

DESAFIOS DA RECICLAGEM DO PÓ FÓSFORO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES ESGOTADAS

CHALLENGES FOR THE RECYCLING OF POWDERED PHOSPHOR FROM WASTE FLUORESCENT LAMPS

Ellen Cristine Giese¹

Ysrael Marrero Vera²

Manuel Castro Carneiro³

Marisa Nascimento⁴

RESUMO

A crescente demanda pelo aumento da eficiência energética culminou em avanços tecnológicos que permitiram a popularização das lâmpadas fluorescentes, mais econômicas e eficientes e com uma vida útil maior comparadas às tradicionais incandescentes. As lâmpadas fluorescentes são constituídas por vidro, elementos metálicos, plástico, pó de fósforo e mercúrio. O pó de fósforo, normalmente destinado aos aterros sanitários, é rico em elementos terras-raras que são críticos de valor econômico e estratégico para tecnologia de ponta. Os cinco fósforos de terras-raras mais comuns em lâmpadas fluorescentes são o fósforo vermelho (rico em ítrio (Y) e európio (Eu)), os fósforos verdes (rico em lantânio (La), cério (Ce), gadolínio (Gd) e térbio (Tb)) e fósforo azul (rico em Eu). Dentro dos desafios da gestão de resíduos sólidos, o objetivo deste trabalho é apresentar o potencial de reciclagem de lâmpadas fluorescentes, especialmente no que se refere à recuperação de terras-raras do pó de fósforo de lâmpadas esgotadas, para futuramente viabilizar sua reciclagem em cooperativas.

PALAVRAS-CHAVE: Reciclagem; Lâmpadas fluorescentes; Terras-raras

ABSTRACT

The growing demand for increased energy efficiency culminated in technological advances that allowed the popularization of fluorescent lamps, more economical and efficient and with a longer life compared to traditional incandescent lamps. Fluorescent lamps consist of glass, metallic elements, plastic, phosphors powder and mercury. Phosphors powder, normally destined for landfills, is rich in rare earth elements, critical metals of economic and strategic value for cutting-edge technology. The five most common rare-earth elements in fluorescent lamps are the red phosphors (rich in yttrium (Y) and europium (Eu)), green phosphors (rich in lanthanum (La), cerium (Ce), gadolinium (Gd) and terbium

¹ Doutora em Engenharia e Ciências de Alimentos pela UNESP-IBILCE, Mestre em Biotecnologia, Especialista em Bioquímica Aplicada e Graduada em Química pela Universidade de Londrina. Currículo: <http://lattes.cnpq.br/3707535147537449>.

² Doutor e Mestre em Ciências dos Materiais e Engenharia Metalúrgica pela PUC-RJ e Graduado em Química pela Universidad de Habana. Currículo: <http://lattes.cnpq.br/2651710548891030>

³ Doutor em Química Analítica pela Universidad de Barcelona, Mestre em Química pela PUC-RJ e Graduado em Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Currículo: <http://lattes.cnpq.br/5658344054124432>.

⁴ Doutora e Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Graduada em Engenharia Química pela Universidade Federal Fluminense. Currículo: <http://lattes.cnpq.br/9774625171574351>.

| | | |
|---|--|------------------------------|
| Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo | Número XXI Jan-dez 2020 | Trabalho 07 Páginas 01-14 |
| http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia | periodicoscesg@gmail.com | |

(Tb)) and blue phosphors (rich in Eu). Within the challenges of solid waste management, the objective of this work is to present the recycling potential of fluorescent lamps, especially with regard to the recovery of rare earths from phosphors powder from exhausted lamps, in order to make recycling in cooperatives possible in the future.

KEY WORDS: recycling; fluorescent lamps; rare earth elements; mercury

1 INTRODUÇÃO

O uso de lâmpadas fluorescentes (LF) cresceu rapidamente nos últimos anos devido sua alta capacidade de iluminação graças à fluorescência emitida pelo material impregnado em seu vidro, denominado pó de fósforo. Esse pó é constituído de óxidos de metais alcalinos terrosos dopados com elementos terras-raras (ETR) e halofosfatos. Os principais ETR visados na reciclagem de LF são o ítrio (Y) e o európio (Eu), advindos do composto $Y_2O_3:Eu^{3+}$, o qual por muito tempo foi o principal composto fluorescente utilizado na composição das lâmpadas.

