

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LUCAS ANTUNES LOUREIRO

Circularidade de luminárias LED para vias públicas no Brasil

São Carlos

2022

LUCAS ANTUNES LOUREIRO

Circularidade de luminárias LED para vias públicas no Brasil

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientadora: Prof. Dr^a. Janaina Mascarenhas Hornos da Costa

Coorientador: Me. Raphael Laraia Rocha de Barros Cobra

São Carlos

2022

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

AL892c Antunes Loureiro, Lucas
Circularidade de luminárias LED para vias públicas no Brasil / Lucas Antunes Loureiro; orientadora Janaina Mascarenhas Hornos da Costa; coorientador Raphael Laraia Rocha de Barros Cobra. São Carlos, 2022.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

1. Economia Circular. 2. Iluminação LED.
3. Resíduos de Iluminação. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Lucas Antunes Loureiro**

Data da Defesa: 07/01/2022

Comissão Julgadora:

Resultado:

Janaina Mascarenhas Hornos da Costa (Orientador(a))

a p r o v a d o

Raphael Laraia Rocha de Barros Cobra (Co-orientador(a))

a p r o v a d o

Oswaldo Sanchez Junior

a p r o v a d o

Bruno Santos Ferreira

a p r o v a d o



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais. No limite das suas
forças, sempre me apontaram o que
é divino nesta vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que conseguiram ver além de mim nos meus piores momentos. Nas vezes que eu travei, que me perdia, que queria deixar tudo para trás. Como pode o olhar ser algo tão terno e acolhedor? Agradeço a Deus por primeiro nisso e por ser exemplo de virtude aos que vem em seguida.

Agradeço aos meus pais, pela compreensão e tato sem medida.

Agradeço ao Raphael pelo exercício contínuo de paciência que foi me acompanhar

Agradeço a pessoas preciosas e essenciais nessa jornada: Gamaliel, Elis, Laylah, Gleiciane, Marcelo, Victor Coelho.

Tantos outros poderiam ser colocados aqui, a República Corte & Costura, a turma de Engenharia Ambiental que ingressou em 2013, a Aliança Bíblica Universitária e a Igreja Presbiteriana de São Carlos.

EPÍGRAFE

“Acho a sua falta de fé *preocupante*” –
Darth Vader em *Star Wars IV: A New Hope*
Lucas; Kurtz (1977)

RESUMO

LOUREIRO, Lucas Antunes. **Circularidade de luminárias LED para vias públicas no Brasil**. 2022. 68 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

A Iluminação Pública em todo o mundo está passando por mudanças. Devido a viabilidade e alto desempenho da tecnologia LED, as tecnologias de vapor metálico e vapor de sódio estão sendo trocadas em massa. Entretanto, a mudança também afeta os resíduos de equipamentos de iluminação: não há mais mercúrio, mas os resíduos são eletrônicos, com metais diversos e raros, em arranjos de difícil reciclagem ou outro processamento. Apesar de já haver estudos comparando os impactos totais do ciclo de vida do LED e comparado o mesmo com o de outras tecnologias, chegou-se à conclusão de que há muitas incertezas a respeito do fim de vida, em especial nos contextos fora da Europa. Também já foi notado que a alta duração de equipamentos LED não garante uma menor geração de resíduos como era esperado. É necessário analisar os fluxos de resíduos e os riscos que existem durante a fase de descarte no contexto brasileiro. Além disso, buscam-se analisar a possibilidade de fluxos de equipamentos circulares, que evitem qualquer descarte e maximizem os impactos positivos da tecnologia de iluminação. Para conseguir realizar essa análise, utilizou-se do estudo de casos múltiplos aplicados a nove municípios brasileiros tendo como base os fluxos circulares e de descarte. Com isso, observou-se evidências de risco real de descarte precoce de luminárias LED para iluminação pública, que municípios com menores populações apresentam as maiores dificuldades de gerar descarte, enquanto grandes municípios conseguiram evitar descarte por meio da proximidade com fabricantes. Também se observa que termos de garantia prejudicam procedimentos de manutenção locais. Concluindo, reafirma-se que a importância de fabricantes na implantação da Economia Circular, mas isso não anula que municípios busquem melhor gerir seus resíduos de LED.

Palavras-chaves: Economia circular; iluminação pública; Resíduo eletrônicos; gestão de resíduos.

ABSTRACT

LOUREIRO, Lucas Antunes. Circular Economy aspects over LED Luminaires applications in Public Streetlighting. 2022. 68 p. Monograph (Completion of Course Work in Environmental Engineering) – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2022.

