

## RECICLAGEM DE LÂMPADAS DE LED INSERVÍVEIS: PANORAMA ATUAL E PERSPECTIVAS FUTURAS

*Rafaela Zamprogno Rebello (rafaelazrebello@gmail.com), Leonardo Picanço Peixoto de Abreu (lp.peixotoabreu@poli.ufrj.br), Carlos Francisco Moraes Simões Gomes (carlosfranciscogomes1997@gmail.com), Lúcia Helena Xavier (luciahelenaxavier@gmail.com)*

*Centro de Tecnologia Mineral (CETEM / MCTI)*

### RESUMO

A inserção de lâmpadas de LED no comércio foi intensificada através do desenvolvimento de tecnologias estimuladas pela proibição do uso de lâmpadas incandescentes (Portaria Interministerial 1.007/10). Além da redução no consumo energético, a crescente participação de mercado das lâmpadas de LED se deve a algumas outras características como: versatilidade, tempo de vida útil e baixa emissão de calor, quando comparadas aos modelos convencionais. Assim, após seu uso espera-se que, como outros resíduos provenientes de equipamentos eletroeletrônicos, o LED seja inserido na cadeia de logística reversa, porém a falta de integração entre os elos da reciclagem, culmina no descarte inadequado deste resíduo. Em contrapartida, devido ao seu potencial de reaproveitamento de metais visualizado em trabalhos de caracterização, as lâmpadas de LED passaram a despertar interesse econômico como fonte secundária de diferentes elementos. O presente trabalho trata sobre o panorama atual das técnicas de reciclagem existentes, a partir da ótica científica, identificando lacunas a serem preenchidas e perspectivas futuras com relação ao tema. O cenário atual demonstra que, entre os processos identificados, os hidrometalúrgicos ainda se apresentam como os mais utilizados para a recuperação de metais, podendo também estar associados a processos térmicos, conhecidos como pirometalúrgicos. Os elementos de interesse presentes em lâmpadas de LED são Gálio, Índio, Ouro, Cobre, Arsênio, Prata e Níquel, porém, apesar da presença de artigos que exibem metodologias que possibilitam sua extração, nenhum processo foi realizado em escala piloto e industrial ou apresentou estudos aprofundados de viabilidade econômica.

**Palavras-chave:** Resíduos eletroeletrônicos; Lâmpadas de LED; Reciclagem.

### Waste LED Lamps Recycling: Current Scenario and Future Perspectives

#### ABSTRACT

The sales penetration of LED lamps was intensified through the development of technologies promoted by the ban on the incandescent lamps use. In addition to the reduction in energy costs, the increasing market share of LED lamps is correlated to some other characteristics such as versatility, long lifetime, and low heat emission, when compared to conventional models. Thus, after the end of life span, LED lamps are expected to join the reverse logistics, like other electronic equipment waste, but the lack of integration in the recycling chain support the inappropriate disposal of this waste. On the other hand, LED lamps started to be seen as a secondary source, because of the economic potential from metals reuse visualized in characterization papers. The present work focuses on the current scenario of recycling techniques, identifying gaps, and future perspectives in relation to the theme. The current overview introduces that, the hydrometallurgical process is the most applied for the recovery of metals, and may also be associated with thermal processes, known as pyrometallurgical. The interest elements present in LED lamps are Gallium, Indium, Gold, Copper, Arsenic, Silver and Nickel, however, despite the presence of studies that exhibit methodologies that

allow their extraction, no process was carried out on a pilot and industrial-scale or presented in-depth economic feasibility studies.

**Keywords:** Electro-electronic waste; LED lamps; Recycling.

## 1. INTRODUÇÃO

A reciclagem, ou seja, a alteração física, química ou fisicoquímica do material a fim de reinseri-lo no ciclo produtivo na forma de insumo, é uma prática bastante difundida para a recuperação de materiais que anteriormente estariam dispostos sem qualquer valor e geralmente de modo ambientalmente inadequado e danoso à saúde humana. Diante desta perspectiva, é crescente o número de pesquisas sobre o tema, porém estudos que tratam sobre lâmpadas de LED (Light-Emitting Diode - Diodo Emissor de Luz), abordam ainda de maneira superficial a tratativa (RAHMAN et al., 2019), sem a utilização de elementos legais e normativos.

