

COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DE LÂMPADAS DE LED INSERVÍVEIS

GRAVIMETRIC COMPOSITION OF WASTE LED LAMPS

*Rafaela Zamprogno Rebello^a, Maria Tereza Weitzel Dias Carneiro Lima^b,
Luciana Harue Yamane^{a,*}, Renato Ribeiro Siman^a*

^aUniversidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Ambiental, Av. Fernando Ferrari, 514 - *Campus* Goiabeiras, Vitória, ES, Brasil

^bUniversidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas, Departamento de Química, Av. Fernando Ferrari, 514 - *Campus* Goiabeiras, Vitória, ES, Brasil

RESUMO

Lâmpadas de LED inservíveis têm sido um dos resíduos sólidos que mais cresce devido ao aumento do consumo mundial, e vêm substituindo lâmpadas convencionais (fluorescentes e incandescentes) devido à sua vida útil e ao poder de luminescência. Este tipo de fonte de luz vem se tornando mais complexo, por isso a quantidade de materiais usados em sua manufatura está mudando constantemente. O objetivo deste trabalho foi determinar a composição gravimétrica de lâmpadas de LED inservíveis visando identificar seu potencial de reciclagem. O procedimento foi realizado a partir da cominuição em moinho de argolas, seguido do processo de perda ao fogo. Para a determinação da fração metálica foi realizada a lixiviação em ácido nítrico. Os resultados mostraram que 8% corresponde aos materiais cerâmicos, 34% aos polímeros e 58% à fração metálica. A possibilidade de recuperar da fração metálica metais valiosos, tais como ouro, prata e elementos terras raras (cério e ítrio) tornam as lâmpadas de LED inservíveis atrativas sob o ponto de vista da reciclagem.

Palavras Chave – lâmpadas de LED; composição gravimétrica; resíduos de equipamentos eletroeletrônicos; reciclagem; metais.

ABSTRACT

Waste LED lamps have been one of the fastest growing solid waste due to increased worldwide consumption, and have been replacing conventional light bulbs (fluorescent and incandescent) due to their lifetime and luminescence power. This type of light source is becoming more complex, so the amount of materials used in its manufacture is constantly changing. The aim of this paper was to determine the gravimetric composition of the waste LED lamps in order to identify their recycling potential. The procedure was carried out from the comminution in a ring mill, followed by the loss on ignition process. For the determination of the metal fraction leaching in nitric acid was carried out. The results showed that 8% corresponds to the ceramic materials, 34% to the polymers and 58% to the metallic fraction. The possibility of recovering from the metal fraction valuable metals such as gold, silver and rare earth elements (cerium and yttrium) render the waste LED lamps from the point of view of recycling.

Keywords – LED lamps; gravimetric composition; waste of electric and electronic equipment; recycling; printed circuit boards.

* *Autor para correspondência. Corresponding author.*

E-mail: lucianayamane@gmail.com

(Dra. Luciana Harue Yamane)

1 INTRODUÇÃO

As lâmpadas de LED vem gradualmente substituindo as lâmpadas tradicionais (incandescentes e fluorescentes), pois apresentam vantagens, tais como: economia de energia (alta eficiência), vida útil maior, tamanho e peso menores, variedade de cores, tolerância à baixas temperaturas, além de não conter mercúrio (PARK & KIM, 2016). Além disso, as lâmpadas incandescentes serão eliminadas gradualmente, o que deve aumentar ainda mais o consumo de lâmpadas de LED. Segundo Gil-de-Castro *et al.* (2017), iniciativas em diferentes países foram criadas a fim de reduzir gradualmente o uso de lâmpadas incandescentes, podendo-se citar: União Européia (2009), Canadá (2015), Brasil (2015) e China (2016).

Ainda assim, com relação ao mercado de lâmpadas, Machacek *et al.* (2015) estimaram que em 2018, 35% desse mercado será ocupado por lâmpadas de LED, enquanto que as Compact Fluorescent Lamp (CFL) e Linear Fluorescent Lamp (LFL) dentre outras, ainda ocuparão juntas 65% desse mercado. Enquanto Machacek *et al.* (2015) descrevem a possibilidade de crescimento em 2020 para 47% do mercado, projeções apresentadas pela Secretaria de Eficiência Energética e Energia Renovável dos Estados Unidos descreveram que até 2030, 84% deste mercado será ocupado pelas lâmpadas de LED, reduzindo o consumo de energia por fontes de luz em até 40% (U.S. DOE, 2014).

