



A7th Academic

INTERNATIONAL WORKSHOP
ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

Avaliação do Potencial de Mitigação de Impactos Ambientais Associados à Reciclagem de Leds

SANCHEZ JUNIOR, O. ^{a*}

a. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, São Paulo,

**Corresponding author, osanchez@ipt.br*

Resumo

A crescente demanda por estudos em gestão do lixo eletrônico (e-waste) não tem encontrado respostas significativas nos países da América do Sul, apesar do aumento de consumo de equipamentos eletroeletrônicos, em particular, para serviços de iluminação. Este setor é responsável pelo consumo de aproximadamente 20% da energia elétrica global e estima-se que mais de 15% dele já utiliza LED. Avalia-se que até 2030 o setor tende a se constituir num grande gerador de lixo eletrônico. Estudou-se as rotas de reciclagem de produtos para iluminação a LED disponíveis, para compara-las entre si e com outros processos de destinação, visando identificar potenciais oportunidades de mitigação de impactos associados a cada uma, de forma a subsidiar gestores em suas decisões. Utilizou-se o protocolo de ACV para mapear os impactos ambientais. Procurou-se utilizar modelagem com bases de dados locais, quando disponíveis. Os resultados apontam significantes diferenças na depressão no uso de alguns materiais (como terras raras, germânio, ouro e prata) e impactos ambientais associados à disposição de materiais potencialmente tóxicos (como arsênio, zinco, cobre, níquel, chumbo, ferro e prata). Os resultados variam de acordo com a rota de separação e em função do nicho de aplicação do produto, uma vez que envolve projetos diferentes e uso de diferentes materiais. Concluiu-se que a escolha da rota para reciclagem, comparada com outros processos de destinação, podem mitigar impactos ambientais, mas também podem gerar requisitos de projetos para fabricantes de produtos de iluminação. Estes podem tornar seus produtos mais sustentáveis do ponto de vista ambiental.

Palavras-chave: *reciclagem de LEDs, potencial de mitigação de impactos, rota de reciclagem, reciclagem em iluminação.*

Introdução

A Lei nº 12.305/10, de 02 de agosto de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Esta Lei estabelece que fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de determinado produto que possa causar danos ao meio ambiente ou à saúde humana criem um sistema de recolhimento e destinação final, independente dos sistemas públicos de limpeza urbana. Na cadeia produtiva de iluminação, uma série de negociações foram realizadas desde então, com a participação do MMA, MDIC, ABILUX, ABILUME, dentre outras instituições. Deste debate, surgiu o Acordo Setorial para implantação do Sistema de Logística Reversa de Lâmpadas Fluorescentes de Vapor de Sódio e Mercúrio e de Luz Mista, assinado no dia 27 de novembro de 2014. O objetivo é garantir que a destinação final dos resíduos dessas lâmpadas seja feita de forma ambientalmente adequada e em conformidade com a legislação. Este setor, que consome aproximadamente 20% ou cerca de 118 TWh anuais da matriz de energia elétrica brasileira (CGEE, 2017), vem apresentando mudanças importantes nas tecnologias utilizadas nos produtos e nos conceitos de instalações. Pela observação da Figura 1 é

“CLEANER PRODUCTION FOR ACHIEVING SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS”

possível afirmar que em pouco tempo a tecnologia LED será o principal insumo para projetos de iluminação, o que provavelmente demandará um novo acordo setorial.

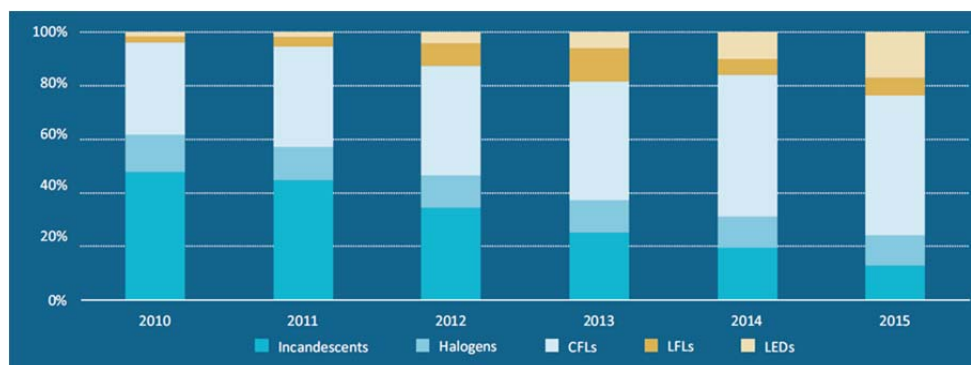


Figura 1: Estimativas de participação de tecnologias de iluminação residencial no mercado global. Fonte: IEA, 2017.