Algumas características como: eficiência energética, tempo de vida útil e o fato de não possuírem mercúrio em sua composição, bem como menor propensão à geração de incêndios, uma vez que possuem mecanismos dissipadores de calor, apresentam alta resistência à vibração e transporte, visto que não possuem filamentos ou vedação de vidro e terem menor consumo de energia elétrica para gerar uma alta potência luminosa, além de atingirem seu brilho máximo instantaneamente ao serem ativadas (Kumar et al., 2019). Fazem com que o LED se apresente como um produto mais que versátil (Lim et. al, 2013). Estima-se que em 2030, LEDs irão compor 84% do mercado e reduzirão em até 40% o consumo de energia utilizada através de fontes luminosas, gerando receita superior a 54 milhões de dólares em 2022 (ANNONI et al., 2020).

A reciclagem das lâmpadas de LED é tema relevante, pois enquadrado no eixo de mineração urbana, ou seja, segundo Xavier & Lins (2018), o aproveitamento de novos insumos gerados pelo reaproveitamento de resíduos, pelo descarte de produtos pós-consumo, que, ao retornar para a cadeia produtiva por meio de reciclagem ou recirculação, gera como consequência a mitigação de impactos à saúde humana e ao meio ambiente, bem como favorece à sustentabilidade. Este conceito se origina dos conceitos de ecologia industrial (Erkman, 1997) e Valorização (McDounough & Braungart, 2013). urbana, este resíduo pode auxiliar no fornecimento de matérias-primas escassas, sendo uma fonte secundária importante, principalmente para países que dependem de recursos importados (OLIVEIRA et al., 2020). Dentre os materiais que as compõem, pode-se destacar a presença notável de componentes eletrônicos (13 p%) e metais (31 p%), que compreendem a parte mais valiosa deste resíduo e possibilita uma logística reversa lucrativa (REBELLO et. al, 2020). Entre os metais, as terras-raras, tem um papel crucial na indústria eletrônica, porém de maneira geral, poucos estudos abordam a viabilidade econômica de sua reciclagem, quando provenientes de lâmpadas inservíveis, e os existentes apontam para a baixa lucratividade dessa atividade, contudo, estima-se sobre o crescimento destes resíduos para os próximos anos, o que pode mudar esse quadro (QIU & SUH, 2019).

Entre as evidências encontradas, observa-se que um dos principais problemas relacionados a este tema, é a inexistência de um sistema de reciclagem padronizado para os diodos, desde a coleta até sua disposição final (CENCI et al., 2020). Para a recuperação de metais provenientes de lâmpadas de LED são apontados processos hidrometalúrgicos como rota principal, devido ao seu baixo impacto ambiental quando comparados aos pirometalúrgicos, por exemplo, (ANNONI et al., 2020; ZHAN et al., 2015). Apesar de ainda não ter se firmado no mercado, outra forma de valorizar este tipo de resíduo é a partir das rotas biohidrometalúrgicas, as quais se apresentam promissoras, quando se trata da recuperação de metais em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) (POURHOSSEIN & MOUSAVI, 2019).

Em estudo desenvolvido por Rahman et al. (2017), os autores apontam para cinco desafios principais encontrados na reciclagem de lâmpadas LED: poucas pesquisas realizadas sobre o tema quando comparadas a outros REEE; tempo entre os estudos desenvolvidos é demasiadamente longo; rotas de reciclagem não estão estabelecidas; falta de adaptações de design que facilitem o

descarte das lâmpadas no final de suas vidas úteis; falta de sistema para diferenciar as lâmpadas de LED dos resíduos de demais lâmpadas, como fluorescentes.

Diante dos fatos demonstrados, este trabalho visa ampliar a perspectiva científica acerca da reciclagem de lâmpadas LED, focando no estabelecimento de um panorama atual para a identificação de novas lacunas e perspectivas futuras de pesquisa.

## **2. OBJETIVO**

Analisar os processos de reciclagem de lâmpadas de LED, a partir da ótica científica, identificando o cenário atual, lacunas a serem preenchidas e perspectivas futuras.

## **3. METODOLOGIA**

Tomar decisões sobre o que será reciclado ajuda a estabelecer a prioridade do material mais vantajoso economicamente e, por isso, elas devem ser pautadas em dados. O estabelecimento de um panorama atual sobre determinado tema da literatura desempenha um papel crítico, auxiliando na exploração e estruturação de uma área de pesquisa específica. A partir deste cenário e através da aquisição de conhecimento avançado é possível desenvolver novas hipóteses e identificar lacunas a serem investigadas.

Sendo assim, para estabelecimento de um cenário geral sobre a reciclagem de lâmpadas de LED no mundo, este estudo implementou um processo de três etapas, constituído em coleta, análise e categorização de materiais de estudo. Posteriormente, foi executado o processo de avaliação do material categorizado, desenvolvendo cada categoria a partir de estudos encontrados.