Segundo Kim *et al.* (2018), ao longo das últimas décadas, pesquisas têm sido desenvolvidas na tentativa de melhorar a eficiência de conversão de energia dos LEDs. Dessa forma, além de economia de até 80% no consumo de energia, as lâmpadas de LED, quando comparadas com as fluorescentes de vapor de sódio e mercúrio, e de luz mista, apresentam tempo de vida útil variando desde 3 até 8 vezes maior, dependendo da fonte consultada, além de não apresentarem mercúrio em sua composição, sendo consideradas *environmental-friendly* (WILBURN, 2012; INMETRO, 2015).

Com relação a composição das lâmpadas de LED, de acordo com De Santi *et al.* (2015), o chip de LED é constituído a partir de um pedaço de cristal formado a partir de deposição sucessiva de elementos químicos (índio, gálio, alumínio, fósforo, silício, arsênio, boro, dentre outros) inseridos em sua estrutura cristalina.

Já as lâmpadas incandescentes possuem um filamento de tungstênio, enquanto que as lâmpadas fluorescentes contêm um gás ou vapor interno no qual uma pequena quantidade de mercúrio é introduzida no tubo e um material de fósforo especial é usado para converter a luz ultravioleta em luz visível (DOS SANTOS *et al.*, 2015). A diferença na composição das lâmpadas implica na inclusão apenas das lâmpadas de LED como REEE, no entanto, mesmo entre as lâmpadas de LED há muita heterogeneidade, característica inerente aos REEE, em função dos diferentes tamanhos, aplicações e funcionalidades.

Conforme apresentado por Hageluken (2006) e Cucchiella *et al.* (2015), a composição dos REEE é heterogênea e quase sempre contém componentes que despertam o interesse econômico, como metais preciosos (ouro, prata, paládio e platina), metais base (cobre, alumínio, níquel, estrôncio, zinco e ferro) e outros metais de interesse (mercúrio, berílio, índio, chumbo, cádmio, arsênio, antimônio, dentre outros).

Embora de composição heterogênea, de maneira geral, observa-se que todos EEE contêm uma placa de circuito impresso (PCI), contendo componentes soldados que definem a sua função. Assim, o arranjo depende do objetivo da estrutura projetada e alguns componentes são comuns à maior parte das placas, como os capacitores, resistores, indutores, baterias, dentre outros (MARQUES; CABRERA; MALFATTI, 2013). Em geral, as PCI são compostas de 30% de material plástico, 30% de material cerâmico (sílica, mica, alumina, titânio de bário) e 40% de metal (HE *et al.*, 2006). Conforme He *et al.* (2006) e Kumar, Holuszko & Espinosa (2017), dada a possibilidade imediata de sua recuperação, a fração metálica dos REEE é a de maior interesse econômico.

A concentração de metais varia em função principalmente da composição e função das PCI integrantes dos EEE. Para possibilitar o funcionamento de equipamentos menores e de elevados rendimentos, em alguns casos podem ser notadas inclusive a presença de componentes que exigem o uso de substâncias nobres (CUCCHIELLA *et al.*, 2015). Dessa forma, uma vez que equipamentos menores possuem PCI compacta, a concentração de metal por quilograma nesses dispositivos tende a ser maior nesses dispositivos (ISILDAR *et al.*, 2015).

Neste sentido, a reciclagem de REEE, incluindo lâmpadas de LED, além de favorecer a conservação de recursos naturais, também é estratégia para evitar a contaminação ambiental, embora a disposição em locais como aterros sanitários ainda seja a via notória para descarte desses resíduos sólidos em países em desenvolvimento (GUARNIERI *et al.*, 2016; EYGEN *et al.*, 2016; ZHAN *et al.*, 2015; WAKOLBINGER *et al.*, 2014).