Public Streetlighting is changing worldwide. As LED technologies become more viable and attain better results, the high-intensity discharge lamps are mass substituted. However, this technological change also impacts the illuminations waste: no more mercury in lamps disposal, but the waste is now made of electronics, with diverse and scarce metals in complex design and with low recyclability. Although there are already studies comparing life-cycle impacts of LED with other technologies, there are many uncertainties about the End of Life, which is more unknown out the Europe context. It has also been noticed that the long life of LED equipment does not implies in less waste like it was expected. It is necessary analyze the waste flows and its risks while in the waste flow inside Brazilian context. Besides that, this monograph analyzes possibilities of flow for circular equipment, and searches for flows that can avoid waste and maximize positive impacts of LED technology for illumination. To perform this analysis, the multiple study case was used over nine Brazilian cities while the circulars flows worked as a framework. The results show evidence of real risk of early dispose of functional LED equipment used in Streetlighting, also indicates that cities with less population have bigger challenges to manage waste, while great cities avoid disposal by making strong relationship with LED manufacturers. Also, it was noted that warranty prejudiced local maintenance. In conclusion, this research reaffirms the importance of manufactories for Circular Economy implantation, although it does not set aside that cities can seek better and proper management of LED waste.

Keywords: Circular Economy; streetlighting; LED illumination; electronic waste; waste management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama Borboleta ou Sistêmico do fluxo de matérias na Economia Circular.....	24
Figura 2 – Produção de Luz branca do LED por meio da conversão parcial da luz azul.....	28
Figura 3 – Fases de um ACV	31
Figura 4 – Passos da metodologia aplicada nesse trabalho.	38
Figura 5 – Driver de Luminária LED com design que barra acesso a componentes internos no município de Poços de Caldas – MG.	43
Figura 6 – Equipamentos de iluminação funcionais retirados da Iluminação Pública para serem substituídos por luminárias LED.	45
Figura 7 - Luminárias LEDSTAR armazenadas para troca do fabricante no município de São Paulo -SP.	48
Figura 8 – Local de armazenamento de resíduos da Iluminação Pública de Brasília em contato com tempo e solo permeável.	49
Figura 9 – Local de armazenamento do corpo de luminárias antigas em Brasília, em contato com vegetação, agentes climáticos e solo permeável.....	49
Figura 10 – Armazenamento de luminárias convencionais.....	50
Figura 11 – Prioridades da estrutura de trabalho para implementar Economia Circular na Iluminação pública.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de conceitos dentro da economia linear e circular.....	23
Tabela 2 – Descrição dos ciclos tecnológicos da Economia Circular.	26
Tabela 3 – Comparação entre diferentes tecnologias para iluminação pública.....	28
Tabela 4 – Combinação de objetivos de pesquisa de um estudo de caso com estrutura.	36
Tabela 4 – Critério para analisar se o fluxo é presente no caso, se valendo da presença de um número mínimo de fatores.	51
Tabela 5 – Critério para analisar se o fluxo é de boa qualidade no caso, se valendo da presença de um número mínimo de fatores.	52
Tabela 8 – Análises dos fluxos de cada município, onde ‘+’ sinaliza baixa qualidade, ‘++’ aponta boas condições e branco indica ausência.	53
Tabela 9– Descrição da estrutura de trabalho para reduzir resíduos de luminárias LED em iluminação pública por meio da Economia Circular e indicação de atores chave.	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1. OBJETIVO	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. ECONOMIA CIRCULAR	22
2.2. ILUMINAÇÃO LED.....	26
2.3. IMPACTOS AMBIENTAIS DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM LED.....	30
2.4. ILUMINAÇÃO PÚBLICA	33
2.5. ESTUDO DE CASO	35
3. METODOLOGIA.....	38
3.1. CONSTRUÇÃO DA BASE CONCEITUAL	38
3.2. DEFINIÇÃO DAS QUESTÕES DE PESQUISA.....	39
3.3. SELEÇÃO DOS PARTICIPANTES E CASOS ESTUDADOS	39
3.4. PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS	39
3.5. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DE DADOS	40
3.1. ELABORAÇÃO DE ESTRUTURA DE TRABALHO.....	40
4. RESULTADOS	42
4.1. MANUTENÇÃO.....	42
4.2. REUSO E COMPARTILHAMENTO	44
4.3. RECONDICIONAMENTO E REMANUFATURA.....	46
4.4. RECICLAGEM	46
4.5. DESCARTE	48
4.6. AVALIAÇÃO DE FLUXOS.....	50
4.7. PROPOSTA DE ESTRUTURA DE TRABALHO.....	53
5. CONCLUSÕES.....	58
REFERÊNCIAS	60
ANEXO A – Formulário de entrevista aplicado nas visitas.....	65