A primeira etapa deste trabalho trata sobre a coleta de materiais, onde palavras-chave como "recovery", "recycling" e "characterization", juntamente com "LED lamps" ou "LED bulbs" foram usadas para realizar a pesquisa de trabalhos. Essas palavras-chave foram inseridas nos campos de busca dos bancos de dados Scopus, Science Direct e Google Scholar. Um total de 28 artigos foram coletados e analisados para serem categorizados e a escolha das categorias se deu a partir da relevância dos artigos sobre o tema, ação executada na segunda etapa. A partir disso, foram estabelecidas duas categorias: a primeira trata sobre a caracterização do resíduo, a segunda, sobre o processo de recuperação de metais.

Após a categorização, realizou-se o processo de avaliação do material, onde todas as informações pertinentes extraídas dos artigos foram expostas em um arquivo para diminuir a chance de duplicidade, estabelecendo confiabilidade ao estudo e possibilitando a correlação dos dados coletados, e finalmente, como conclusão forma identificadas as lacunas e perspectivas futuras sobre o tema reciclagem de lâmpadas de LED.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Caracterização**

A caracterização de REEE é etapa essencial para que o processo de reciclagem torne-se viável, sendo assim, considera-se importante, principalmente, a identificação de elementos que possuam valor agregado e os que apresentam-se em elevadas concentrações (DOS SANTOS et al., 2020) A partir de um estudo de caracterização, alternativas de reciclagem, oportunidades e lacunas surgem, bem como prioridades, as quais podem se estabelecer ou não.

Acerca dos REEEs, Segundo Carvalo & Xavier (2014), os REEEs se dividem em três frações de materiais, sendo estas: Cerâmicas (geralmente compostas por óxidos refratários), Plásticos (Polímeros geralmente associados à retardantes de chamas) e metais. Metais, por sua vez, podem ser divididos em preciosos (Au, Ag, Pt e Pd), base (Cu, Al, Ni, Sn, Zn e Fe) e Tóxicos, ou seja, que causam danos ao meio ambiente e à saúde humana (Pb, Be, Cd, As, Sb, In e Hg) e Elementos Terras Raras ETRs (Shinkuma & Huong, 2009). Na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS),

é obrigatória a logística reversa de pilhas e Baterias, equipamentos eletroeletrônicos, bem como lâmpadas de qualquer tipo, envolvendo LED, estando estas três categorias associadas a esta composição supracitada. Ao tratar de lâmpadas de LED, outro ponto a ser considerado, é a variação de design, fato que justifica a procura do produto no mercado, mas em contrapartida, amplifica a gama de materiais que o compõe, corroborando para uma caracterização variável de acordo com cada modelo analisado. Os elementos que podem ser encontrados em lâmpadas de LED se apresentam em categorias distintas: elementos de base, que são identificados em maior quantidade; terras-raras e metais preciosos (KUMAR et al., 2019; REBELLO et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2020). Como pode ser observado na Tabela 1, os elementos base, Alumínio e Cobre, apresentam-se como predominantes nas amostras analisadas, podendo atingir concentrações de até 947.000,00 mg/kg e 94.492,00 mg/kg, respectivamente. Apesar de não apresentarem valor econômico alto, quando comparados às terras-raras por exemplo, sua disponibilidade possibilita a criação de rotas de recuperação para os mesmos.

Dentre os metais preciosos, o Ouro e a Prata foram identificados em grande parte dos estudos observados, resultados que corroboram com a afirmação de CENCI et al. (2020) e REBELLO et al. (2020) que demonstraram em estudo, que as lâmpadas de LED se apresentam como um resíduo com grande potencial para recuperação de metais. Além de metais de valor econômico, também foi identificado a presença de Chumbo e Arsênio, elementos tóxicos, que causam riscos a vida humana e animal em elevadas concentrações (CENCI et al., 2020; REBELLO et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2020).

Assim como em outros tipos de lâmpadas, os LEDs também são compostos por terras-raras (KUMAR et al., 2019). A partir dos estudos presentes na Tabela 1, foi observado a presença dos elementos Cério, Gadolínio, Gálio e Ítrio, os quais se mostram interessantes quando visualizados a partir da ótica de mercado que, atualmente, se estabelece através do monopólio chinês, o qual controla de maneira majoritária o preço de aquisição desses materiais (ZHAN et al., 2020). Apesar de serem encontrados em baixas concentrações, a recuperação de elementos terras-raras vem se estabelecendo como viés inovador de pesquisa, devido a sua complexidade, inovação e potencial econômico (CHEN et al., 2018). Por se encontrarem em baixas concentrações (vide a tabela abaixo), há a necessidade de processos avançados e até conjugados (à exemplo: piro- e hidrometalúrgicos), os quais têm foco no aumento da concentração dos metais de interesse, segregando as frações metálicas das poliméricas ou transformando substâncias pouco solúveis em outras que apresentam maior afinidade aos ácidos utilizados nos processos hidrometalúrgicos.