O ciclo de vida total de uma LF envolve várias etapas, incluindo a aquisição de matérias-primas, fabricação, embalagem e distribuição, uso e fim da vida útil. As etapas que envolvem a aquisição de matérias-primas, fabricação, transporte e fim da vida útil representam menos de 30% do impacto ambiental total da lâmpada durante sua vida útil. Ao final da vida útil de uma lâmpada, que é a última etapa da análise do ciclo de vida, a lâmpada deve ser reciclada e não descartada em um aterro de resíduos sólidos. Com o processo de reciclagem, materiais como os ETR podem ser recuperados e reutilizados (GRIGOROPOULOS a et al., 2020).

A extração e recuperação desses elementos do pó de fósforo por meio de ataque ácido se mostra uma boa alternativa para a recuperação de ETR, porém há ainda muitas dúvidas sobre a viabilidade e o custo benefício para o uso deste processo hidrometalúrgico em grande escala. Além disso, outro fator preocupante no que diz respeito à reciclagem do pó de fósforo, são as grandes quantidades de vapor de mercúrio contido no interior das lâmpadas fluorescentes, que obrigam o desenvolvimento de métodos para evitar a contaminação humana e ambiental durante o desmantelamento das lâmpadas.

Vários métodos para extração de ETR a partir do pó de fósforo de lâmpadas fluorescentes esgotadas têm sido propostos para utilização em grande escala. Estes métodos envolvem processos de quebra, extração do pó e quantificação dos ETR. Porém, para corretamente determinar se o procedimento é viável economicamente, é

| | | |
|---|----------------------------|--|
| Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia | Número XXI Jan-dez 2020 | Trabalho 07 Páginas 01-14 periodicoscesg@gmail.com |
|---|----------------------------|--|

necessário otimizar o processo de extração, como por exemplo, a concentração e a quantidade de ácido utilizado para tal.

Existem na literatura diversos estudos que mostram a viabilidade de recuperar ETR de materiais pré-consumo (que são os rejeitos de outros processos de mineração ou de produção) ou pós-consumo (que consistem no reprocessamento de materiais acabados e descartados para a obtenção das ETR. Estudos de determinação e extração de ETR de insumos que seriam descartados são de suma importância, pois a procura de novas minas e a reabertura de minas desativadas demanda muitos recursos financeiros além do impacto ambiental gerado pela mineração.

É essencial que tecnologias de reciclagem e tratamento economicamente viáveis sejam estabelecidas para contemplar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, visando a sustentabilidade e uma economia circular para nossos recursos, incluindo cidades e comunidades sustentáveis, consumo e produção responsáveis (Oberle et al., 2019). Uma grande quantidade de ETR é perdida devido às baixas taxas de reciclagem de Resíduos de Equipamentos Eletro-Eletrônicos (REEE). Além disso, alguns ETR já são identificados como matérias-primas críticas (MPC) pela União Europeia e pelo Departamento de Energia e Defesa dos EUA (GIESE, 2020). Uma forma de resolver as deficiências ambientais e de reciclagem é integrar as cadeias de fornecimento de lixo eletrônico de volta à economia, reciclando suas MPC e metais preciosos pela mineração urbana (PATIL et al., 2021).

2 LÂMPADAS FLUORESCENTES

A fluorescência é a capacidade que uma substância tem de emitir luz quando exposta a alguns tipos de radiação. As lâmpadas que se fundamentam nesse princípio são constituídas basicamente por um tubo de vidro transparente, dois eletrodos, um em cada extremidade, uma mistura de gases à baixa pressão (um gás inerte, normalmente argônio, somado a vapor de mercúrio) e um material luminescente que reveste internamente o tubo, geralmente pó de fósforo (JÚNIOR; WINDMÖLLER, 2008). A Figura 1 representa a estrutura e princípio de funcionamento de uma lâmpada fluorescente.

| | | |
|---|----------------------------|------------------------------|
| Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo | Número XXI Jan-dez 2020 | Trabalho 07 Páginas 01-14 |
| http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia | periodicoscesg@gmail.com | |