As lâmpadas incandescentes e alógenas (*"incandescents"* e *"halogens"*) tendem ter sua fabricação descontinuada, devido a sua baixa eficiência e à indução da descontinuidade de sua fabricação por políticas públicas setoriais. As lâmpadas fluorescentes compactas (*"CFLs"*), muito usadas em residências, e lâmpadas fluorescentes tubulares (*"LFLs"*), muito usadas no comércio, ainda estão presentes em boa parte do mercado de iluminação em função do seu baixo custo e relativa eficiência. Mas as iniciativas nacionais, como a PNRS, tendem a torná-las desvantajosas e potencializar sua substituição pela tecnologia LED, uma vez que demandam custo de logística reversa, serem mais impactantes ao meio ambiente (contém mais mercúrio que as demais) e serem menos eficientes que a tecnologia LED. Há projeções com apostas de que até 2030, 90% do mercado de iluminação será ocupado pela tecnologia LED (USDOE, 2014; USDOE, 2015).

A despeito do bônus ambiental oferecido pela maior eficiência de produtos a LED, estes não estão livres de impactos ambientais associados às várias fases de seu ciclo de vida. Para uma análise robusta sobre os reais impactos locais e globais de qualquer nova tecnologia ou processo que venha a ser incorporado à cadeia produtiva, é preciso também conhecer se a inovação potencializa ou inibe impactos ambientais em relação à situação vigente, ainda que haja benefícios quanto ao gasto energético para o serviço de iluminação.

É importante ressaltar que os produtos que utilizam LED de luz branca nem sempre são construídos de uma única forma. Em muitos casos, o componente que contém o LED não é construído na forma de uma lâmpada, mas no formato de uma luminária que contém em seu corpo um módulo a LED, especialmente projetado e fabricado para finalidades específicas. Vale dizer que, dependendo do nicho em que se utilizam as lâmpadas ou luminárias a LED de luz branca, o resíduo deste produto deverá apresentar diferentes formas construtivas e materiais constituintes (ANDERSSON, 2005). Como exemplo, pode-se citar lâmpadas e luminárias adaptadas para iluminação pública, iluminação comercial, iluminação residencial, iluminação industrial, iluminação de emergência, dentre outros nichos tecnológicos e de consumo.

Metodologia

O estudo partiu de um diagnóstico sobre os impactos ambientais gerados no ciclo de vida da maioria dos produtos de iluminação a LED, com a técnica de ACV. Na sequência, se realizou um levantamento dos trabalhos recentes sobre reciclagem de resíduos eletrônicos, em especial aqueles gerados pelo uso de LEDs. Um cruzamento das informações permitiu identificar algumas rotas que permitiriam mitigar os impactos ambientais associados com esta tecnologia, que tende a se tornar um paradigma tecnológico para o setor. Finalmente se analisou a possibilidade de potencializar a mitigação de impactos com o investimento em inovações em design de produtos a LED.

Resultados e discussão

Nos últimos 12 anos (a partir de 2006), a aplicação da técnica de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV vem sendo amplamente utilizada para avaliar e comparar tecnologias e serviços de iluminação. Este interesse vem do fato de que esta técnica permite avaliar os impactos ambientais e econômicos associados a todas as principais fases do ciclo de vida de um projeto de iluminação (uso de materiais, fabricação, transporte, instalação, uso, reciclagem e descarte). Devido às inovações tecnológicas anunciarem vantagens quanto à eficiência energética e à mitigação de impactos vinda do menor uso do insumo energia elétrica na fase de uso, muitas dúvidas surgiram em relação a esta afirmação. Poucas referências existiam comparando as tecnologias convencionais, como uso de lâmpadas fluorescentes compactas (que já vinham substituindo as lâmpadas incandescentes), com as novas tecnologias, como o uso de lâmpadas a LEDs. Um estudo amplo realizado pelo Departamento de Energia dos EUA justifica a necessidade de se avaliar ambientalmente esta nova tecnologia de iluminação constituída do uso de LEDs em projetos de iluminação. Na Figura 2 a seguir, compara a presença de vários materiais pela sua massa, em três tipos de tecnologias, para vários modelos de produtos do mercado, totalizados a partir de todo o seu ciclo de vida (25.000 horas de operação).

Apesar do estudo considerar a matriz energética dos EUA, há que se observar a presença preocupante de alguns materiais que, apesar de não ser limitada pela legislação, ultrapassam os limites recomendados pela agência reguladora daquele país. **Antimônio, cobre, chumbo, níquel e zinco** são os materiais com maior presença a merecerem um monitoramento qualificado. Estes materiais podem ser considerados resíduos perigosos (Classe I quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente, segundo a norma ABNT NBR 10.004: 2004), que inevitavelmente acabam indo para o descarte em aterros muitas vezes irregulares.