**Tabela 1.** Estudos de caracterização de lâmpadas de LED

	Cenci et al. (2020)	Oliveira et al. (2020)	Rebello et al. (2020)	Kumar et al. (2019)	Tuenge et al. (2013)	Lim et al. (2012)	Lim et al. (2011)
<b>A</b>	194,0	286,0	110.923,0	225.250,0	-	947.000,0	84,5
<b>S</b>	-	-	212,5	150,0	352,0	123,0	25,9
<b>A</b>	-	-	66,0	50,0	3,00	ND	ND
<b>B</b>	-	-	-	500,0	744,0	364,0	ND
<b>C</b>	-	-	-	3750,0	-	-	-
<b>C</b>	9,0	7,0	ND	-	-	7,8	ND

e							
Pb	1.025,0	8.358,0	-	300,0	150,0	16,7	ND
Co		5,0	-	28,0	12,0	-	-
Cu	59.026,0	50.455,0	94.492,0	21.065,0	44.197,0	31.600,0	31,8
Cr	-	-	-	60,0	673,0	120,0	65,9
Sn	6.812,0	10.296,0	-	-	-	-	-
Fe	480,0	-	-	33.250,0	-	12.300,0	311.303,0
P	-	-	-	-	-	127,0	110,8
Gd	-	7,0	-	-	-	0,1	ND
Ga	84,0	70,0	ND	-	-	108,0	3,8
In	-	-	-	-	-	ND	ND
Y	290,0	404,0	ND	-	-	1,7	ND
Mn	-	-	-	9.425,0	-	-	-
Hg	-	-	-	-	-	0,4	ND
Ni	82,0	141,0	761,0	290,0	761,0	151,0	4.083,0
Au	54,0		348,5	-	-	2,2	115,9
Ag	718,0	166,0	384,0	30,0	34,0	159,0	520,0
Ti	58,0	4.522,0	-	-	-	-	-
W	-	-	-	-	-	1,2	ND
Zn	-		-	19.325,0	8.932,0	4.540,0	49,2

*Todos os resultados estão expressos em mg/kg; ND = Não detectado.*

## 4.2 Recuperação de metais

A recuperação de metais a partir de REEEs, e/ou a partir de subprodutos de processos, é foco de diversos estudos reportados na literatura (HU et al., 2015). As metodologias de tratamento para lâmpadas de LED, são baseadas em três tipos de processos, como pode ser observado na Tabela 2. Entre vantagens e desvantagens das técnicas de pirometalurgia e hidrometalurgia, a última é bastante empregada por possibilitar a recuperação a partir de sólidos que contêm baixas concentrações do metal de interesse (SWAIN et al., 2015).

Além das metodologias de extração de metais a partir da alteração de suas propriedades químicas, os processos físicos também são utilizados em REEE, muitas vezes aplicados como etapas iniciais da reciclagem, por serem eficientes na liberação, exposição e separação dos materiais (CENCI et al., 2020). A desmontagem dos equipamentos geralmente é a primeira técnica a ser aplicada e pode ser executada de forma manual ou mecanizada. Outros métodos muito utilizados são a cominuição e a separação granulométrica.

Deve-se destacar que, as lâmpadas LED ainda são uma tecnologia relativamente nova, portanto vem gerando um fluxo adicional de resíduos, o qual requer atenção para com seu tratamento, especialmente considerando outras alternativas de reciclagem menos danosas a saúde humana e meio ambiente (FANG et al., 2018; MARWEDE et al., 2012). A aplicação de processos de biometalurgia e hidrobiometalurgia tem se mostrado como uma solução tecnicamente eficiente e economicamente mais viáveis, todavia, necessitam de um controle rigoroso das condições de atuação, com constante acompanhamento na manutenção do potencial Hidrogeniônico (pH), temperatura e razão sólido líquido, por exemplo, o que ainda consiste em uma barreira a ser transposta para viabilizar esta inovação proposta pela academia (POURHOSSEIN & MOUSAVI, 2018; POURHOSSEIN & MOUSAVI, 2019).

