

A REVOLUÇÃO SILENCIOSA DA ILUMINAÇÃO: DESAFIOS E OPORTUNIDADES DA ECONOMIA CIRCULAR PARA O LED NO BRASIL

OSWALDO SANCHEZ JUNIOR

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT

MARIANA FONSECA VELOSO SILVA

UNIVERSIDADE CÂNDIDO MENDES

KELVIS DO NASCIMENTO BARROS

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP

CAMILA OLIVEIRA DIAS

Introdução

A pressão ambiental do modelo econômico linear exige novos paradigmas sustentáveis. A economia circular propõe transição para sistema regenerativo, mantendo recursos em uso através de reutilização e reciclagem eficientes. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) mensura impactos ambientais. Na indústria tecnológica, especialmente LEDs, o Brasil movimentou US\$ 111,57 bilhões em 2024, com crescimento previsto de 11,35% até 2029. LEDs economizam mais de 50% energia e duram 4x mais que lâmpadas convencionais, alinhando-se às metas climáticas internacionais, mas exigem gestão circular de resíduos.

Problema de Pesquisa e Objetivo

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de um produto, conforme a norma ISO 14040, é uma metodologia que quantifica os impactos ambientais de todas as suas fases, da matéria-prima ao descarte. Em LEDs, a alta eficiência energética proporciona benefícios ambientais que superam os impactos negativos de outras fases, como a redução de emissões de CO₂. No entanto, a fabricação é um ponto crítico, pois utiliza materiais raros e processos intensivos em energia, resultando em impactos significativos em categorias como toxicidade e esgotamento de recursos.

Fundamentação Teórica

O design para a circularidade representa um dos pilares fundamentais para a implementação bem-sucedida da economia circular no setor de iluminação LED. Esta abordagem, alinhada com os princípios estabelecidos pela Ellen MacArthur Foundation (2019), envolve a consideração de aspectos ambientais desde as fases iniciais de concepção do produto, integrando critérios de sustentabilidade que se estendem por todo o ciclo de vida.

Metodologia

Baseado na estrutura da ISO 14040, a ACV quantifica impactos ambientais de produtos durante todo ciclo de vida completo. Estudos acadêmicos mostram que benefícios da alta eficiência energética dos LEDs superam impactos negativos na maioria das categorias, reduzindo CO₂ e poluentes significativamente. Porém, a fabricação apresenta desafios críticos: usa materiais raros e processos industriais intensivos, causando toxicidade humana, ecotoxicidade e depleção de recursos abióticos. A crescente demanda intensifica extração de terras raras, gerando pressões geopolíticas e ambientais globais.

Análise e Discussão dos Resultados

A economia circular da Ellen MacArthur Foundation prioriza longevidade, reparabilidade, reutilização e reciclagem nos produtos LED. O design circular inclui modularidade para facilitar manutenção e prolongar vida útil significativamente. Desafio principal: localizar cadeia produtiva global (chips orientais, drivers europeus/EUA) para desenvolver componentes nacionais de maior valor agregado. A Política Nacional de Resíduos Sólidos exige logística reversa para produtos eletroeletrônicos. Implementação requer redes estruturadas de coleta residencial e institucional, seguindo experiência europeia

Considerações Finais

A implementação da economia circular para LEDs no Brasil enfrenta desafios regulatórios significativos: ausência de normas específicas e complexidade da cadeia de suprimentos criam incertezas para investimentos. Desafios tecnológicos incluem reciclagem complexa de semicondutores e elementos de terras raras, exigindo equipamentos especializados e capacitação técnica. Oportunidades surgem com modelos inovadores como "iluminação como serviço" (LaaS), onde fabricantes mantêm propriedade. O Brasil possui ecossistema de P&D promissor, com Rede ACV e IPT contribuindo para metodologias eficazes.

Referências

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998
BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). 2023. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards the circular economy: economic and business rationale for an accelerated transition. 2019. EUROPEAN COMMISSION. Waste electrical and electronic equipment (WEEE). 2023. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.