1. INTRODUÇÃO

O uso de lâmpadas elétricas fez com que a atividade humana se tornasse independente do período de luz solar. Dentro da infraestrutura de polos urbanos, a iluminação pública abrange espaços de acesso comum essenciais para a vivência noturna; graças a essa iluminação, a visão se torna viável, criminalidade diminui e sensação de segurança aumenta (PEÑA-GARCÍA; HURTADO; AGUILAR-LUZÓN, 2015).

Assim, a evolução da iluminação é notável dentro de espaços urbanos. Atualmente a marca desse progresso é a substituição de Lâmpadas de Vapor de Sódio por Luminárias LED. Com a aplicação crescente de luminárias LED, as cidades ganharam maior qualidade de equipamentos de iluminação, eficiência energética e ausência de mercúrio, se comparada as tecnologias anteriores de vapor metálico. Assim, à medida que a troca ocorre, uma grande carga de resíduos das tecnologias percussoras é gerada. Ao mesmo tempo, há uma demanda para o setor a gerir os novos resíduos de iluminação, com variedade de substâncias e componentes crescente. (ABDUL HADI et al., 2013; TÄHKÄMÖ; HALONEN, 2015).

Nos resíduos de lâmpadas de Vapor Metálico, a grande preocupação ambiental é a gestão do mercúrio contido dentro do bulbo de vidro. Dada a ausência desse elemento nos produtos LED aliada ao baixo consumo energético, fabricantes priorizaram melhorias ambientais pela eficiência energética dos produtos, deixando de analisar a fundo os impactos de produção e descarte (DZOMBAK; ANTONOPOULOS; DILLON, 2019; RICHTER; TÄHKÄMÖ; DALHAMMAR, 2019).

Para medir esses impactos de uso, junto aos de produção e descarte do LED, foram produzidas avaliações de ciclo de vida de luminárias LED comparando com tecnologias precursoras (FRANZ; WENZL, 2017). Neles, os autores mostram uma crescente complexidade em materiais, componentes e estruturas nas Luminárias, e outros estudos adicionam a identificação de componentes perigosos nas placas de circuito dos componentes eletrônicos internos (TÄHKÄMÖ et al., 2012, 2013; TÄHKÄMÖ; HALONEN, 2015; DZOMBAK et al., 2017).

Apesar das análises, as publicações apontam que ainda faltam evidências sobre a relevância dos impactos de resíduos LED em comparação aos impactos das demais fases de uso e produção (FRANZ; WENZL, 2017). Somado a essa falta de evidências, a diversidade de substância e componentes nos resíduos LED cresce e dificulta a recuperação de materiais na reciclagem, em especial Gálio, Índio e outras terras raras (ABDUL HADI et al., 2013;

TÄHKÄMÖ; HALONEN, 2015; DZOMBAK et al., 2017). Na União Europeia, essas substâncias estão listadas com matérias primas críticas, devido a importância para economia e atividade industrial (EUROPEAN COMMISSION, 2018).

Esses problemas com resíduos são resultado de uma lógica econômica linear, com fluxos de matéria que começam na extração e terminam no descarte (STAHEL, 2016; WEBSTER, 2016). Essa diretriz de funcionamento estimula a produção de resíduos e é contrária aos fluxos naturais, onde há uma reciclagem contínua de recursos. Dadas esse e outros desafios, foi desenvolvida a Economia Circular (EC). Ela promove produtos com maior vida útil e conserto acessível. Estratégias, como o design circular, dão base para manter o produto em uso por maior tempo e com menor quantidade de transformações e intervenções (EMAF, 2013; DZOMBAK et al., 2017; DZOMBAK; ANTONOPOULOS; DILLON, 2019; GRIGOROPOULOS et al., 2020).