Observa-se que o **mercúrio**, amplamente disseminado como material nocivo, está longe de ser uma presença significativa em todas as tecnologias. Infelizmente no Brasil não se tem conhecimento de estudo semelhante, mas é possível que se encontre valores maiores devido à desregulamentação no setor e à grande adesão do comércio à fabricação com integração de componentes sem origem rastreada.

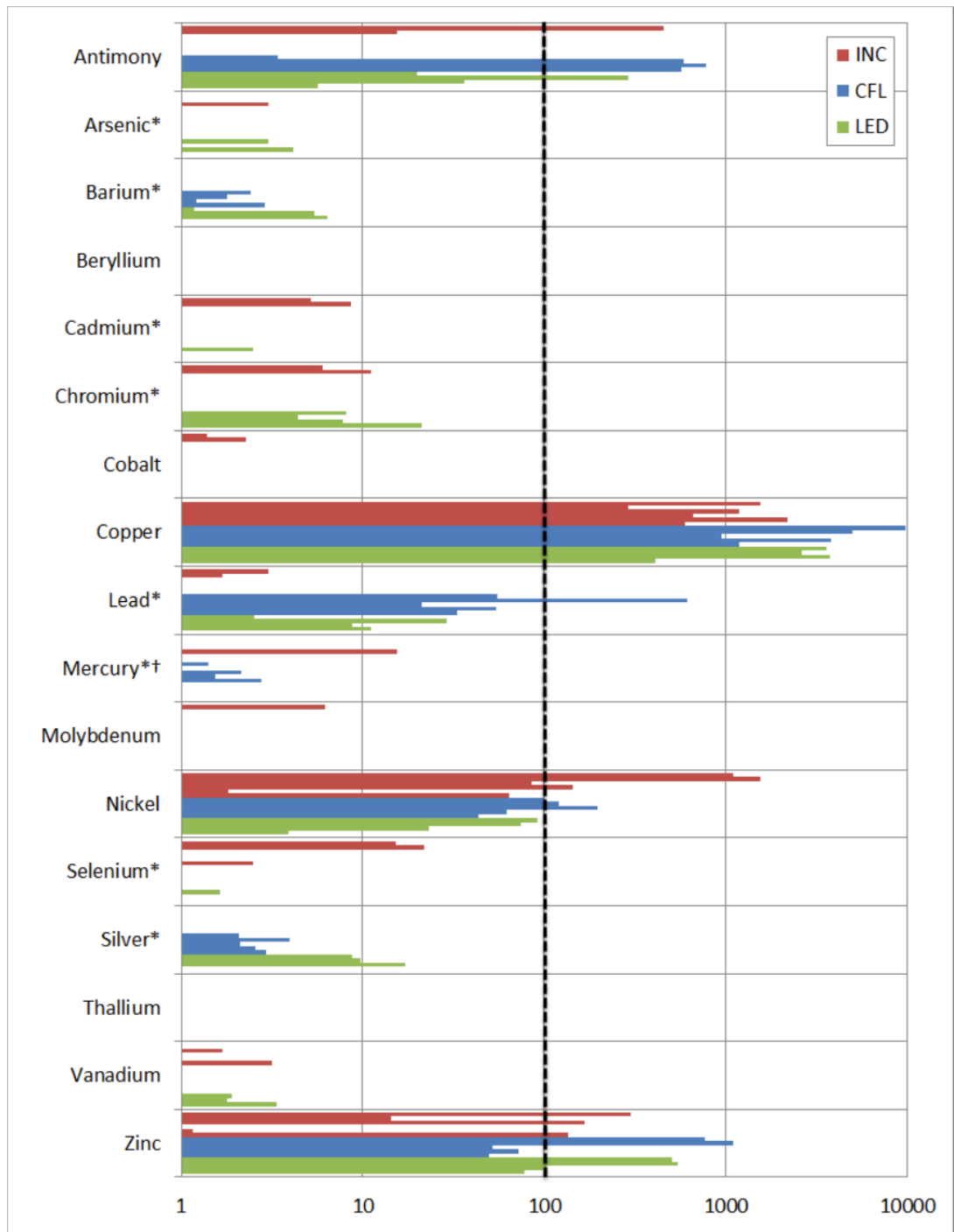


Figura 2: Massa cumulativa para 25.000 horas de operação da lâmpada omnidirecional, como uma parcela dos limites ajustados pela vida derivados dos limiares TTLC (“*Total Threshold Limit Concentration*” da agência EPA americana). * Elemento regulado federalmente. (DOE, 2013).