Palavras Chave

Circularidade na Iluminação a LED, reutilização, reciclagem e recuperação, Avaliação do Ciclo de Vida de Produto

Agradecimento a órgão de fomento

IPT - EN - LGE USP - IEA - CSCG UNICAMP - NIPE - CECPIIL

A REVOLUÇÃO SILENCIOSA DA ILUMINAÇÃO: DESAFIOS E OPORTUNIDADES DA ECONOMIA CIRCULAR PARA O LED NO BRASIL

1 INTRODUÇÃO

A crescente pressão ambiental decorrente do modelo econômico tradicional, baseado na extração crescente de recursos naturais e na geração de resíduos, evidencia a necessidade urgente de novos paradigmas para a produção e o consumo. A economia circular surge como uma proposta inovadora que visa a transição do modelo linear — caracterizado pelo ciclo “extrair, produzir, consumir e descartar” — para um sistema regenerativo e sustentável, onde os recursos são mantidos em uso pelo máximo de tempo possível por meio da reutilização, reciclagem e recuperação de materiais (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2019). Essa abordagem contribui para minimizar os impactos ambientais negativos, reduzir a demanda por matérias-primas virgens e estimular a inovação em processos produtivos e modelos de negócios.

Neste contexto, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), baseada nas normas ISO 14040 e 14044 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006a; 2006b), desponta como uma ferramenta fundamental para mensurar e compreender os impactos ambientais associados a diferentes fases do ciclo de vida dos produtos, possibilitando decisões mais conscientes e estratégias eficazes voltadas para a sustentabilidade. O presente artigo discute os fundamentos da economia circular, destacando sua aplicação na indústria tecnológica, com foco em produtos de alta relevância ambiental, como os sistemas de iluminação baseados em LED, visto que, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) trouxe à tona a necessidade de implantar sistemas de logística reversa para produtos de iluminação, ainda incipientes no Brasil. A análise contempla desafios, benefícios e perspectivas para a implementação de práticas circulares que impulsionam o desenvolvimento sustentável e promovem a inovação.

Segundo o “Estudo de Mercado de Iluminação LED,” divulgado pelo Mordor Intelligence (2024), no Brasil, o mercado de iluminação a LED movimentou, em 2024, aproximadamente US\$ 111,57 bilhões, com perspectiva de um crescimento ainda maior, cerca de 11,35% até 2029, resultando em uma significativa economia de energia de mais de 50% e uma vida útil que pode ser quatro vezes maior que lâmpadas convencionais. Essa transição não é apenas um avanço comercial, mas uma estratégia alinhada a metas internacionais para a mitigação das mudanças climáticas, como as estabelecidas no Pacto Verde Europeu e nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. No entanto, essa revolução tecnológica introduz um desafio complexo e crescente: o gerenciamento de resíduos e a necessidade urgente de uma economia circular para o setor.

2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV): A LENTE ANALÍTICA PARA A SUSTENTABILIDADE DO LED

Com base na estrutura da ISO 14040 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006a), um estudo ou projeto de ACV é a “compilação e avaliação das entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida,” ou seja, é uma metodologia que permite quantificar os impactos ambientais associados a todas as fases de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas até o fim da vida útil, de acordo com a dissertação de Pesquisador do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (SANCHEZ JUNIOR, 2010).

A análise de estudos acadêmicos nacionais e internacionais demonstra que, para a maioria das categorias de impacto, os benefícios ambientais proporcionados pela alta eficiência energética dos LEDs superam significativamente os impactos negativos das demais fases. A redução do consumo de eletricidade se traduz em uma menor necessidade de geração de energia, o que, por sua vez, diminui as emissões de CO₂ e outros poluentes, especialmente em países com matrizes energéticas baseadas em combustíveis fósseis.

Contudo, uma compreensão mais aprofundada do problema demonstra que essa compensação não é universal. A fase de fabricação apresenta desafios críticos, visto que, a produção de LEDs envolve o uso de materiais raros e processos industriais intensivos em energia, resultando em impactos significativos nas categorias de toxicidade humana, ecotoxicidade e depleção de recursos abióticos (SANCHEZ JUNIOR, 2010). Além disso, a crescente demanda por estes dispositivos tem intensificado a extração de elementos de terras raras, criando pressões geopolíticas e ambientais em regiões específicas do mundo.

3 A ECONOMIA CIRCULAR COMO RESPOSTA AOS DESAFIOS DOS LEDs

A economia circular, conforme definida pela Ellen MacArthur Foundation (2019), propõe uma mudança fundamental na forma como projetamos, produzimos e consumimos produtos, priorizando a longevidade, reparabilidade, reutilização e reciclagem. No contexto dos LEDs, essa abordagem se traduz em estratégias específicas que abordam os desafios identificados na ACV, desde o design para a durabilidade até a implementação de sistemas eficazes de coleta e reciclagem.