Logo estamos numa realidade econômica dependente da geração de resíduos, onde a inovação do LED na iluminação também transforma os componentes a serem descartados. Nessa alteração, os resíduos LED passam a ter mais componentes e substâncias que seus percussores. O impacto dessas mudanças já começou a ser avaliado, mas de modo muito restrito a Europa e outros Países com gestão de resíduos eletrônicos em estado avançado, o qual não é o caso do Brasil (ABDUL HADI et al., 2013; FRANZ; WENZL, 2017; RICHTER; TÄHKÄMÖ; DALHAMMAR, 2019). Contudo, além de investigar os fluxos atuais, é preciso averiguar a transição deles para um paradigma com geração de resíduos mínima, a EC (STAHEL, 2016; EMAF, 2017a).

Portanto, é preciso avaliar o final de vida de equipamentos LED na iluminação pública para esclarecer a realidade nacional. Além do descarte, foram considerados outros fluxos de final de vida, relacionadas a EC. Essas outras possibilidades permitem avaliar o quão circular ou linear se encontra a gestão de resíduos equipamentos na Iluminação pública de LED. Com isso, buscam-se mostrar as dificuldades e potenciais na migração para uma Iluminação Pública baseada na EC.

Para isso a análise foi feita em cima do estudo de múltiplos casos, contemplando nove municípios brasileiros que implantaram iluminação pública LED, buscando explorar conexões entre esses projetos de iluminação, equipamentos LED, melhorias ambientais e conceitos da EC. O estudo focou na ação a partir da gestão municipal. Como resultado, uma estrutura de trabalho é proposta. A qual apresenta diretrizes para reduzir resíduos e melhorar sistemas de iluminação.

Outros estudos também têm surgido a respeito do fim de vida do LED na Iluminação Pública (IP). Apesar de análises de Ciclo de Vida terem apontado vantagens ambientais de LED, vários fatores têm surgido para questioná-las: validade dos estudos em contextos fora de países desenvolvidos e recuperação de metais raros no LED. Também se começou questionar se os resíduos de IP realmente irão reduzir com a adoção de LED. Pois estudos apontam uma tendência de substituição precoce. Isso se deve a alta evolução de equipamentos LEDs, a qual estimula a troca das luminárias antes do seu tempo de vida útil potencial. Essa evolução atual não é só focada em eficiência energética, mas em integração de sistemas de iluminação com Internet das coisas (IoT).

1.1. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a circularidade de luminárias LED para vias públicas no território brasileiro.

Para alcançar esse objetivo foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar estudos de caso múltiplos em 9 municípios brasileiros
- Avaliar os fluxos de resíduos com base nos 9 casos
- Identificar critérios para avaliar presença e qualidade dos fluxos
- Identificar fatores chaves para casos com melhores resultados
- Identificar fatores chaves para casos com piores resultados
- Criar uma figura resumo da situação dos fluxos de resíduos LED na Iluminação Pública do Brasil
- Propor diretrizes que ajudem a melhorar os fluxos circulares de luminárias LED

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ECONOMIA CIRCULAR (EC)

A fins de clareza, continuidade e melhor conexão do assunto e de seus pormenores, a revisão do conceito de EC seguiu a linha difundida pela Ellen MacArthur Foundation (EMAF). Essa escolha se baseia na grande adesão, em comparação a outras definições de EC (KIRCHHERR; REIKE; HEKKERT, 2017)

A EC é uma proposta sistêmica para desenvolvimento econômico, projetada para beneficiar tanto negócios, quanto sociedade e meio ambiente. Ela busca otimizar a alocação de recursos escassos enquanto regenera e restaura ecossistemas naturais. Essa abordagem é antagônica ao modelo linear e sua abordagem de extrair, fazer, descartar, que promove consumo não sustentável de recursos finitos (WEBSTER, 2016; EMAF, 2017a, 2017b).

A atividade econômica e industrial circular tem uma busca clara: restaurar e regenerar benefícios dentro do sistema completo (WEBSTER, 2016). Para isso, a EC busca trabalhar de forma efetiva em todas as escalas: pequenos e grandes negócios, indivíduos e organizações, local e global. Dados esses objetivos gerais, a EC se vale dos seguintes princípios (EMAF, 2013, 2017a; WEBSTER, 2016):

- **Projeto de resíduos e poluição:** Durante o projeto de novas atividades e produtos, os resíduos e poluição já são previstos, minimizados e alterados. Eliminar resíduos tóxicos e perigosos e sem utilidade posterior é prioridade;
- **Manter matérias e produtos em uso:** Resíduos biológicos são projetados para voltar aos sistemas naturais. Materiais tecnológicos são projetados para ter alta durabilidade, ser compartilhados, reparados, reutilizados e remanufaturados. O valor reside no uso dos produtos, não nos produtos em si;
- **Regenerar sistemas naturais:** A EC evita recursos não renováveis e investe em preservar ou melhorar os renováveis. Utiliza ciclos de energia e materiais para gerar benefícios ao ecossistema, sociedade e economia.