Considerando os impactos ambientais associados aos materiais utilizados em duas tecnologias para iluminação (Lâmpadas fluorescentes compactas e lâmpadas a LED), para o mesmo serviço e um ciclo de vida de 25.000 horas, observa-se que as inovações representadas pelo uso de lâmpadas a LED estão de fato alinhadas à preocupação de mitigar impactos ambientais e tem evoluído neste sentido. A Figura 3 ilustra este fato, à medida que demonstra o menor impacto ambiental a cada geração da tecnologia a LED. Observa-se ainda a dificuldade de se estabelecer rotas de reciclagem ou minimização de geração para os resíduos considerados não perigosos.

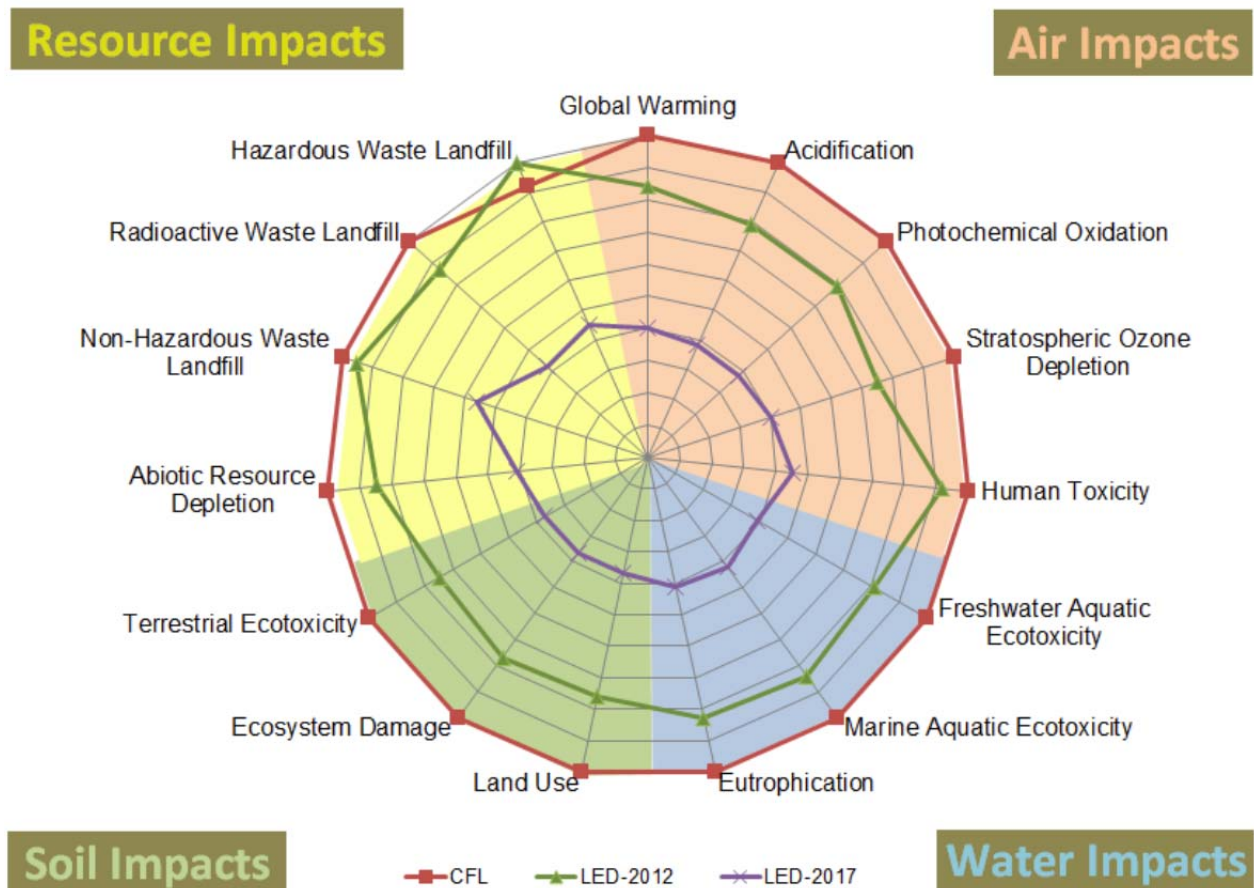


Figura 3: Avaliação do Ciclo de Vida Impactos das Lâmpadas Analisadas Relativamente à CFL (DOE, 2012).

Um levantamento sobre as rotas de reciclagem de produtos eletroeletrônicos (Gassmann et al, 2016), em particular para lâmpadas a LEDs, identificou a diversidade de materiais constituintes nas várias frações separáveis. Revelou também que a separação criteriosa dos pacotes contendo os chips semicondutores constituintes do placa contendo os LEDs demanda ainda investimento em estudos de pesquisa e desenvolvimento. Na Figura 4 estas rotas são representadas.