**Tabela 2.** Processos utilizados na recuperação de metais provenientes de lâmpadas de LED

Processo	Vantagens	Desvantagens
<b>Pirometalúrgico</b> <sup>1</sup> Decomposição química de materiais orgânicos através de altas temperaturas, visando a extração de metais.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Processo consolidado</li> <li>- Não necessita de pré-tratamento mecânico</li> <li>- Dispensa o uso de lixiviantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto investimento inicial</li> <li>- Requer dispendioso sistema para coleta de compostos voláteis</li> <li>- Baixa eficiência para separação de frações cerâmicas</li> </ul>
<b>Hidrometalúrgico</b> <sup>2</sup> Utiliza soluções aquosas de ácidos ou bases fortes para dissolver seletivamente e precipitar metais.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo Investimento inicial</li> <li>- Fácil controle</li> <li>- Reciclabilidade de reagentes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Necessidade de pré tratamento mecânico</li> <li>- Requer uso de ácidos/bases fortes</li> <li>- Reagentes corrosivos</li> </ul>
<b>Biometalúrgico</b> <sup>3</sup> Utilização de microrganismos os quais produzem, quando em condições ótimas, lixiviantes capazes de solubilizar metais	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixa temperatura e energia necessárias</li> <li>- Utilização de ácidos orgânicos fracos</li> <li>- Baixo investimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Processo de longa duração</li> <li>- Dificuldade na reprodução do microrganismo</li> <li>- Controle rigoroso de condições no meio de cultura</li> </ul>

<sup>1</sup>Dados obtidos a partir de ZHAN et al., 2015; <sup>2</sup>Dados obtidos a partir de ANNONI et al., 2020; <sup>3</sup> Dados obtidos a partir de POURHOSSEIN & MOUSAVI, 2018.

Além das inovações, técnicas atualmente utilizadas pela indústria mineradora convencional podem ser adaptadas aos REEE. Kumar et al. (2019) destacaram a separação gravimétrica e magnética, flotação, precipitação, eletrorecuperação, oxidação em meio supercrítico, extração por solvente e fundição como metodologias que podem ser uma alternativa para os diodos. A partir desta ótica, processos são desenvolvidos diariamente visando a reciclagem de lâmpadas de LED. A Tabela 3 mostra uma gama de estudos sobre a extração de metais, destacando as etapas de processo desenvolvidas em cada um e sua eficiência.

Tabela 3. Resultados de estudos de recuperação de metais provenientes de Lâmpadas de LED

Processo	Referência	Etapas	Eficiência de Recuperação			
			Ga		In	
Pirometalúrgico	ZHAN et al., 2015	Pirólise; Desagregação física; Separação metalúrgica à vácuo	93,5%		95,7%	
	ZHOU et al., 2019	Processamento mecânico; Pirolise; Lixiviação ácida	90,4%			
	MAAREFVAND et al., 2020	Incineração; Lixiviação ácida	91,4%			
Hidrometalúrgico	GUPTA et al., 2007b	Extração por solvente; Remoção através de solução de HCl	91,0%			
	GUPTA et al., 2007a	Extração por solvente; Remoção através de solução de HCl	90,0%			
	MURAKAMI et al., 2015	Troca iônica com poliamina; Lixiviação; Precipitação	100,0%			
	ANNONI et al., 2020	Lixiviação; Separação por membrana (ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa)	As	Au	Cu	Ga
	ZHAN et al., 2020	Lixiviação em 2 etapas (remoção de encapsulamento e recuperação)	Ag	As	Ga	In
Biometalúrgico	POURHOSSEIN & MOUSAVI, 2018	Biolixiviação por contato direto; Bactéria: Acidithiobacillus ferrooxidans	Cu	Ga	Ni	
	POURHOSSEIN & MOUSAVI, 2019	Processamento mecânico; Biolixiviação por contato indireto; Bactéria: Acidithiobacillus ferrooxidans	Cu	Ga	Ni	

Entre os metais caracterizados, o Gálio, Índio, Ouro, Cobre, Arsênio, Prata e Níquel, apresentam metodologias que possibilitam sua extração, quando provenientes de lâmpadas de LED, demonstrando majoritariamente, eficiência de recuperação acima de 90,0%. Em contrapartida, os artigos supracitados foram executados apenas em escala laboratorial e não apresentam estudos complementares de viabilidade econômica, visando o desenvolvimento de processos em escala piloto ou industrial

Com relação a metodologia utilizada, a hidrometalurgia é a mais aplicada às lâmpadas, como à maioria dos resíduos eletroeletrônicos, podendo também estar associada a processos térmicos, como pirolise e incineração (MAAREFVAND et al., 2020; ZHOU et al., 2019).