3.1 Design para a Circularidade

O design para a circularidade representa um dos pilares fundamentais para a implementação bem-sucedida da economia circular no setor de iluminação LED. Esta abordagem, alinhada com os princípios estabelecidos pela Ellen MacArthur Foundation (2019), envolve a consideração de aspectos ambientais desde as fases iniciais de concepção do produto, integrando critérios de sustentabilidade que se estendem por todo o ciclo de vida.

A modularidade emerge como uma estratégia essencial neste contexto. Luminárias LED projetadas com componentes modulares facilitam a manutenção, o reparo e a atualização, prolongando significativamente a vida útil do produto e reduzindo a necessidade de substituição completa. Esta abordagem não apenas diminui o volume de resíduos gerados, mas também otimiza o uso de recursos, criando oportunidades para novos modelos de negócios baseados em serviços de manutenção e atualização.

Outra questão, pouco conhecida, deve-se à estrutura da cadeia produtiva para estes produtos. Boa parte da indústria nacional vem se transformando em integradores de componentes. A cadeia produtiva é global e, portanto, há componentes de diferentes origens e distâncias, alguns (essenciais) como o chip LED vêm dos países orientais. Outros componentes, como os controladores (drivers) vêm de países europeus ou dois EUA. Portanto, um desafio para a circularidade é “localizar” a cadeia produtiva, absorvendo cada vez mais os seus elos para capacitar e qualificar a produção local, principalmente para os componentes de maior valor agregado. Esta abordagem demanda que o “projeto do produto” considere os materiais locais ou pelo menos o reaproveitamento dos resíduos de descarte em outras cadeias produtivas. Isso demanda também uma circularidade entre cadeias produtivas.

3.2 Logística Reversa e Reciclagem

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) estabelece a obrigatoriedade da implementação de sistemas de logística reversa para diversos produtos, incluindo equipamentos eletroeletrônicos. No contexto dos LEDs, essa regulamentação representa tanto um desafio quanto uma oportunidade para o desenvolvimento de cadeias circulares eficientes.

A implementação efetiva da logística reversa para LEDs requer a estruturação de redes de coleta que abranjam desde consumidores residenciais até grandes consumidores institucionais. A experiência europeia com a Diretiva WEEE (EUROPEAN COMMISSION, 2023) oferece insights valiosos sobre como estruturar sistemas eficazes de coleta e tratamento de resíduos eletroeletrônicos, incluindo produtos de iluminação.

4 DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DA ECONOMIA CIRCULAR PARA LEDs NO BRASIL

4.1 Desafios Regulatórios e Institucionais

Embora a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) estabeleça o marco legal para a logística reversa, a implementação prática de sistemas eficazes para produtos de iluminação LED ainda enfrenta diversos obstáculos. A ausência de regulamentações específicas para LEDs, combinada com a complexidade da cadeia de suprimentos, cria incertezas regulatórias que dificultam investimentos em infraestrutura de reciclagem.

O Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (BRASIL, 2023) tem trabalhado na elaboração de diretrizes mais específicas para a gestão de resíduos eletroeletrônicos, incluindo produtos de iluminação. No entanto, a harmonização entre diferentes níveis de governo e a coordenação com o setor privado permanecem como desafios significativos.

4.2 Desafios Tecnológicos

A reciclagem de LEDs apresenta desafios técnicos específicos relacionados à complexidade dos materiais utilizados e à miniaturização dos componentes. Diferentemente de lâmpadas convencionais, os LEDs incorporam semicondutores, elementos de terras raras e outros materiais de alto valor que requerem processos de recuperação especializados.

A separação eficiente destes materiais demanda tecnologias avançadas e investimentos significativos em equipamentos e capacitação técnica. Além disso, a variabilidade nos designs e composições dos diferentes fabricantes complica o desenvolvimento de processos de reciclagem padronizados.