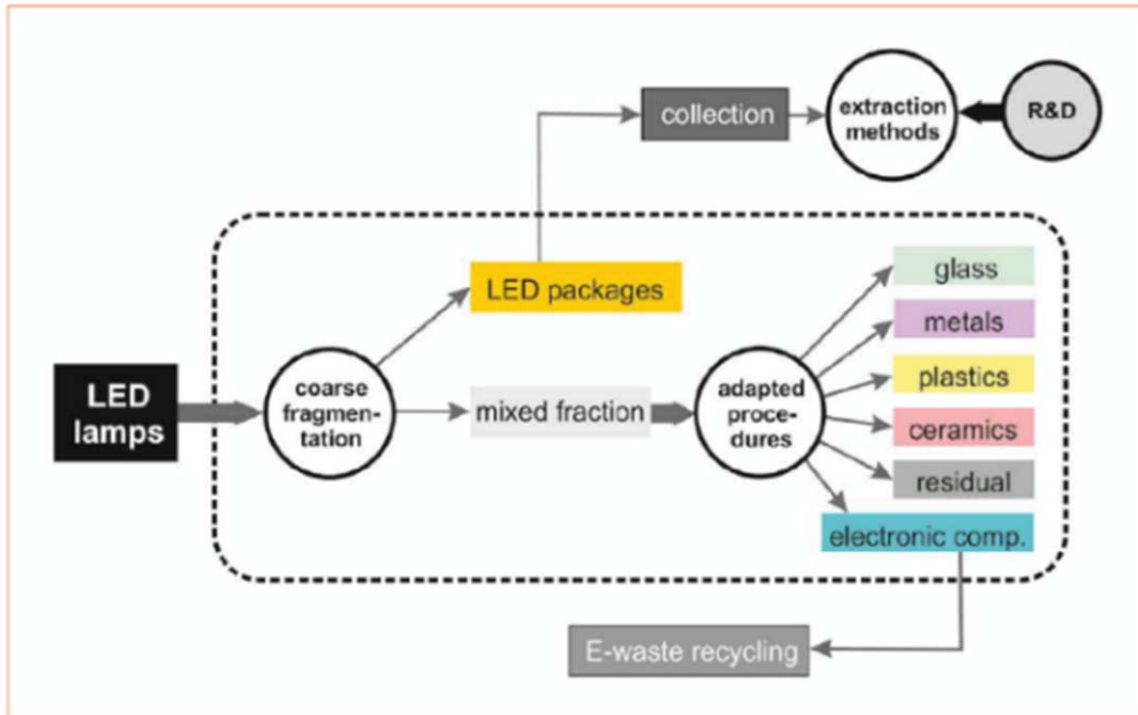


Figura 4: Ilustração esquemática de um processo de reciclagem para lâmpadas LED (Gassmann et al, 2016).

Apesar da existência de poucos estudos a respeito das rotas para recuperação de metais de lâmpadas a LED, é possível identificar aquelas mais promissoras para os principais metais presentes. O trabalho de Van Schaik (2012) mapeia as principais rotas de reciclagem de metais e por este motivo foi referendado pela Comissão Europeia que normaliza e orienta a reciclagem de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (WEEE).

As rotas conhecidas estão resumidas no quadro da Figura 5.