Pourhossein & Mousavi (2018 e 2019) avaliaram a biolixiviação de Ga, Cu e Ni, onde os autores obtiveram resultados satisfatórios ao reduzir o tempo de processo de 30 para 15 dias, porém ainda assim, a biometalurgia demanda tempo demasiadamente maior em relação a outras técnicas. Sendo assim, processos mais simples e com menor gasto de energia devem ser desenvolvidos para que seja visto como incentivo sua aplicação sob o ponto de vista econômico e prático.

## 5. CONCLUSÃO

Considerando o processo de reciclagem de lâmpadas de LED, àquele que apresenta as fases de coleta, desmontagem, segregação, recuperação e disposição final, não foram encontrados artigos que tratam o assunto de maneira integrada. A operacionalização da coleta e transporte não foi apresentada em nenhum estudo, ponto que deve ser analisado, visto que esta etapa tem potencial para inviabilização da logística reversa, por esbarrar com barreiras regulatórias, como a cobrança exacerbada de impostos. A desmontagem e segregação foram investigadas, mas não há um consenso sobre a necessidade, a partir de uma perspectiva econômica, de processamento mecânico ou manual.

Com relação aos processos de reciclagem, a caracterização das lâmpadas de LED deve apresentar foco também em elementos perigosos e não apenas em metais preciosos, como vem sendo amplamente observado. Metodologias que exploram a criticidade, toxicidade e reciclabilidade de diferentes elementos encontrados em lâmpadas de LED propiciam a elaboração de melhores estratégias de reciclagem, culminando em novas necessidades como adaptações para transporte, armazenamento e até mudança de design. O design (projeção de algo) nesse caso não tem caráter puramente estético, mas sim, deve ser pensado como algo para uma finalidade distinta, a qual deve servir a facilitar o processo de Mineração Urbana anteriormente citado. Desse modo, temos os termos associados ao DfX (*Design For/Design para*), podendo ser DfA (*Assembly/Montagem*), DfM (*Manufacturing/Manufatura*), DfD (*Disassembly/Desmontagem*) ou DfE (*Environment/Meio Ambiente*) (Kuo et al., 2001) Apesar de não ser objetivo principal deste trabalho, a aplicação de eco design ao LED, poderia contribuir para o aumento da reciclabilidade e da valorização de materiais como os plásticos.

É válido destacar, que grande parte dos estudos trata as lâmpadas de LED inservíveis como resíduos compostos majoritariamente de metais, porém REBELLO et al. (2020) constatou a partir de classificação gravimétrica que a fração polimérica ocupa 37,0% de sua composição, sendo o material mais abundante dela. Diante disso, poucos estudos foram observados sobre a reciclagem de polímeros e como esta pode influenciar na viabilidade de todo o processo (ZHU et al., 2020).

Nos estudos investigados, há um destaque evidente para eficiência de processos em escalas laboratoriais, porém nota-se a falta de foco no desenvolvimento de plantas pilotos ou industriais. Entre as metodologias citadas, a hidrometalurgia é notavelmente a técnica que apresenta mais abordagens, porém ainda é necessário o avanço no uso de ácidos alternativos, menos poluentes e perigosos. Outras iniciativas devem surgir em direção ao desenvolvimento de processos biometalúrgicos, porém este por si só apresenta barreiras para a aplicação em escalas maiores. Zhuang et al. (2015) alerta que para o aumento da eficiência desta técnica, é necessário compreender as interações microrganismo-metal a partir de suas características individuais.

Também é válido salientar que, não foram relatados estudos que apresentem eletrometalurgia como processo de extração de metais de lâmpadas de LED, técnica que é frequentemente usada na mineração urbana. Contudo, há um esforço da comunidade científica em identificar as melhores rotas de recuperação, bem como seus parâmetros ótimos. Uma outra perspectiva sobre o tema pode ser o estudo da combinação desses processos, além de compreender como seus usos poderiam ser melhor empregados para cada tipo de resíduo, inclusive para lâmpadas de LED.

Grande parte dos trabalhos citados, incluem alguma etapa de aquecimento, seja na lixiviação ou como pré-tratamento, acarretando maior gasto energético, fato este, que corrobora para a necessidade de estudos visando a otimização dos parâmetros operacionais. Fatores como o consumo de reagentes e tempo de lixiviação, por exemplo, interferem no processo de maneira a torná-lo economicamente viável ou não. Deve-se destacar também que, a geração de efluentes após o tratamento e sua possibilidade de reutilização precisa ser contabilizada, visando o estabelecimento de uma rota de tratamento em escala industrial.