A proposta deste trabalho foi determinar a composição gravimétrica das lâmpadas de LED inservíveis, dando especial atenção às PCI e aos componentes eletrônicos, e dessa forma, determinar seu respectivo potencial de reciclagem.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Lâmpadas de LED inservíveis

A coleta de lâmpadas de LED inservíveis foi realizada no período de maio a julho de 2016, através da doação voluntária de empreendimentos comerciais localizados no estado do Espírito Santo, Brasil, tais como shoppings, empresas privadas e instituições de ensino. Foram coletados 11kg de lâmpadas de LED inservíveis, compondo um único lote amostral misto constituído de 16 modelos diferentes conforme ilustra a Figura 1. Devido ao fato das amostras terem sido coletadas em diferentes empreendimentos comerciais (shoppings e empresas privadas) e instituições de ensino locais, suas formas e tamanhos variaram conforme a funcionalidade (comercial, residencial, industrial) e o fabricante.



Figura 1 - Modelos de lâmpadas de LED inservíveis utilizadas

2.2 Composição gravimétrica das placas de circuito impresso de lâmpadas de LED inservíveis

Após avaliação da integridade dos componentes do lote amostral, as lâmpadas de LED inservíveis foram desmontadas manualmente. Para determinação da composição gravimétrica foram aferidos com balança semi-analítica (marca Marte, modelo M2K) os pesos das peças de metal, vidro, polímeros, placas de circuito impresso (PCI) e componentes eletrônicos (como capacitores e resistores), além de baterias e cabos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A determinação da composição gravimétrica (Figura 2) permitiu analisar a distribuição dos componentes com potencial de reciclagem e/ou periculosidade nas lâmpadas de LED inservíveis, além de definir a necessidade do pré-tratamento para concentrar os metais de interesse.

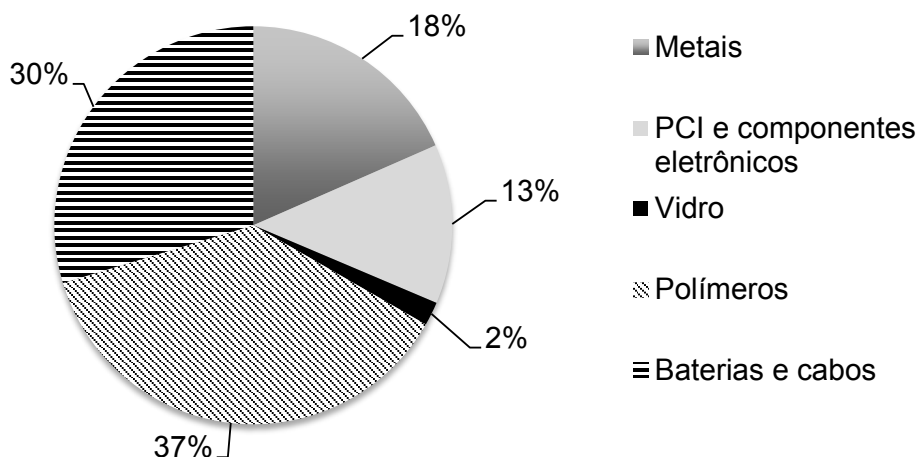


Figura 2 – Composição gravimétrica (%p/p) dos componentes das lâmpadas de LED inservíveis.

Como pode ser verificado na Figura 2, os componentes que contêm metais de interesse comercial, como PCI e componentes eletrônicos, representaram 13%p/p, que somado a outros metais que compõem a carcaça metálica externa (18%p/p), totalizaram 31% do peso total das lâmpadas de LED inservíveis avaliadas.

A recuperação de metais a partir de REEE tem sido extensivamente estudada por diferentes processos de reciclagem, em especial das PCI, inclusive combinando técnicas já existentes, e dentre estes processos se destacam os mecânicos, pirometalúrgicos, eletrometalúrgicos, hidrometalúrgicos e biohidrometalúrgicos (GOSH *et al.*, 2015; ZHANG, XU, 2016). Dessa forma, tais processos podem ser aplicados também para recuperação de metais a partir de lâmpadas de LED.

Sangwan *et al.* (2014) realizaram a avaliação do ciclo de vida dos diferentes tipos de lâmpadas tendo a Índia como cenário, além de reportar a composição gravimétrica das lâmpadas estudadas, na qual as lâmpadas de LED apresentaram a seguinte composição: 4% de vidro, 34,7% de polímeros, 11,9% de alumínio, 1,7% de cabos de cobre, 12,5% de PCI e componentes eletrônicos e outros 35,2% que compõem a fração atribuída a embalagem do produto. Os resultados obtidos foram similares ao estudo realizados por Sangwan *et al.* (2014).