Apesar de ser difícil especificar uma origem única para a EC, foi durante a década de 1970 que surgiram suas bases: Design Regenerativo, Economia de Performance, Design berço-ao-berço ou *Cradle to Cradle* (C2C), Ecologia Industrial, Biomimetismo, Economia Azul e Permacultura (WEBSTER, 2016).

Essa base de conhecimento integra uma visão holística que substitui a visão analítica produção linear; maneiras são buscadas para reduzir desperdícios em toda cadeia de produção até o fim de vida e tornar resíduos em insumos, além de criar uma rede interdependente e variada para recirculação dos insumos (WEBSTER, 2016). A existência de várias relações dá a EC capacidade dinâmica, resiliente e eficaz no fluxo de materiais (EMAF, 2017a). A Tabela 1 mostra outras comparações entre aspectos dessas duas correntes econômicas.

Tabela 1 – Comparação de conceitos dentro da economia linear e circular

Economia Linear	Economia Circular
Externaliza custos para baratear de produção	Internaliza custos para prover performance e serviços de qualidade com baixo risco
Lucro por venda: após compra, a responsabilidade do produtor diminui drasticamente	Lucro por serviço: Há responsabilidade estendida. O lucro se distribui em toda trajetória do produto
Cria fluxos de resíduos difusos, os quais municipalidades e indivíduos administram	Reduz resíduos, e setor de produção provê cadeias de valor para recebê-los como insumo
Promove produção em escala global para assegurar baixos custos e vantagem de mercado	Promove cadeias de regionais e locais, o que viabiliza custos de prestação de serviço
Encoraja padronização de produtos para adicionar eficiência e facilidade de consumo	Encoraja padronização de protocolos e partes: permitindo protocolos de reparo, reuso, melhoria, remanufatura e reciclagem
Rotatividade de bens incentivada. Posse vale mais que acesso a função	Usuário quer evitar falhas. Rotatividade é menor, e acesso importa mais que propriedade
Preços refletem apenas custos privados de produção, distribuição, venda etc.	Preços refletem todos os custos, compensados pela redução dos custos de externalidades
Imposto sobre serviço estimula maior produtividade, o que reduz emprego se o crescimento não é satisfatório	Redução de impostos sobre insumos renováveis (que inclui trabalho humano)
Reciclagem é um fluxo independente de matéria prima. Perdas energéticas e de qualidade são ignorados	Reciclagem tem baixo valor, mas ainda é necessária. Deve ser evitada devido perdas energéticas e de qualidades
Poucos fluxos de materiais influenciam no projeto de um produto	Projetos são limitados por fluxos de materiais sem desperdícios, de ciclos fechados
Crescimento econômico implica busca de maior produtividade e bom retorno de investimento	Noção de crescimento econômico é trocada por aumento de prosperidade e bem-estar sistêmica

FONTE: Adaptado de Webster (2016).