Dentre outros pontos não apresentados nos estudos, deve-se investigar a possibilidade de tratar lâmpadas de LED de maneira similar às fluorescentes, visualizando a perspectiva de aproveitamento de estruturas produtivas já instaladas para este fim. Outra possibilidade é a junção

de resíduos similares às lâmpadas de LED em concordância com pesquisa realizada por NAGY et al. (2017), o qual demonstra a oportunidade de recuperação de terras raras como o Ga, a partir de LEDs provenientes de televisores.

A ocorrência de incentivos públicos tanto fiscais, quanto monetários para a substituição de lâmpadas convencionais já se apresenta com uma tendência mundialmente estabelecida visando a redução no consumo de energia, sendo assim, o consumo de lâmpadas de LED só tende a crescer, tornando ainda mais importante o estabelecimento de logística reversa adequada e a utilização deste resíduo como fonte secundária proveniente da mineração urbana.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CETEM e ao CNPq pela bolsa concedida. Projeto CNPq n° 400555/2020-4.

## 7. REFERÊNCIAS

1. ANNONI, R.; LANGE, L. C.; AMARAL, M. C. S.; SILVA, A. M.; ASSUNÇÃO, M. C.; FRANCO, M. B.; SOUZA, W. Light emitting diode waste: potential of metals concentration and acid reuse via the integration of leaching and membrane processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 246, p. 1-11, 2020.
2. CENCI, M. P.; BERTO, F. C. D.; SCHNEIDER, E. L.; VEIT, H. M.. Assessment of LED lamps components and materials for a recycling perspective. **Waste Management**, v. 107, p. 285-293, 2020.
3. CHEN, W-S.; HSU, L.; WANG, L. Recycling the GaN Waste from LED Industry by Pressurized Leaching Method. **Metals**, v. 8, n. 10, p. 861-873, 2018.
4. DOS SANTOS, E. C. A.; SILVEIRA, T. A.; COLLING, A. V.; MORAES, C. A. M.; BREHM, F. A. Recycling Processes for the Recovery of Metal from E-waste of the LED Industry. **E-waste Recycling and Management**, p. 159-177, 2019.
5. ERKMAN, S. (1997): Industrial ecology: an historical view. *Journal of Cleaner Production*, v.5, n. 1/2, p. 1-10
6. FANG, S.; YAN, W.; CAO, H.; SONG, Q.; ZHANG, Y.; SUN, Z.. Evaluation on end-of-life LEDs by understanding the criticality and recyclability for metals recycling. **Journal Of Cleaner Production**, v. 182, p. 624-633, 2018.
7. GUPTA, B., MUDHAR, N., BEGUM I., Z., SINGH, I. Extraction and recovery of Ga(III) from waste material using Cyanex 923. **Hydrometallurgy J.**,v. 87, p. 18-26, 2007a.
8. GUPTA, B., MUDHAR, N., SINGH, I. Separations and recovery of indium and gallium using bis (2,4,4-trimethylpentyl) phosphinic acid (Cyanex 272). **Separation Purification Technology Journal**, v. 57, p. 294-303, 2007b.
9. HU, S. H., XIE, M. Y., HSIEH, Y. M., LIOU, Y. S., CHEN, W. S. Resource Recycling of Gallium Arsenide Scrap Using Leaching-Selective Precipitation. **Environmental Progress & Sustainable Energy Journal**, v. 34, n. 2, p. 471-475, 2015.
10. KUMAR, A.; KUPPUSAMY, V. K.; HOLUSZKO, M.; SONG, S.; LOSCHIAVO, A. LED lamps waste in Canada: generation and characterization. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 329-336, 2019.
11. KUMARA, A., KUPPUSAMYA, V.K., HOLUSZKOA, M., SONG, S., LOSCHIAVOC, A. "LED lamps waste in Canada: Generation and characterization" *Resources, Conservation Recycling*. ano 2019 n° 146, 2019