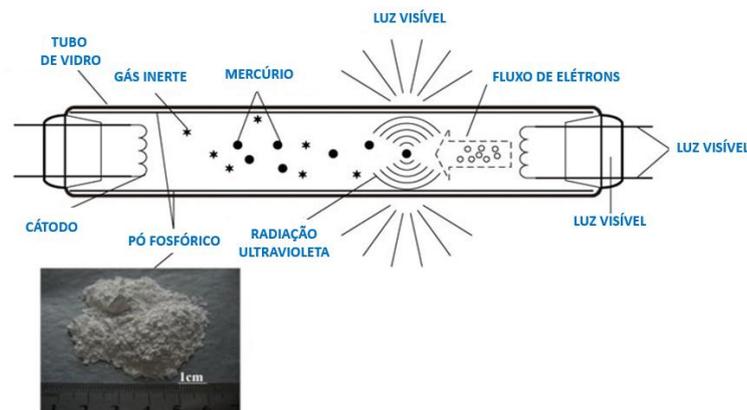


Figura 1. Representação esquemática e princípio de funcionamento de uma lâmpada fluorescente
Fonte: Adaptado de Tan et al. (2015).

De maneira geral, uma LF é constituída por: vidro (88%), metais (5%), plástico (4%), pó de fosfato (3%) e mercúrio (0,005%). A composição da fração de fósforo da lâmpada obtida após o esmagamento e peneiramento é de halofosfato de cálcio (45%), partículas de vidro fino e sílica (20 a 30%), alumina (12%), fósforos de ETR (10% a 20%) e uma fração residual mista (5%) (JANG et al., 2005; WU et al., 2014).

Materiais como alumina e sílica são utilizados na camada de barreira presente entre a camada de fósforo e o tubo de vidro. Esta barreira protege o vidro contra possíveis ataques por vapores de mercúrio, evitando assim o esgotamento do mercúrio da lâmpada e redução da emissão de lúmens. A barreira também melhora a eficiência da lâmpada, refletindo de volta a luz ultravioleta que passa através da camada de fósforo para a camada de vidro (BACILA et al., 2014).

Os cinco fósforos de ETR mais comuns em LF estão apresentados na Tabela 1. As LF mais antigas podem ser ainda constituídas de uma fração de halofosfato de cálcio e estrôncio $((\text{Sr,Ca})_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{Cl,F})_2:\text{Sb}^{3+}, \text{Mn}^{2+})$. Este halofosfato não contém ETR e é frequentemente utilizado em mistura com fósforos de ETR para obter uma boa renderização de cores. O fósforo vermelho têm maior valor intrínseco dentre os fósforos para os recicladores, porque contém maiores concentrações de ítrio (Y) e európio (Eu), e muitas vezes se apresentam em maiores proporções nas frações de fósforo recicladas (até cerca de 20% em peso) (BINNEMANS; JONES, 2014).

| | | |
|---|--|------------------------------|
| Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia | Número XXI Jan-dez 2020 periodicoscesg@gmail.com | Trabalho 07 Páginas 01-14 |
|---|--|------------------------------|

| Tipo de fósforo | Compostos contendo ETR |
|------------------|--|
| Fósforo vermelho | $Y_2O_3:Eu^{3+}$ |
| Fósforo azul | $BaMgAl_{10}O_{17}:Eu^{2+}$ $(Sr,Ca,Ba)_5(PO_4)_3Cl:Eu^{2+}$ |
| Fósforo verde | $LaPO_4:Ce^{3+}, Tb^{3+}$ $GdMgB_5O_{10}:Ce^{3+}, Tb^{3+}$ $(Ce,Tb)MgAl_{11}O_{19}$ $(Sr,Ca,Ba,Mg)_5(PO_4)_3Cl:Eu^{2+}$ |

Tabela 1. Composição e concentração dos fósforos utilizados em lâmpadas fluorescentes. Fonte: Binnemans e Jones (2014).

O ítrio (Y) e o európio (Eu) representam a grande maioria do conteúdo de ETR em lâmpadas e resíduos de lâmpadas. O európio está presente em diferentes estados de oxidação nos fósforos vermelhos e azuis. Os fósforos verdes são baseados em térbio (Tb), mas também podem conter traços de cério (Ce), gadolínio (Gd) e lantânio (La).