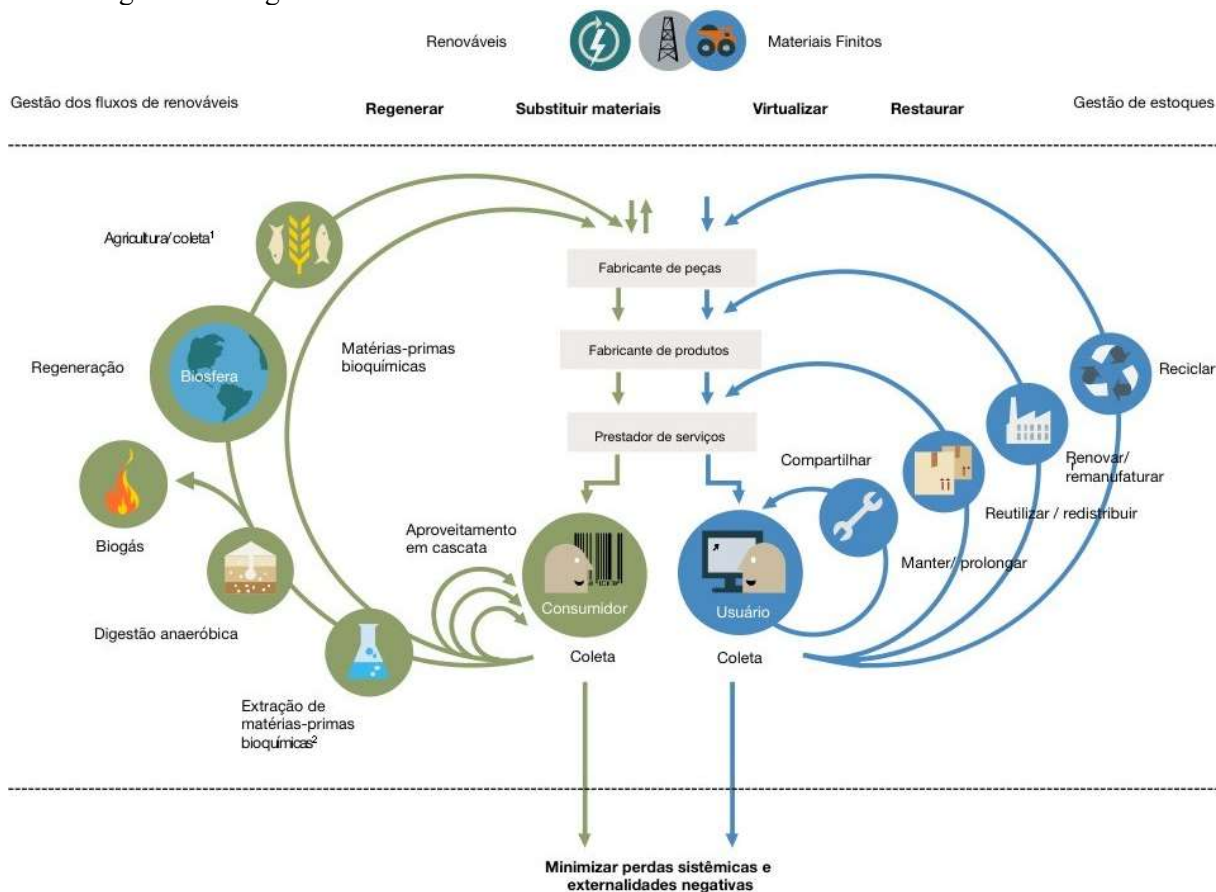
Dentro do sistema produtivo, a EC distingue duas classes de materiais. Essa diferença entre materiais biológicos e tecnológicos alinha-se com os objetivos de minimizar ao máximo poluição, aumentar a eficiência de produção e integração dos sistemas produtivos com os ambientais (WEBSTER, 2016; EMAF, 2019). Logo, os materiais biológicos são os que podem ser reinseridos em ecossistemas com segurança, são biodegradáveis e retornam nutrientes a natureza.

Quanto aos materiais tecnológicos, não existe maneira segura de devolvê-los aos sistemas naturais. Eles são derivados que envolvem grande processamentos, materiais e

substâncias químicas sintéticas (EMAF, 2017a). Para evitar qualquer resíduo, e consequente impacto ambiental negativo, esses materiais devem ser continuamente reprocessados e reinseridos no sistema produtivo (WEBSTER, 2016).

Os ciclos biológicos permitem a circulação de matérias via processos naturais, enquanto nos ciclos tecnológicos, fluxos e cascatas de valor mantêm os materiais tecnológicos sempre valorizados, em uso e reprocessados. Essas duas vias atuam conjuntamente dentro do grande fluxo da EC. A Figura 1 apresenta esses fluxos por meio do Diagrama Borboleta, demonstrando a busca de eficiência ótima dos materiais, com retorno econômico e regeneração aliada a preservação de sistemas naturais em todos os níveis de fluxo (EMAF, 2013).

Figura 1 – Diagrama Borboleta ou Sistêmico do fluxo de matérias na Economia Circular



FONTE: Adaptado de EMAF (2019)

Eficiência, dentro da EC, aborda o sistema completo e duas estratégias específicas. Dentro do conceito amplo busca-se focar nos ciclos internos e menores (por serem os mais eficientes no uso de recursos), de modo a produzir fluxos sem fim e de baixa velocidade de materiais e produtos (EMAF, 2017a).

A nível estratégico, a eficiência é trabalhada diretamente nos produtos ou nos recursos utilizados. O foco principal é a suficiência do mercado no uso compartilhado, reuso e extensão máxima do tempo de vida útil dos produtos. Isso é atingido pela adoção de design modulares, padronização de componentes (não apenas do produto total), projetos idealizados para uso compartilhado e com fácil manutenção ou melhoria (WEBSTER, 2016). Somente após buscar esse tipo de eficiência que a reciclagem e recuperação de materiais tem seu valor devido, de apoio a sustentabilidade total, mas não cerne.