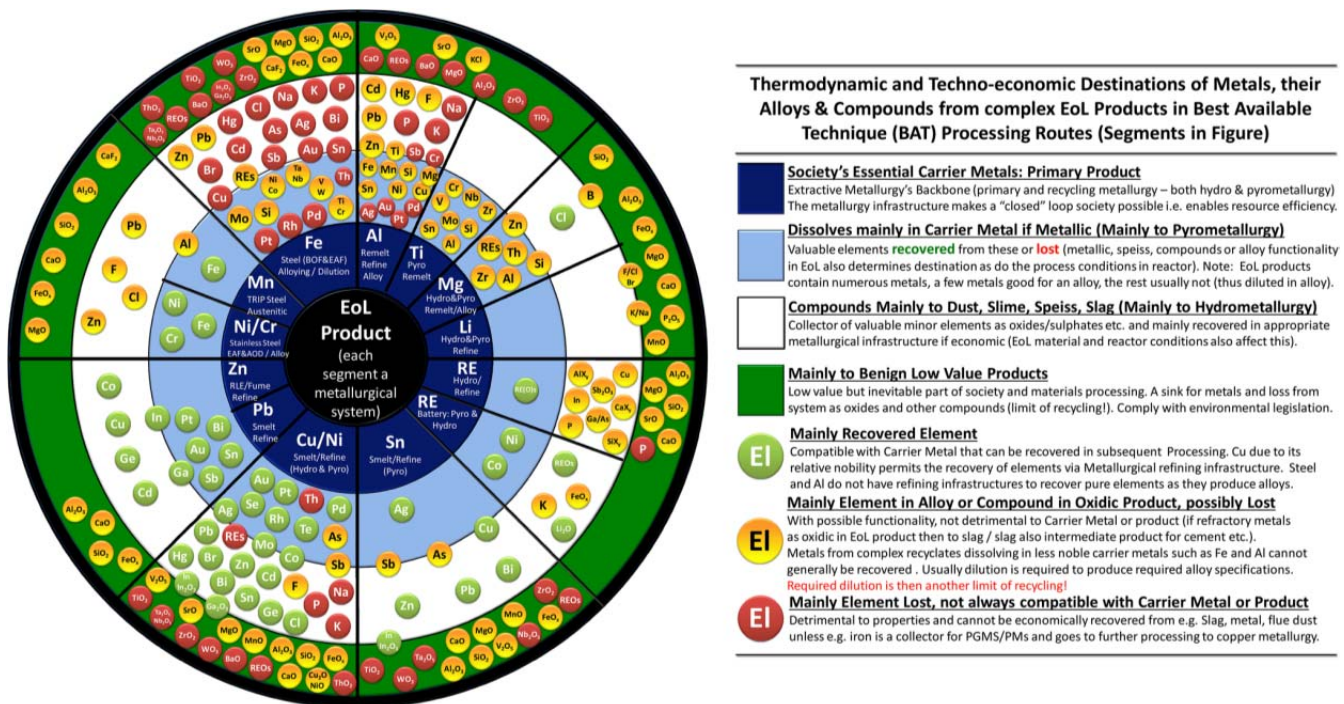


Figura 5: Um esquema de círculos concêntricos localizando de forma geral os metais e suas rotas de separação. Cada segmento tem uma infraestrutura para recuperação eficientemente do produto e, tanto quanto possível, dos elementos metais e compostos presentes em reciclados. Descreve-se as rotas em função da composição e qualidade do reciclagem (determinada por design e pré-processamento), nas formas mais eficientes investigadas. (Van Schaik A, Reuter MA, 2012).

O anel azul escuro indica produto primário (obtido por pirometalurgia e hidrometalurgia). São metais muito presentes na sociedade e são a espinha dorsal da metalurgia extrativa (primária e reciclagem). Neste caso, a própria infraestrutura de metalurgia torna possível a reciclagem. O anel azul claro indica metais dissolvidos (obtido por pirometalurgia). São metais associados à aqueles muito utilizados pela sociedade. Neste caso, a infraestrutura de produção tem soluções próprias para esses metais e são elementos valiosos utilizados em produtos de consumo. O anel branco denota materiais compostos principalmente em pó, lodo e escória (obtidos por hidrometalurgia). A busca da sustentabilidade induz à recuperação destes metais. Neste caso, por serem valiosos, vale a pena a sua reciclagem. O anel verde denota produtos benignos de baixo valor (anel externo). São de baixo valor mas são parte inevitável da sociedade e do processamento de materiais. São tratados para cumprir com legislação ambiental rigorosa.

Os círculos verdes indicam que, basicamente, é elemento reprocessado e recuperado. Os círculos amarelos indicam que se tratam de elementos em ligas ou óxidos, requerem diluições em varias etapas e sua recuperação tem perdas. Os círculos vermelhos indicam basicamente que são elementos não recuperáveis ou cujo processo de recuperação não é economicamente viável.

O cruzamento dos principais materiais gerados em grande quantidade de massa na cadeia produtiva de iluminação a LED e as rotas de reciclagem de metais bem estabelecidas permite gerar a Tabela 1.

Tabela 1: resíduos de reciclagem de LED e possíveis rotas de recuperação. Fonte: realizado pelo autor.