Os polímeros das lâmpadas de LED foram removidos manualmente, e como podem ser encaminhados para o mercado de materiais recicláveis, uma etapa de pré-tratamento pode ser vantajosa, pois implicaria no enriquecimento da fração metálica a ser tratada através de processos de reciclagem.

No entanto, em estudo realizado pela Federação Empresarial Européia de Lâmpadas (ELC) no ano de 2009, os resultados mostraram que as lâmpadas de LED eram compostas por 12,1% de vidro, 40,3% de metais, 21,7% de componentes eletrônicos e placas de circuito impresso, 23,4% de polímeros e 2,4% de outros materiais (ELC, 2009), valores superiores para

metais, vidro, PCIs e componentes eletrônicos do lote misto do presente estudo. Esta diferença pode ser atribuída aos diferentes modelos de lâmpada de LED disponíveis no mercado atualmente e à modernização dos mesmos.

Destaca-se também a presença das baterias neste estudo, devido à quantidade de lâmpadas de LED de emergência obtidas na etapa de coleta, comumente utilizadas em empreendimentos comerciais. De acordo com a NBR 10.898/1999, lâmpadas de LED de emergência precisam de avaliação anual, na qual as baterias são submetidas a testes de funcionamento por 12 horas sem contato elétrico (ABNT, 1999). Assim, quando as mesmas não funcionam por este período, geralmente são substituídas, pois a troca da bateria ainda se apresenta inviável economicamente.

Para fins de comparação, dada a lacuna de estudos com lâmpadas de LED, uma diferença ainda maior pode ser notada quando são comparadas a outros tipos de lâmpadas. De acordo com Binnemans & Jones (2014), lâmpadas fluorescentes são compostas em peso por 88% de vidro, 5% de metal, 4% de polímeros, 3% de fósforos e 0,005% de mercúrio, porém sabe-se hoje, que o volume de vidro vem diminuindo e sendo substituído pelos polímeros, os quais têm custo inferior e podem ser facilmente reaproveitados, mas a presença de mercúrio confere um potencial de periculosidade.

Sangwan *et al.* (2014) também apresentam a porcentagem em massa de metais para lâmpadas incandescentes (7,4%), e quando comparadas às lâmpadas de LED tornam muito menos atrativas do ponto de vista da reciclagem.

Apesar da composição das lâmpadas de LED variar, em virtude da ampla variedade de modelos, tamanhos e aplicações, a exemplo do que acontece com outros REEE, de modo geral, reporta-se a presença de metais em todos os estudos realizados com lâmpadas de LED em porcentagens em massa superiores quando comparadas a lâmpadas incandescente e fluorescente. Adicionalmente, dentre as lâmpadas utilizadas comercialmente, somente as lâmpadas de LED possuem placas de circuito impresso, o que infere a presença de metais mais nobres. No entanto, para determinar a presença de metais valiosos, como metais preciosos e terras raras, bem como sua respectiva quantidade, faz-se necessário um estudo de caracterização das placas de circuito impresso e dos componentes eletrônicos de lâmpadas de LED.

4 CONCLUSÕES

Na composição gravimétrica, os polímeros representaram a maior fração (37%) do lote misto de lâmpadas de LED estudadas, no entanto, as placas de circuito impresso, que não estão presentes nos outros tipos de lâmpadas (fluorescentes e incandescentes), juntamente com os componentes eletrônicos, representaram 13%, podendo chegar a 21% conforme relatado em outros estudos, demonstrando o potencial de reciclagem dos metais a partir de lâmpadas de LED inservíveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo financiamento da pesquisa (Processo nº68781369/2014).

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 10.898. Sistema de iluminação de emergência. 1999.

Binnemans, K., Jones, P. T. P. (2014). Perspective for the recovery of rare earths from end-of-life fluorescent lamps. *Journal of Rare Earths*, 32, 95.

- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Koh, S. C. L., Rosa, P. (2015). Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 263–272.
- De Santi, C., Dal Lago, M., Buffolo, M., Monti, D., Meneghini, M., Meneghesso, G., Zanoni, E. (2015). Failure Causes and Mechanisms of Retrofit LED Lamps. *Microelectronics Reliability*, 55, 1765-1759.
- Dos Santos, T. S., Batista, M. C., Pozza, S. A., Rossi, L. S. (2015). Analysis of energy efficiency, environmental and economical between LED and conventional lamps. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 20 (4), 595-602.
- European Lamp Companies Federation (ELC). Environmental Aspects of Lamps. Second Edition. 17p. 2009. Disponível em : <http://www.lightingeurope.org/uploads/files/090811_elc_brochure_environmental_aspects_lamps_updated_final.pdf>. Acesso em: 16 de julho de 2017.
- Eygen, E. V., Meester, S. D., Trana, H. P., Dewulf, J. (2016). Resource savings by urban mining: The case of desktop and laptop computers in Belgium. *Resources, Conservation and Recycling*, 107, 53–64.
- Gil-de-Castro, A., Ronnberg, S. K., Bollen, M. H. J. (2017). Light intensity variation (flicker) and harmonic emission related to LED lamps. *Electric Power Systems Research*, 146, 107–114.
- Guarnieri, P., Silva, L. C., Levino, N. A. (2016). Analysis of electronic waste reverse logistics decisions using Strategic Options Development Analysis methodology: A Brazilian case. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1105-1117. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.025>
- Hagelucken, C. (2006). Improving Metal Returns and Eco-Efficiency in Electronics Recycling—A Holistic Approach for Interface Optimisation between Pre-Processing and Integrated Metals Smelting and Refining. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, Scottsdale, AZ, USA, 8-11.
- He, W., Li, G., Ma, X., Wang, H., Huang, J., Xu, M., Huang, C. (2006). Review: WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials*, B136, 502–512.
- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Portaria nº 144, de 13 de março de 2015. 2015.
- Isildar, A., Vossenbergh, J. V. D., Rene, E. R.; Hullebusch, E. D. V.; Lens, P. N. L. (2016). Two-step bioleaching of copper and gold from discarded printed circuit boards (PCB). *Waste Management*, 57, 149-157.
- Kim, K., Hua, M., Liu, D., Kim, J., Chen, K. J., Ma, Z. (2018). Efficiency enhancement of InGaN/GaN blue light-emitting diodes with top surface deposition of AlN/Al₂O₃. *Nano Energy*. 43, 259-269.
- Kumar, A., Holuzko, M., Espinosa, D. C. R. (2017). E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 32-42.
- Machacek, E., Richter, J. L, Habib, K., Klossek, P. (2015). Recycling of rare earths from fluorescent lamps: Value analysis of closing-the-loop under demand and supply uncertainties. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 76-93.
- Marques, A., Cabrera, J., Malfatti, C. (2013). Printed circuit boards: A review on the perspective of sustainability. *Journal of Environmental Management*, 131, 298-306.
- Park, S. H., Kim, J. H. (2016). Lifetime estimation of LED lamp using gamma process model. *Microelectronics Reliability*, 57, 71–78.
- Sangwan, K. S., Bhakara, V., Nalika, S., Andratb. S. N. (2014). Life Cycle Assessment of Incandescent, Fluorescent, Compact Fluorescent and Light Emitting Diode Lamps in an Indian Scenario. *Procedia CIRP*, 15, 467 – 472.
- U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (U.S. DOE). Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications. Navigant Consulting, Inc., Building Technologies Program. n. 68. 2014.
- Wakolbinger, T., Toyasaki, F., Nowak, T., Nagurney, A. (2014). When and for whom would e-waste be a treasure trove? Insights from a network equilibrium model of e-waste flows. *International Journal of Production Economics*, 154, 263-273.

- Wilburn, D.R. (2012). Byproduct Metals and Rare-Earth Elements Used In the Production of Light-Emitting Diodes — Overview of Principal Sources of Supply and Material Requirements for Selected Markets (Scientific Investigations Report No. 2012-5215). U.S. Geological Survey, Retrieved from: {<http://pubs.usgs.gov/sir/2012/5215/>}.
- Zhan, L., Xia, F., Ye, Q., Xiang, X., Xie, B. (2015). Novel recycle technology for recovering rare metals (Ga, In) from waste light-emitting diodes. *Journal of Hazardous Materials*, 299, 388-394.
- Zhang, L., Xu, Z. (2016). A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment. *Journal of Cleaner Production*, 127, 19-36.