A eficiência de recursos começa na escolha de matérias primas, que são altamente recuperáveis e com baixo impacto negativo. Depois passa no design pensado para facilitar tal recuperação e, por fim, na estruturação e melhorias de vias de reciclagem (EMAF, 2013; WEBSTER, 2016).

Dentro dos ciclos tecnológicos, há uma subdivisão de fluxos que evidencia a distinção de estratégias para atingir eficiência total de recursos e produtos, como a Figura 1 mostra (EMAF, 2013; WEBSTER, 2016). Cada ciclo, com estratégias e focos diferentes, tem hierarquia para priorizar e valorizar os círculos mais internos. A ordem decrescente de importância é: manutenção; reuso e compartilhamento; remanufatura e condicionamento; reciclagem; descarte. Na Tabela 2 a seguir, detalha-se um pouco mais de cada um desses ciclos internos (EMAF, 2017a).

Quanto a reciclagem e descarte, observa conceito emergente de depósitos urbanos. Eles abordam recursos, em especial metais, que estão em três estados de disponibilidade: abandonados, comatosos e hibernando (GRAEDEL, 2011). Os depósitos abandonados incorporam os materiais com difícil recuperação. Os depósitos comatosos abordam recursos com amparo teórico para serem recuperados, mas tem dificuldades de logística ou de mercado. Os recursos em hibernação são materiais que não estão exercendo nenhuma utilidade, mas que podem acordar, como um celular antigo numa gaveta. A longo prazo é interessante fazer essas distinções em materiais que ainda não podem ser reciclados, facilitando acesso (WEBSTER, 2016).

Além de suas bases, conceitos e objetivos, o que impulsiona a busca para implantação da EC são suas vantagens. De um ponto de vista econômico é uma grande oportunidade e incentivo para inovação de produtos e serviços, promove a redução de custos de produção e maior quantidade de postos de trabalho. O meio ambiente se beneficia de forma direta pela menor produção de poluição e menor taxa de extração de matéria virgem (EMAF, 2017a).

Tabela 2 – Descrição dos ciclos tecnológicos da Economia Circular.

Ciclo/loop	Descrição
Manutenção e reparo	Busca manter os produtos e materiais tecnológicos em uso ao focar em práticas de reparo e designs de produtos com maior vida útil. Preza por serviços de manutenção descentralizados.
Reuso e redistribuição	Produtos e componentes técnicos são reutilizados múltiplas vezes e redistribuídos para novos usuários no seu formato original ou com pequenas melhorias e mudanças. Plataformas de Marketplace conectam eficientemente vendedores e compradores.
Remanufatura e recondicionamento	A remanufatura realiza o desmonte a nível de componente, para reparar e trocar componentes se necessário, a fim de montar um produto com validade e operação equivalente a um novo. O recondicionamento é uma restauração estética aliada a reparos extensivos, mas sem desmontar e substituir componentes.
Reciclagem	Processo de reverter um produto e seus componentes de volta para as matérias primas, permitindo a repetição da fabricação. Em razão da baixa eficiência, é considerado um ciclo complementar, mas que no geral deve ser evitado.
Descarte	Operação intencional que causa perdas sistêmicas de recursos finitos, que podem gerar externalidades e prejudicam o funcionamento a longo prazo da EC. Devem ser sempre minimizadas.

FONTE: Adaptado de EMAF (2017a).

Não apenas um título comercial e de inovação, a EC promove para organizações novas fontes de lucros, maior segurança de oferta estável, oportunidade de negócios voltados para serviços e maior interação positiva com clientes (EMAF, 2017a).

Considerando impactos positivos da EC para indivíduos, uma pesquisa na Europa sugere aumento da renda disponível por indivíduo devido à redução de custos gerais na economia. Por outra perspectiva, as pessoas também desfrutariam de maior utilidade e menor obsolescência de produtos (EMAF; MCKINSEY, 2015).