A presença do material fluorescente contendo ETR é de fundamental importância para a eficiência energética das LF, como pode ser visto na Tabela 2. A eficiência luminosa é um dos parâmetros utilizados para medir proporcionalmente a conversão de energia elétrica em luz, ou seja, diz respeito a quanto de energia elétrica é gasto para que a lâmpada acenda e quanto o fluxo luminoso alcança com determinada quantidade de energia.

| Tipo de lâmpada | Eficácia (lm/W) | Consumo de energia (W) | Emissão de luz (lm) | Eficiência na conversão de energia (%) |
|----------------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|--|
| Lâmpada incandescente | 13,4-13,5 | 100 | 1340-1350 | 3-5 |
| LF revestida com halofosfato | 78-82 | 40 | 3040-3360 | 23-25 |
| LF revestida com fósforos de ETR | 96-104 | 28 | 2688-2900 | 29-31 |

lm = lúmen

Tabela 2. Eficácia na conversão de energia de três tipos de lâmpadas. Fonte: Anand (2020).

3 ELEMENTOS TERRAS-RARAS

Chamadas de vitaminas industriais e elementos-chave para a revolução da Indústria 4.0, os elementos terras-raras (ETR) são vitais para as tecnologias futuristas em aplicações de alta tecnologia em eletrônicos, tecnologias limpas, energia, mobilidade, aviação, espaço, saúde e aplicações digitais, como em inteligência

| | | |
|---|--|------------------------------|
| Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia | Número XXI Jan-dez 2020 periodicoscesg@gmail.com | Trabalho 07 Páginas 01-14 |
|---|--|------------------------------|

artificial. Os ETR estão transformando nosso mundo em um melhor lugar para viver, em virtude de sua aplicação na obtenção de uma fonte de energia limpa na forma de ímãs permanentes; na promoção de uma iluminação eficiente na forma de fósforos; tornando gases tóxicos inofensivos na forma de catalisadores e sendo usados como alternativa à fonte convencional de energia na forma de baterias recarregáveis (ANAND, 2020).

Os ETR são um grupo de elementos químicos da série dos lantanídeos (do lantânio (La, Z=57) até o lutécio (Lu, Z=71)), acrescidos do escândio (Sc) e do ítrio (Y), que apresentam comportamentos químicos similares devido sua configuração eletrônica. Em geral, os elementos químicos de números atômicos inferiores aos do elemento gadolínio (Gd) são classificados como ETR leves, e os de números atômicos superiores aos do európio (Eu) são classificados como ETR pesados. Os ETR pesados são mais escassos e difíceis de processar quando comparadas aos ETR leves, o que os torna proporcionalmente mais valiosos (SOUZA et al., 2019).

Na natureza, os ETR não são encontrados como metais elementares nativos, presentes em minerais agregados a óxidos, fosfatos, silicatos, carbonatos e fluoretos, tendo uma concentração média de 10 a 300 ppm. Estima-se que existam cerca de mais de duzentas fases minerais que possuem, em sua composição, algum percentual de ETR, contudo apenas alguns destes apresentam concentração suficiente para justificar sua exploração. Dentre eles, podem ser citados a monazita, a xenotima, a bastnaesita e as argilas de adsorção iônica (MCLELLAN et al., 2014; ZHANG et al., 2015).

Recentemente o Brasil passou a ser a 2^a maior reserva mundial de ETR com a incorporação de expressivas reservas em Minas Gerais (MG) e Goiás (GO) detendo, ao final de 2018, 18,2% do total mundial. Atualmente, a China é responsável pela produção de 90% das matérias-primas que contém os elementos ETR e 84,1% dos óxidos de ETR, o que equivaleu à produção de 122.220 toneladas de óxidos de ETR em 2016 (SUMÁRIO MINERAL, 2017). O restante da produção global de ETR é distribuído entre Austrália (11,2%), Malásia, Brasil, Índia, Rússia e Vietnã (Zhou et al., 2017). A taxa de crescimento anual da demanda global de ETR aumentou em 5% em 2020, devido à grande corrida pelo desenvolvimento de altas tecnologias que impulsionam o mercado de energia renovável.

| | | |
|---|----------------------------|--|
| Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia | Número XXI Jan-dez 2020 | Trabalho 07 Páginas 01-14 periodicoscesg@gmail.com |
|---|----------------------------|--|

Os ETR apresentam propriedades óticas, químicas, magnéticas e físicas extraordinárias devido à sua configuração especial de elétrons na camada 4f. O efeito de contração dos lantanídeos torna seus tamanhos e propriedades muito semelhantes e sua separação uma da outra muito difícil. A Figura 2 apresenta as diversas aplicações dos ETR.