12. KUO, Tsai-C.; HUANG, Samuel H.; ZHANG, Hong-C. Design for manufacture and design for 'X': concepts, applications, and perspectives. *Computers & industrial engineering*, v. 41.
13. LIM, S-R.; KANG, D.; OGUNSEITAN, O. A.; SCHOENUNG, J. M. Potential Environmental Impacts of Light-Emitting Diodes (LEDs): metallic resources, toxicity, and hazardous waste classification. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 1, p. 320-327, 2011.
14. LIM, S-R.; KANG, D.; OGUNSEITAN, O. A.; SCHOENUNG, J. M. Potential Environmental Impacts from the Metals in Incandescent, Compact Fluorescent Lamp (CFL), and Light-Emitting Diode (LED) Bulbs. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 2, p. 1040-1047, 2012.
15. MAAREFVAND, M., SHEIBANI, S., RASHCHI, F. Recovery of gallium from waste LEDs by oxidation and subsequent leaching. **Hydrometallurgy J.**, v. 191, 105230, 2020.
16. MARWEDE, M.; CHANCEREL, P.; DEUBZER, O.; JORDAN, R.; NISSEN, N.F.; LANG, K. Mass flows of selected target materials in LED products. **Conference: Electronics Goes Green** p.1-6. 2012.
17. MCDONOUGH, W. e BRAUNGART, M (2013): The Upcycle: Beyond Sustainability - Designing for Abundance.
18. NAGY, S., BOKANYL, L., GOMBKOTO, L., MAGYAR, T. Recycling of gallium from end-of-life light emitting diodes. **Arch. Metall. Mater. J.** v. 62, p. 1161-1166, 2017.
19. OLIVEIRA, R. P.; BOTELHO JUNIOR, A. B.; ESPINOSA, D. C. R. Characterization of Wasted LEDs from Tubular Lamps Focused on Recycling Process by Hydrometallurgy. **Energy Technology 2020: Recycling, Carbon Dioxide Management, and Other Technologies**, p. 317-325, 2020.
20. POURHOSSEIN, F. & MOUSAVI, S. M. Enhancement of copper, nickel, and gallium recovery from LED waste by adaptation of *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **Waste Management**, v. 79, p. 98-108, 2018.
21. POURHOSSEIN, F. & MOUSAVI, S. M. A novel step-wise indirect bioleaching using biogenic ferric agent for enhancement recovery of valuable metals from waste light emitting diode (WLED). **Journal of Hazardous Materials**, v. 378, p. 1-12, 2019.
22. QIU, Y. & SUH, S. Economic feasibility of recycling rare earth oxides from end-of-life lighting technologies. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 150, p. 1-9, 2019.
23. RAHMAN, S.M. M.; KIM, J.; LERONDEL, G.; BOUZIDI, Y.; CLERGET, L. Value Retention Options in Circular Economy: issues and challenges of led lamp preprocessing. **Sustainability**, v. 11, n. 17, p. 4723-4743, 2019.
24. RAHMAN, S.M. Mizanur; KIM, J.; LERONDEL, G.; BOUZIDI, Y.; NOMENYO, K.; CLERGET, L. Missing research focus in end-of-life management of light-emitting diode (LED) lamps. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, p. 256-258, 2017.
25. REBELLO, R. Z.; LIMA, M. T. W. D. C.; YAMANE, L. H.; SIMAN, R. R. Characterization of end-of-life LED lamps for the recovery of precious metals and rare earth elements. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 153, p. 1-7, 2020.
26. SWAIN, B., MISHRA, C., KANG, L., PARK, K. S., LEE, C. G., HONG, H. S., PARK, J. J. Recycling of metal-organic chemical vapor deposition waste of GaN based power device and LED industry by acidic leaching: Process optimization and kinetics study. **Power Sources J.**, v. 281, p. 265-271, 2015.

27. TUENGE, J.R., HOLLomon, B., DILLON, H.E., SNOWDEN-SWAN, L.J. Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products. **Part 3: LED Environmental Testing**, Richland, WA (United States), 2013.
28. XAVIER, L.H., LINS, F.A.F. Mineração Urbana de resíduos eletroeletrônicos: uma nova fronteira a explorar no Brasil. *Brasil Mineral*, n.379. Março, 2018.
29. XAVIER, L.H.; CARVALHO, T.C.M.B. "Gestão de resíduos eletroeletrônicos: uma abordagem prática para a sustentabilidade " 2014. Ed. Elsevier. 240p
30. ZHAN, L.; WANG, Z.; ZHANG, Y.; XU, Z. Recycling of metals (Ga, In, As and Ag) from waste light-emitting diodes in sub/supercritical ethanol. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, p. 1-8, 2020.
31. ZHAN, L.; XIA, F.; YE, Q.; XIANG, X.; XIE, B. Novel recycle technology for recovering rare metals (Ga, In) from waste light-emitting diodes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 299, p. 388-394, 2015.
32. ZHOU, J., ZHU, N., LIU, H., WU, P., ZHANG, X., ZHONG, Z. Recovery of gallium from waste light emitting diodes by oxalic acidic leaching. *Resources, Conservation & Recycling J.*,v. 146, p. 366-372, 2019.
33. ZHU, P.; MA, Y.; WANG, Y.; YANG, Y.; QIAN, G. Separation and recovery of materials from the waste light emitting diode (LED) modules by solvent method. **Journal Of Material Cycles And Waste Management**, p. 1-12, 2020.