. A construção do modelo foi feita visando à separação da fração leve e da fração dita média/pesada. A fração leve é composta por quatro elementos: Lantânio La, Cério Ce, Praseodímio Pr, Neodímio Nd. A recuperação da monazita começa a partir dos rejeitos do beneficiamento do nióbio, com uma taxa de recuperação 4%.

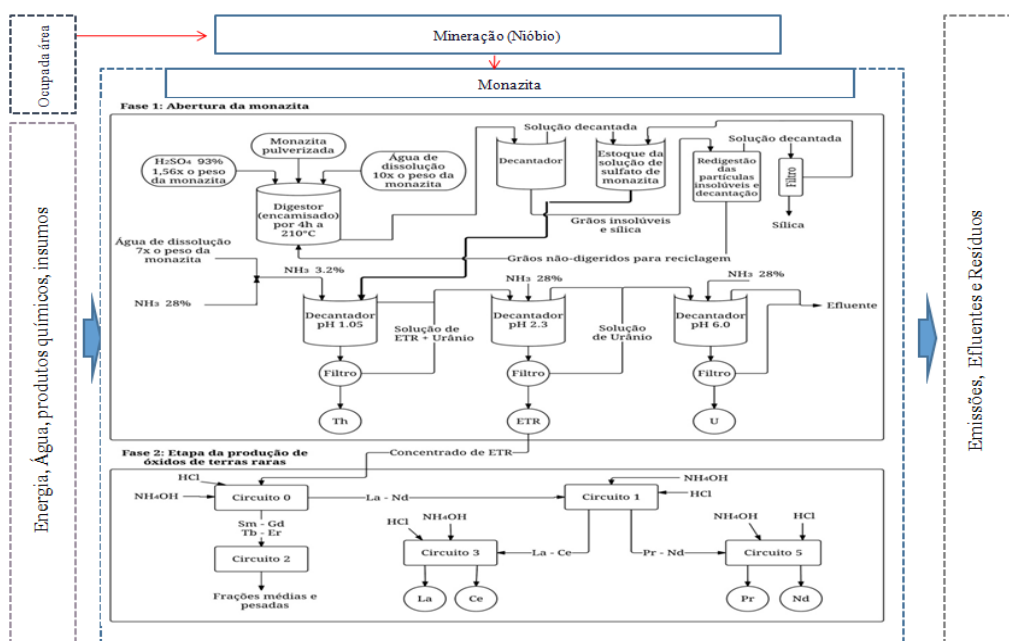


Figura 1. Modelagem do sistema da produção de OTRs.

A abertura da monazita (Fase 1) é caracterizada decomposição da monazita, com ácido sulfúrico e liberação do tório, dos ETRs e o urânio sob a forma de sulfatos ou como complexos de fosfato. Após o beneficiamento dos ETRs, o seu concentrado segue para etapa da produção de OTRs (Fase 2).

Essa solução, chamada de “cloreto normal de terras raras”, é uma solução clorídrica proveniente da abertura sulfúrica e posterior tratamento químico da monazita. Os cinco circuitos independentes da Fase 2 são os responsáveis por separar os quatro OTRs de interesse da fração leve, bem como as duas frações dos elementos restantes.

O inventário do ciclo de vida (ICV) das entradas e saídas foi feito a partir de fontes de informação publicamente disponíveis, principalmente do banco de dados Eco-Invent e aliado aos dados coletados no Centro de Tecnologia Mineral - CETEM (Da Cunha & Wildhagem, 2016) usando o software SimaPro 8.02.

A metodologia de avaliação de impacto ambiental ReCiPe v1.08 foi utilizada para avaliar os dados do inventário. Foram considerados os impactos mais relevantes para cada categoria de danos: Mudanças Climáticas, Material Particulado, Mudanças Climáticas para os Ecossistemas; e finalmente Depleção de Combustíveis Fósseis. Posteriormente, foi determinado a contribuição dos insumos em cada uma das categorias de impactos ambientais. Que corresponde ao uso de hidróxido de amônio, ácido clorídrico, o hidróxido de amônio.

3.2. Modelagem dinâmica

Uma vez de posse do modelo estático e suas relações, a modelagem dinâmica foi desenvolvida com o auxílio do MATLAB® e seguindo a metodologia proposta por Forrester (1958). Forrester (1958) relaciona processos causais com o comportamento temporal de sistemas complexos. As estruturas do sistema conceptual são trazidas para modelos numéricos dinâmicos que podem ser usados como ferramenta de apoio à decisão, geração de diferentes cenários e análise de resultados das simulações associadas.

Adicionalmente, desenvolveu-se uma interface gráfica para auxiliar a interpretação das simulações apresentada na Figura 2. O método de integração de Euler foi utilizado com uma taxa de amostragem de um ano e com uma unidade fixa de entrada de rejeito de 70 mil ton. Desta forma, o modelo representará qual seria a variação dos indicadores de impacto após de 10 anos de produção dos OTRs. Foram criados três cenários: (1) cenário base, a partir da metodologia ReCiPe; (2) cenário da projeção dinâmica de 5 anos e (3) cenário da projeção dinâmica de 10 anos.



Figura 2. Interface Gráfica.

4. Resultados e Discussão

O ICV foi estimado a partir das entradas e saídas de energia e insumos para a produção de OTRs para todos os cenários propostos, destacado na Tabela 1. Os dados para base de cálculo foram obtidos a partir de fontes de informação publicamente disponíveis. Para o cálculo do consumo de energia elétrica, foi selecionada a base de dados brasileira de energia elétrica do Eco-Invent 3, assim como todos os demais insumos do inventário; e os processos de pós-tratamento dos resíduos radioativos de tório e urânio não foram levados em conta.