| | |
|----|---|
| Ce | Catálise (automóveis e refino de petróleo), cerâmicas, vidros, fósforos, pós para polimento |
| Dy | Cerâmicas, fósforos e aplicações nucleares |
| Er | Cerâmicas, coloração de vidros, fibras óticas, lasers e aplicações nucleares |
| Eu | Fósforos |
| Gd | Cerâmicas, vidros, detecção ótica e magnética, visualização de imagens em medicina |
| Ho | Cerâmicas, lasers e aplicações nucleares |
| Tm | Tubos de feixes eletrônicos e visualização de imagens médicas |
| Sc | Indústria aeroespacial, bastões de baseball, aplicações nucleares, iluminação e supercondutores |
| La | Catálise automotiva |
| Lu | Cintiladores de cristal único |
| Nd | Catálise, filtros de infravermelho, lasers, ímãs permanentes, pigmentos |
| Pr | Cerâmicas, vidros e pigmentos |
| Pm | Fósforos, miniaturas de baterias nucleares e dispositivos de medida |
| Sm | Filtros de micro-ondas, aplicações nucleares e ímãs permanentes |
| Tb | Fósforos |

Figura 2. Aplicações dos elementos terras-raras
Fonte: Souza et al. (2019).

4 RECICLAGEM DE LÂMPADAS FLUORESCENTES

As LF são um dos principais alvos quando se trata da recuperação dos ETR, especialmente quando se leva em consideração as grandes quantidades de LF que têm sido descartadas nas trocas por iluminação por diodos emissores de luz (LED), as quais são lâmpadas que também contém ETR em sua composição, embora em menor quantidade que as LF.

As alternativas para destinação de LF e seu tratamento no Brasil são: tratamento por sopro, moagem simples, moagem com tratamento químico ou térmico e solidificação/encapsulamento. As tecnologias disponíveis para reciclagem e destinação de LF no Brasil estão apresentadas na Figura 3.

| | | |
|---|--|------------------------------|
| Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia | Número XXI Jan-dez 2020 periodicoscesg@gmail.com | Trabalho 07 Páginas 01-14 |
|---|--|------------------------------|

Moagem Simples

- Realiza a ruptura das lâmpadas com a retenção de uma parte do mercúrio. O material é destinado ao aterro sanitário.

Trituração com tratamento químico

- Após o esmagamento das lâmpadas e retenção do mercúrio, é realizada a lavagem do vidro para remoção do pó fosfórico.

Trituração com tratamento térmico

- Essa tecnologia permite a recuperação do mercúrio através do aquecimento do pó fosfórico.

Sopro

- Usado somente para lâmpadas fluorescentes tubulares. As extremidades são rompidas com aquecimento e resfriamento e, posteriormente, através do tubo de vidro, uma corrente de ar é soprada, promovendo o arraste do pó fosfórico.

Solidificação/Encapsulamento

- Esmagamento seguido de encapsulamento para destinação ao aterro sanitário.

Figura 3. Tecnologias de reciclagem de lâmpadas fluorescentes esgotadas mais comuns no Brasil
Fonte: Bacila et al. (2014).

Desta maneira, os materiais oriundos da reciclagem de LF podem ser classificados em quatro tipos de acordo com a Tabela 3.

| Componente | Quantidade (%) | Descarte pós-consumo |
|---|----------------|---|
| Alumínio/outros metais | 18-30 | Reutilização ou reciclagem |
| Mistura de plástico e metais | 20 | Reciclagem, incineração ou aterro sanitário |
| Vidro | 45-80 | Reutilizado para novas lâmpadas; vidraças; isolamento de lã de vidro; agente de fusão na fundição de cobre; areia abrasiva para limpeza e asfalto; substituto de silício; cobertura do aterro |
| Pó de fósforo (contém ETR, mercúrio e pequenas partículas de vidro) | 2-3 | Separados e reutilizados como mercúrio ou fósforos em novas lâmpadas; separados e reciclados após o processamento do ETR; destinado a aterros como resíduos perigosos |

Tabela 3. Destino dos componentes das lâmpadas fluorescentes após o desmantelamento do produto pós-consumo
Fonte: Bacila et al. (2014).

De todos os materiais componentes da LF, somente o pó de fósforo não vem sendo reciclado adequadamente. Este material é removido e destinado aos aterros sanitários. A remoção do pó de fósforo de LF de tubos lineares é realizada através do

corte das tampas de alumínio e o uso de um fluxo de ar pressurizado para expelir o pó de fósforo contido no interior da lâmpada. No caso dos tubos fluorescentes não-lineares e das LF compactas, são necessárias operações de esmagamento, seguidas de uma etapa de peneiramento por vias secas ou úmidas. Nesta condição, o pó de fósforo recolhido será constituído de até 50% de partículas de vidro muito finas (BACILA et al., 2014; BINNEMANS; JONES, 2014).