5 OPORTUNIDADES E PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1 Inovação em Modelos de Negócios

A transição para a economia circular no setor de LEDs cria oportunidades para o desenvolvimento de modelos de negócios inovadores. O conceito de “iluminação como serviço” (LaaS - Lighting as a Service), já implementado por empresas como a Philips (2023), representa uma mudança paradigmática que alinha os interesses econômicos dos fornecedores com os objetivos de sustentabilidade.

Neste modelo, os fabricantes mantêm a propriedade dos equipamentos de iluminação, oferecendo aos clientes serviços de iluminação com garantia de performance. Esta abordagem incentiva o design para a durabilidade e eficiência, além de facilitar a recuperação de materiais ao final da vida útil dos produtos.

5.2 Desenvolvimento de Capacidades Técnicas

O Brasil possui um ecossistema de pesquisa e desenvolvimento com potencial significativo para contribuir com soluções inovadoras para os desafios da economia circular em LEDs. A Rede ACV (REDE ACV, 2023) tem desempenhado um papel importante na disseminação de metodologias de avaliação ambiental, fornecendo as bases técnicas necessárias para a tomada de decisões informadas.

Instituições de pesquisa como o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), por meio de trabalhos como o desenvolvido por Sanchez Junior (2010), têm contribuído para a compreensão dos impactos ambientais dos sistemas de iluminação, fornecendo subsídios técnicos para o desenvolvimento de políticas e estratégias mais eficazes.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implementação da economia circular para LEDs no Brasil representa um desafio multifacetado que requer a coordenação de esforços entre governo, indústria, academia e sociedade civil. Os benefícios potenciais, tanto ambientais quanto econômicos, justificam os investimentos necessários para superar os obstáculos identificados.

A experiência internacional, particularmente a europeia com a implementação da Diretiva WEEE (EUROPEAN COMMISSION, 2023), oferece lições valiosas sobre como estruturar sistemas eficazes de gestão de resíduos eletroeletrônicos. No entanto, a adaptação dessas experiências ao contexto brasileiro requer consideração das especificidades locais, incluindo aspectos regulatórios, econômicos e sociais.

O desenvolvimento de uma economia circular efetiva para LEDs no Brasil não apenas contribuirá para a redução dos impactos ambientais do setor de iluminação, mas também posicionará o país como referência em sustentabilidade e inovação tecnológica, criando oportunidades para o desenvolvimento de novas competências e a geração de valor econômico sustentável.

A avaliação do ciclo de vida, conforme preconizado pelas normas ISO 14040 e 14044 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2006a; 2006b), continuará sendo uma ferramenta essencial para monitorar o progresso e orientar as decisões estratégicas neste processo de transição. A integração de princípios circulares desde as fases iniciais de design, combinada com sistemas eficazes de logística reversa e reciclagem, representa o caminho mais promissor para a construção de um futuro sustentável para o setor de iluminação LED no Brasil.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 10 out. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/politica-nacional-de-residuos-solidos-pnrs>. Acesso em: 10 out. 2023.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the circular economy: economic and business rationale for an accelerated transition**. 2019. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>. Acesso em: 10 out. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Waste electrical and electronic equipment (WEEE)**. 2023. Disponível em: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_en. Acesso em: 10 out. 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework**. 2nd ed. Switzerland: ISO, 2006a. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/37456.html>. Acesso em: 10 out. 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14044: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines**. 1st ed. Switzerland: ISO, 2006b. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/38498/17324bfe9ec44e27a2f84e1a8ac3ca26/ISO-14044-2006.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

MORDOR INTELLIGENCE. **Tamanho do mercado de iluminação LED e análise de participação – Tendências e previsões de crescimento (2024 – 2029)**. 2024. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/led-lighting-market>. Acesso em: 10 out. 2023.

PHILIPS. **Quebrar o ciclo vicioso com iluminação circular**. 2023. Disponível em: <https://www.lighting.philips.pt/assistencia/blogue/design/taking-a-circular-lighting-approach>. Acesso em: 10 out. 2023.

REDE ACV. **Avaliação do Ciclo de Vida: requisitos ISO 14040 X Prática; Recomendações da Rede ACV para Questões Subjetivas**. 2023. Disponível em: <https://redeacv.org.br/files/2e434a19d2f7ac3e58e90ad538cbde8f.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

SANCHEZ JUNIOR, O. **Desenvolvimento de Inventário de Avaliação do Ciclo de Vida de Luminárias para Iluminação Pública**. 2010. 183f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2010.