Elemento	Associação	apresentação	Eficiência	rota
Antimônio (Sb)	Ligas de alumínio	Misto entre metais dissolvidos e compostos	Não recuperável ou não econômico	refusão ou refino de ligas
	Estanho	Misto entre metais dissolvidos e compostos	requerem diluições em várias etapas e perdas	pirometalurgia
	Ligas de Cobre/níquel	Misto entre metais dissolvidos e compostos	requerem diluições em várias etapas e perdas	pirometalurgia e hidrometalurgia
	chumbo	Metais dissolvidos	Recuperação com reprocessamento	refusão ou refino direto
	Ferro e aço	Misto entre metais dissolvidos e compostos	Não recuperável ou não econômico	Forno a arco e diluição
Cobre (Cu)	Ligas de alumínio	Metais dissolvidos	requerem diluições em várias etapas e perdas	refusão ou refino de ligas
	Terras raras	Misto entre metais dissolvidos e compostos	requerem diluições em várias etapas e perdas	Refino e hidrometalurgia
	Estanho	Misto entre metais dissolvidos e compostos	Recuperação com reprocessamento	Pirometalurgia
	Zinco e chumbo	Metais compostos	Recuperação com reprocessamento	refusão ou refino direto e deposição em vapor
Chumbo (Pb)	Ligas de alumínio	Metais compostos	requerem diluições em várias etapas e perdas	refusão ou refino de ligas
	Estanho	Metais compostos	Recuperação com reprocessamento	Pirometalurgia
	Ligas de Cobre/níquel	Metais compostos	Recuperação com reprocessamento	pirometalurgia e hidrometalurgia
	Manganês e ligas de níquel/cromo	Metais compostos	requerem diluições em várias etapas e perdas	Forno a arco e metalurgia do aço
	Ferro e aço	Metais compostos	requerem diluições em várias etapas e perdas	Forno a arco e diluição
Níquel (Ni)	Ligas de alumínio	Metais dissolvidos	requerem diluições em várias etapas e perdas	refusão ou refino de ligas
	Terras raras	Metais dissolvidos	Recuperação com reprocessamento	pirometalurgia e hidrometalurgia
	ligas de níquel/cromo	Metais dissolvidos	Recuperação com reprocessamento	Forno a arco e metalurgia do aço
Zinco (Zn)	Manganês	Misto entre metais dissolvidos e compostos	requerem diluições em várias etapas e perdas	pirometalurgia e hidrometalurgia
	Estanho	Metais dissolvidos	Recuperação com reprocessamento	Pirometalurgia
	Ligas de Cobre/níquel	Metais dissolvidos	Recuperação com reprocessamento	pirometalurgia e hidrometalurgia
	Manganês e ligas de níquel/cromo	Metais compostos	requerem diluições em várias etapas e perdas	Forno a arco e metalurgia do aço
	Ferro e aço	Metais compostos	requerem diluições em várias etapas e perdas	Forno a arco e diluição

As células marcadas em amarelo indicam as rotas que possivelmente são as mais promissoras para os resíduos de produtos a LED, com algumas alternativas. O Antimônio (Sb) e o Cobre (Cu) a rota mais promissora é a de refusão e refino, com opção de pirometalurgia para o Cobre (Cu). A pirometalurgia com opção para hidrometalurgia tende a ser uma boa opção para Chumbo (Pb), Níquel (Ni) e Zinco (Zn).

Redução de Impactos Via Alterações no Projeto do Produto

A indústria de iluminação vem apresentando grandes mudanças na sua cadeia produtiva. Muitos fornecedores de componentes e materiais se tornaram importadores. No Brasil, devido à lenta realização do ciclo tecnológico de conversão de produtos convencionais para a tecnologia LED, os fabricantes bem estabelecidos estão obrigados a absorverem rapidamente um conhecimento sobre novos processos de fabricação sob pena de verem sua participação no mercado diminuir rapidamente. No entanto, as dificuldades com a destinação de resíduos de luminárias e lâmpadas a LED oferecem uma oportunidade para que o fabricante nacional pense seus produtos com alternativas que poderiam oferecer melhores soluções e uma nova forma de pensar os processos tradicionais de modo a mitigar os impactos ambientais e para a saúde humana verificados no presente trabalho. Com esta abordagem, buscou-se avaliar algumas alternativas para que os fabricantes possam inovar nos processos geradores dos principais resíduos identificados.

A Tabela 2 apresenta uma lista dos principais resíduos identificados, a função dos materiais geradores do resíduo, os impactos associados a estes elementos e as estratégias conhecidas para a redução de uso ou substituição de modo a manter ou até melhorar a qualidade do produto final.

Tabela 2: Elementos de resíduos e estratégias para sua mitigação no projeto do produto.