A fração de pó de fósforo recolhida das LF esgotadas pode ser reciclada e separada fisicamente em seus diferentes constituintes de ETR. Este método é atraente porque não envolve dissolução do pó de fósforo e uso de produtos químicos, gerando uma quantidade de resíduos limitada. No entanto, é muito difícil alcançar 100% de eficiência de separação dos diferentes componentes de fósforo. Neste caso, o pó de fósforo separado pode ser utilizado na fabricação de novas lâmpadas, como por exemplos novas LED, ou para outras aplicações que permitem o uso de misturas impuras.

Os ETR também podem ser recuperados através de um processo de craqueamento resultando em um concentrado misto de diversos ETR. Diferentes operações unitárias (lixíviação ácida, extração por solventes, troca iônica) são então empregadas na separação química e obtenção dos ETR individuais.

O processo hidrometalúrgico para recuperação do conteúdo de ETR do pó de fósforo é um processo que envolve várias etapas de grande desenvolvimento tecnológico; porém, é o método que fornece os produtos finais mais puros na forma de óxidos de ETR de alta pureza, os quais apresentam maior valor de mercado. As ETR são essenciais para a manufatura de ímãs permanentes, catalisadores, baterias recarregáveis e LED, entre outros. Atualmente, a China detém cerca de 90% do fornecimento global de terras raras, e o restante do mundo é confrontado por um cenário preocupante causado pela ausência de depósitos primários econômicos e/ou operacionais.

A eficiência do processo de reciclagem também precisa ser considerada para estimar o suprimento secundário. BINNEMANS et al. (2013) e TAN et al. (2014) assumem uma taxa geral de eficiência do processo de reciclagem de 80%, e usamos essa premissa com uma alteração.

| | | |
|---|----------------------------|------------------------------|
| Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo | Número XXI Jan-dez 2020 | Trabalho 07 Páginas 01-14 |
| http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia | periodicoscesg@gmail.com | |

Muitas empresas e cooperativas brasileiras realizam a reciclagem de LF. A Apliquim Brasil Recycle é especializada na reciclagem de LF com descontaminação de mercúrio, contribuindo com a recuperação de mais de 150 toneladas deste metal no Brasil. A Apliquim recebe as lâmpadas a serem recicladas e separam os terminais e o vidro do pó fluorescente. O pó de fósforo é submetido a um tratamento térmico para volatilização do mercúrio, o qual é recuperado através de um processo de destilação.

O fósforo descartado é uma fonte potencial de ETR que podem ser recuperadas. Em 2014, cerca de 250 milhões de LF eram consumidas por ano no Brasil. Estima-se que apenas 6% desse montante foi submetido a algum processo de reciclagem para separação de mercúrio, tubos de vidro, cobre e alumínio (BACILA et al., 2014). No entanto, 2% a 5% do peso total das lâmpadas consistem em pó de fósforo (BINNEMANS; JONES, 2014). Considerando que em 250 milhões de lâmpadas consumidas a cada ano, existem aproximadamente 300 toneladas de ETR, podemos aferir que cerca de US\$ 15 milhões estejam sendo desperdiçados anualmente no Brasil.

A reciclagem de ETR a partir do pó de fósforo de LF esgotadas pode colaborar com a redução dos custos das matérias-primas e logística, além de favorecer a sustentabilidade da cadeia produtiva do setor de iluminação e preservação do meio-ambiente. A reciclagem de ETRs a partir de LF usadas é de grande importância e, para tal, é fundamental criar um método em escala laboratorial para que, posteriormente, possa ser adaptado para um processo para recuperar ETR em grande escala.

Durante o andamento deste projeto, identificamos os seguintes desafios para a reciclagem de LF e recuperação de ETR:

- Custo e eficiência limitada da coleta:
- As lâmpadas esgotadas estão espalhadas geograficamente entre consumidores e empresas; além disso, há um passivo ambiental de LF, as quais vêm sendo trocadas massivamente por LED. Estima-se que este processo levará ainda 5 anos.
- As lâmpadas são leves e o preenchimento ideal de veículos de transporte é problemático;

| | | |
|---|----------------------------|------------------------------|
| Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo | Número XXI Jan-dez 2020 | Trabalho 07 Páginas 01-14 |
| http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia | periodicoscesg@gmail.com | |

- Fragilidade da estrutura das lâmpadas (risco ocupacional);
- Presença de substâncias tóxicas indesejadas;
- Altos custos de reciclagem em comparação com o valor das lâmpadas;
- Quantidades pequenas de compostos valiosos por lâmpada unitária.