Tabela 1. Inventário do ciclo de vida da produção de OTRs para os diferentes cenários.

Fase 1: Abertura da monazita	Unidade	Cenário base	Cenário 2	Cenário 3
		Quantidade		
Monazita	kg	4,59E+06	6,89E+07	2,53E+8
Ácido Sulfúrico H ₂ SO ₄ 93%	kg	7,17E+06	1,08E+08	3,94E+8
Amônia NH ₃ 28%	kg	9,27E+05	1,39E+07	5,10E+7
Água	L	7,81E+07	1,17E+09	4,29E+9
Saídas				
Tório	kg	1,84E+05	2,75520E+6	1,01E+7
Urânio	kg	6,89E+03	1,0332E+5	3,79E+5
Fase 2: Separação OTRs				
Ácido Clorídrico HCl 37%	L	1,51E+08	2,26E+09	8,29E+9
Hidróxido de Amônio NH ₄ OH 25%	L	1,40E+08	2,09E+09	7,67E+9
Energia				
Eletricidade	kWh	1,28E+08	1,91E+09	7,01E+9

A Tabela 2 relaciona os impactos com os diferentes cenários propostos e os insumos que mais contribuem aos danos. Pode-se observar na Tabela 2, que uso de hidróxido de amônio e de ácido clorídrico, são responsáveis pela maior parte dos impactos ambientais nas categorias analisadas. Também que é o uso de amônia, que contribui em menor proporção em todas as categorias. A taxa média de incremento do uso dos insumos ao longo dos 10 anos avaliados é do 72%, o que representa um aumento acumulativo dos danos ocasionados ao meio ambiente.

Tabela 2. Relação de incremento das categorias de impacto do selecionadas do ReCipe para a análise do ICV da produção de OTRs para os diferentes cenários.

Categorias de impacto	Insumos	Cenário base	Cenário 2	Cenário 3
Mudanças Climáticas para a saúde humana	HCl	43%	127%	218%
	NH4SOH	45%	133%	229%
	NH3	10%	28%	48%
	Outros	2%	6%	10%
Material Particulado	HCl	51%	153%	263%
	NH4SOH	37%	110%	189%
	NH3	8%	23%	40%
	Outros	4%	13%	22%
Mudanças Climáticas para o Ecossistema	HCl	44%	131%	250%
	NH4SOH	45%	135%	232%
	NH3	10%	31%	53%
	Outros	2%	4%	7%
Depleção de combustíveis Fósseis	HCl	44%	131%	225%
	NH4SOH	50%	149%	256%
	NH3	5%	14%	24%
	Outros	1%	4%	7%

5. Conclusão

Neste trabalho, avaliou-se os impactos ambientais da produção de OTRs a partir de um minério brasileiro. Aplicou-se a metodologia da ACV e uma projeção dinâmica para 10 anos. As características da produção local foram inseridas ao modelo visando fornecer uma projeção mais próxima da realidade brasileira. Uma interface amigável foi fornecida para aumentar a produtividade das análises. Os resultados do inventário do ciclo de vida mostraram que o consumo de quantidades significativas de ácido clorídrico, hidróxido de amônio e amônia, são altamente contaminantes ao meio ambiente. A taxa média de incremento do uso dos insumos ao longo dos 10 anos avaliados é do 72%, acentuando assim o impacto acumulativo ambiental. Uma nova base de dados para produção de OTRs foi gerada, permitindo estender a análise dos impactos ambientais em todo o seu ciclo de vida.

6. Agradecimentos

Agradeço ao CNPq e ao CETEM, pela bolsa concedida e pelo apoio à pesquisa.

7. Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estruturas. ABNT, 2009.
- DA CUNHA, J. W. S. D.; WILDHAGEN, G. R. da S. **Elaboração de modelo de produção de elementos e óxidos de terras raras**. CW CONSULTORIA QUÍMICA E AMBIENTAL LTDA – Relatório técnico, 21p, 2016.
- DIAMOND, J. **Collapse: How Societies Choose to Fail or Survive**. *Environmental History*, v. 10, n. 3, p. 538-540, 2005.
- FORRESTER, J. 1958. **Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers**; Harvard Business Review. 36: 37-66.
- KOLTUN P, THARUMARAJAH A. **Life Cycle Impact of Rare Earth Elements**. ISRN Metallurgy [internet] 2014; [citado 2016 Dec 2]; 2014: 10p. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/907536>
- ORTIZ, C. E., & JÚNIOR, E. M. **Rare earth elements in the international economic scenario**. Revista Escola de Minas, v.67, p.361-366, 2014.
- SOUSA FILHO, Paulo C. de and SERRA, Osvaldo A. **Terras raras no Brasil: histórico, produção e perspectivas**. Quím. Nova [online]. 2014, vol.37, n.4, pp. 753-760.
- VAHIDI, E.; NAVARRO, J.; ZHAO, F. **An Initial Life Cycle Assessment of Rare Earth Oxides Production From Ion-Adsorption Clays**. Resources, Conservation and Recycling, v.113, p 1–11, 2016.
- VILLELA, M.; **CBMM anuncia exploração de Terras Raras**. Mining.com a mine of information. Nov. 2016. Disponível em: < <http://noticiasmineracao.mining.com/2016/11/01/cbmm-surpreende-e-anuncia-exploracao-de-terras-raras/>> Acesso em: 29 Aug. 2016.
- ZAIMES, G.G.; HUBLER, B.J.; WANG, S.; KHANNA, V. **Environmental Life Cycle Perspective on Rare Earth Oxide Production**. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, v.3 (2), p 237–244, 2015.