Elemento	Utilização	Impactos associados	Estratégias para mitigação no projeto
Antimônio (Sb)	Retardador de chamas (como TBBP-A), remoção de bolhas em vidros (como Antimoniato de sódio), liga para solda sem chumbo (como TBBP-A)	Tóxico para organismos aquáticos. Pode causar efeitos adversos a longo prazo no ambiente aquático. Carcinogênico Categoria 3. Nocivo por inalação, em contato com a pele e por ingestão. Irritante para os olhos.	Projeto de montagem em smd sem soldas ou solda com ligas de combinações de cálcio, cobre, selênio, estrôncio, estanho e enxofre, sem chumbo.
Cobre (Cu)	Para conectores de circuitos integrados e placas (como liga de Cobre-Berílio), fiação interna (ligas de Cobre)	Carcinogênico Categoria 2, muito tóxico por inalação e tóxico por ingestão. Distúrbios gastrointestinais; colapso dos rins e do fígado.	Uso de conectores com liga grafite-magnésio. Uso de alumínio e suas ligas para fiação.
Chumbo (Pb)	Para soldas e integração de componentes	Desenvolvimento cognitivo prejudicado para crianças; hipertensão em adultos	Projeto de circuitos com smd. O trióxido de antimônio é usado como uma alternativa de solda sem chumbo junto com o estanho, por exemplo em cabeamento. Nesses produtos, o teor de antimônio representa menos de 0,2% do peso total. Uso de sistema de ligas Sn-Ag-Cu (ponto de fusão próximo)
Níquel (Ni)	Coadjuvante na adição de ferro e ligas, para obtenção de peças metálicas com resistência mecânica e condução de calor	Carcinogênico (atua diretamente na mutação genética)	Reprojeto dos processos de aplicação de banho de níquel em peças metálicas e uso de processo alternativo envolvendo manganês e nitrogênio
Zinco (Zn)	Revestimentos resistentes à corrosão, em baterias secas, em ligas (misturas de metais), como latão e bronze, e na fabricação de tintas, plásticos, borrachas, corantes, conservantes de madeira e cosméticos	Liberações de zinco podem afetar significativamente os ambientes aquáticos locais - acumulando-se em organismos aquáticos (mas não em plantas) e envenenando espécies que os comem. Consumo excessivo pode levar a efeitos que incluem náusea e cólicas estomacais. A exposição prolongada a altas concentrações pode causar "febre do metal", que afeta os pulmões e o sistema de controle de temperatura do corpo.	Reprojeto de processos industriais de deposição de zinco para processos de deposição de ligas de titânio, cobre e níquel. Desenvolvimento de processo de proteção superficial com uso de plásticos.

Para muitas substâncias identificadas, as avaliações de risco da legislação vigente não estão previstas ou estão em estudo. No entanto, com base nos dados apresentados neste relatório, pode-se concluir que existem substâncias que devem ser examinadas para inclusão em políticas de substituição, por existirem alternativas que oferecem vantagens ambientais.

Conclusões

O trabalho permitiu a obtenção de um ponto de partida para analisar o que pode vir a se tornar uma cadeia reversa para a cadeia produtiva de iluminação a LED. As análises foram restritas aos resíduos de maior volume gerado mas é preciso ainda investir em pesquisa para explorar as possibilidades para recuperação de materiais preciosos, como Ouro (Au) e Prata (Ag), materiais cuja recuperação compensa o custo, como Galio (Ga) e Índio (IN), além das Terras Raras (Gd, Ce, Tb, Eu, Y, La, Sm, Lu, Tm, Dy). Nestes casos, as técnicas podem evoluir permitindo maior eficiência, levando a sua viabilidade econômica e mitigação dos impactos ambientais associados à sua escassez.

Referências

- ANDERSSON, E., 2005, Hazardous Substances In Electrical And Electronic Equipment (Eee) - Expanding The Scope Of The Rohs Directive, Project Report, Department of Applied Environmental Science at Göteborg University.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, ABNT NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro/RJ;
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS- CGEE, 2017, Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica: Evolução tecnológica nacional no segmento de eficiência energética. Brasília, DF, 216 p;
- GASSMANN, A., ZIMMERMANN, J., GAUß, R., STAUBER, R., GUTFLEISCH, O., 2016, LED Lamps Recycling Technology for a Circular Economy, LED professional Review Magazine - LpR Article;
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA, 2017, Tracking Clean Energy Progress 2017 - Energy Technology Perspectives 2017 Excerpt; France;
- NARDELLI, A., DEUSCHLE, E., AZEVEDO, L.D., PESSOA, J.L.N., GHISI, E., 2017, Assessment of Light Emitting Diodes technology for general lighting: A critical review; Renewable and Sustainable Energy Reviews; Volume 75; Pages 368-379; ISSN 1364-0321; <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.002>;
- REUTER, M. A., VAN SCHAİK, A., 2015, Product-Centric Simulation-Based Design for Recycling: Case of LED Lamp Recycling, J. Sustain. Metall, 1:4–28, DOI 10.1007/s40831-014-0006-0.
- U.S. DOE – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012, Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products, Part 2: LED Manufacturing and Performance. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Washington, DC. Retrieved from http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/tech_reports.html;
- U.S. DOE – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2013, Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products Part 3: LED Environmental Testing, U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Washington, DC., Retrieved from www.ssl.energy.gov/tech_reports.html.
- U.S. DOE – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2014, Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications;
- U.S. DOE – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2015, LED Basics;
- VAN SCHAİK, A., REUTER, M.A., 2012, Shredding, sorting and recovery of metals from WEEE: linking design to resource efficiency. In: Goodship V, Stevels A (eds) Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook, Woodhead Publishing Limited, Elsevier BV, Cambridge, p 163–211.