5 INICIATIVAS DO CETEM EM PARCERIA COM CNPQ E SESCOOP

O Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), uma das unidades de pesquisa do MCTI, atua no desenvolvimento de tecnologia para o uso sustentável dos recursos minerais brasileiros, com foco na inovação tecnológica para o setor mineral. Na área ambiental, são realizadas atividades de PD&I em gestão ambiental, com foco na recuperação de áreas degradadas, avaliação dos impactos das atividades e de seus passivos, incluindo ainda a recuperação de metais e reciclagem de resíduos eletroeletrônicos.

Em abril de 2018 foi lançado, a partir de parceria entre CETEM, INEA e a Decania do CT-UFRJ, o Manual para a Destinação de Resíduos Eletroeletrônicos no Rio de Janeiro (XAVIER et al., 2017). Iniciativa pioneira para auxiliar a logística reversa primária, o descarte dos REEE a partir dos consumidores finais. Recentemente estudos sobre as cooperativas e a gestão de resíduos sólidos do estado do Rio de Janeiro (GIESE et al., 2021a) e do Brasil (GIESE et al., 2021b) foram publicados em parceria com outras universidades.

Desde setembro de 2018, o CETEM vem desenvolvendo estudos relacionados à reciclagem de LF e recuperação de ETR no âmbito de um projeto de fomento com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Serviço Nacional de Aprendizagem do Cooperativismo (SESCOOP). O projeto busca desenvolver o conceito de cooperativa de mineração urbana através de soluções para o reaproveitamento dos metais nobres contidos nos equipamentos pós-consumo e melhora dos recursos da cadeia produtiva.

O estudo de caso do presente projeto teve como foco a busca pelo aproveitamento total das LF pós-consumo descartadas, passando pela reciclagem do material pós-consumo e recuperação dos metais nobres contidos no pó de fósforo, buscando a reinserção dos materiais de alto valor agregado dentro de novos

| | | |
|---|----------------------------|------------------------------|
| Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo | Número XXI Jan-dez 2020 | Trabalho 07 Páginas 01-14 |
| http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia | periodicoscesg@gmail.com | |

processos produtivos. Para tanto, diversos ensaios laboratoriais foram desenvolvidos. Ao final do projeto, um fluxograma para a extração e recuperação de ETR de pó de fósforo de LF esgotadas será proposto.

Há o pressuposto de se avaliar o potencial econômico da comercialização não somente do alumínio e vidro sobressalente, mas como também de tornar o Brasil competitivo com a inserção de tecnologias de recuperação de ETR a partir desta fonte secundária, ou ainda, matéria-prima secundária.

Apesar da exigência legal e do Acordo Setorial firmado entre empresas produtoras de lâmpadas no Brasil, o processo de logística reversa e descontaminação das lâmpadas ainda não se encontra difundido de modo satisfatório. A etapa de coleta das lâmpadas, que inicia o Sistema de Logística reversa, poderia ser beneficiada pelo estabelecimento de ações coordenadas a partir de cooperativas capacitadas.

6 CONCLUSÕES

A reciclagem do pó de fósforo das LF apresenta ganhos ambientais relacionados principalmente a evitar a extração de novas matérias-primas, além de colaborar para as metas de desenvolvimento sustentável da ONU em relação ao consumo responsável, produção industrial e ações climáticas.

A reciclagem comercial de ETR a partir de REEE, de modo geral, ainda é extremamente baixa. Isto se deve principalmente à coleta de LF ineficiente, às dificuldades tecnológicas dos processos de extração destes elementos e, especialmente, à falta de incentivos. Porém, em contrapartida, várias razões justificam os esforços para desenvolver um processo eficiente para a reciclagem no setor de iluminação. Benefícios ambientais como a diminuição do depósito de resíduos químicos tóxicos no meio ambiente, redução de áreas de aterros, além da preservação de recursos naturais reduzindo a exploração, conservando os depósitos naturais, devem ser levados em consideração.

| | | |
|---|----------------------------|------------------------------|
| Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo | Número XXI Jan-dez 2020 | Trabalho 07 Páginas 01-14 |
| http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia | periodicoscesg@gmail.com | |

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Serviço Nacional de Aprendizagem do Cooperativismo (SESCOOP) pelo apoio financeiro no âmbito do Projeto CNPq/SESCOOP nº 403048/2018-4.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAND, A. Synthesis of rare earth compounds from phosphor coating of spent fluorescent lamps. **Separation & Purification Reviews**, p. 1-17, 2020.

BACILA, D. M.; FISCHER, K.; KOLICHESKI, M. B. Estudo sobre reciclagem de lâmpadas fluorescentes. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, p. 21-30, 2014.

BINNEMANS, K. et al. Rare-Earth Economics: The Balance Problem. **The Journal on The Minerals, Metals & Materials Society**, v. 65, n. 7, p. 846-848, 2013.

BINNEMANS, K., JONES P. T. Perspectives for the recovery of rare earths from end-of-life fluorescent lamps. **Journal of Rare Earths**, v. 32, n. 3, p.195-200, 2014.

GIESE, E. C., XAVIER, L. H., OTTONI, M., ARAÚJO, R. A. **Cooperativas e a gestão de resíduos eletroeletrônicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM. 2021a.

GIESE, E. C., ARAUJO, R. A., OTTONI, M., SANTOS, J., CONTADOR, L., REBELLO, R. Z., SIERPE, R. S., SILVA, M. L. M., XAVIER, L. H. **Cooperativas e a gestão de resíduos eletroeletrônicos no Rio de Janeiro**. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM. 2021b.

GRIGOROPOULOS, C. J. et al. Estimating the benefits of increasing the recycling rate of lamps from the domestic sector: Methodology, opportunities and case study. **Waste Management**, v. 101, p. 188-199, 2020.

JANG, M.; MOHONG, S.; PARK, K. Characterization and recovery of mercury from spent fluorescent lamps. **Waste Management**, n. 1, v. 25, p. 5-14, 2005.

| | | |
|---|--|------------------------------|
| Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia | Número XXI Jan-dez 2020 periodicoscesg@gmail.com | Trabalho 07 Páginas 01-14 |
|---|--|------------------------------|

JÚNIOR, W. A. D.; WINDMÖLLER, C. C. A Questão do mercúrio em lâmpadas fluorescentes. **Revista Química Nova Escola**, n. 28, 2008.

MCLELLAN, B. C. et al. Sustainability of the Rare Earths industry. **Procedia Environmental Sciences**, v. 20, p. 280-287, 2014.

OBERLE, B. et al. Global resources Outlook 2019: natural resources for the future we want. In: **United Nations Environment Programme**, pp. 2019.

PATIL, A. B. et al. Exploiting end-of-life lamps fluorescent powder e-waste as a secondary resource for critical rare earth metals. **Resources, Conservation and Recycling**, p. 164, n. 105153, 2021.

SOUZA, A. C. S. P.; NASCIMENTO, M.; GIESE, E. C. Desafios para a extração sustentável de minérios portadores de terras raras. **HOLOS**, v. 1, p. 1-9, 2019.

SUMÁRIO MINERAL 2017. Vol 37. Agência Nacional da Mineração.

TAN, S., LI, J., ZENG, X. Rare Earth Elements Recovery from Waste Fluorescent Lamps: A Review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 7, 2015.

WU, Y. et al. The recycling of rare earths from waste tricolor phosphors in fluorescent lamps: A review of processes and technologies. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 88, p. 21-31, 2014.

ZHOU, B.; LI, Z.; CHEN, C. Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies. **Minerals**, v. 7, p. 203-217, 2017.

ZHANG, Z.; JIA, Q.; LIAO, W. Progress in the separation processes for Rare Earth resources. In BÜNZLI, J.-C.; PECHARSKY, V. (Ed.). **Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths** (Vol. 48, pp. 287-376, 2015) North Holland: Elsevier Inc.

| | | |
|---|----------------------------|------------------------------|
| Revista Brasileira de Gestão e Engenharia – ISSN 2237-1664 Centro de Ensino Superior de São Gotardo | Número XXI Jan-dez 2020 | Trabalho 07 Páginas 01-14 |
| http://periodicos.cesg.edu.br/index.php/gestaoeengenharia | periodicoscesg@gmail.com | |