2.2. ILUMINAÇÃO LED

A expressão LED significa *Light-Emitting Diode*, que é diodo emissor de luz em inglês. Diodos são cristais de semicondutores com Junções P-N. No caso do LED, cada junção oposta é quimicamente dopada, gerando cargas negativas em um lado (cristal N) e positivas no outro (cristal P). Ao fornecer tensão elétrica, os elétrons do ânodo (junção N) ganham energia suficiente para se recombinar com as lacunas no cátodo (junção P), o que resulta na liberação de energia na forma de fótons. Os diodos são recorrentes em eletrônica por serem capazes transmitir corrente em apenas um sentido, a produção de luz é restrita aos LED.

A fotoluminescência em diodos foi apontada no início do século XX. Desse evento, o a produção de luz a partir de um sólido em temperatura ambiente se destacou. Mas uma aplicação em iluminação estava longe. Em 1993, Nakamura e sua equipe demonstraram o primeiro LED de alto brilho azul, usando cristais de GaN como base (NAKAMURA; MUKAI; SENOH, 1994; FEEZELL; NAKAMURA, 2018). Essa alta produção de luz foi o marco para a possibilidade real de LED em iluminação, estimulando esforços crescentes na pesquisa (CHO et al., 2017).

A produção de luz branca tem destaque nos primeiros desafios, pois LEDs não produzem luz policromática (luz branca), mas sim monocromática (azul, vermelho ou verde). Para gerar essa luz, combinaram três ou mais LEDs. A percepção dessa combinação é branca, mas não correspondeu bem ao espectro visível humano (CHO et al., 2017).

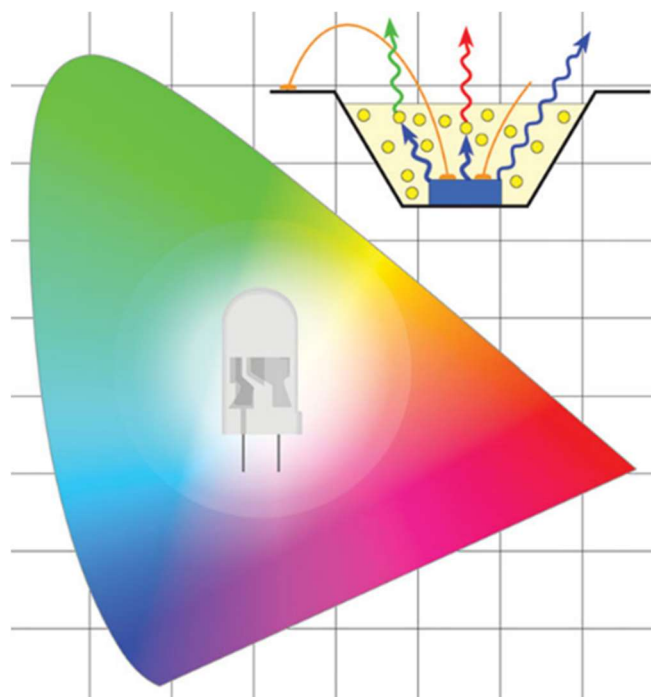
Contudo, outros pesquisadores atestaram outra técnica de produção de luz branca bem mais eficiente. Eles demonstraram de modo inédito uma lâmpada LED com luz branca e grande correspondência a visão fotóptica, mas usando apenas LED azul de alto brilho. Para isso, aplicou-se uma camada de fósforo de Granada de Ítrio e Alumínio (YAG) acima do LED. Parte da luz azul passa pela camada de YAG, mas outra é absorvida e reemitida em uma faixa extensa de comprimentos de onda. O resultado foi a produção eficiente de luz branca a partir da emissão monocromática apenas, o que é exemplificado na

Figura 2 (BANDO et al., 1998).

Segundo (CHO et al., 2017), há quatro recursos técnicos que resumem o atual estado de iluminação com LEDs:

1. Produção de diodos de GaN sem falhas, de ótima qualidade e com ótimas propriedades ópticas;
2. Desenvolvimento de diversas arquiteturas de diodos para aprimorar aspectos elétricos, óticos, confiabilidade de produto e produção de LEDs;
3. Descoberta e aperfeiçoamento do uso de fósforo YAG com Cério ativado (YAG:Ce) para boa absorção de luz azul, obter faixa de emissão ampla, temperatura de cor ajustável, alta estabilidade química e resistência a condições de produção de luz;
4. Construção de designs e soluções para reter menos luz dentro da matriz de semicondutor do LED e da camada fosforescente, que se deu pelo uso de rugosidade da superfície do LED e adição de camadas refletoras no chip.

Figura 2 – Produção de Luz branca do LED por meio da conversão parcial da luz azul.



FONTE: CHO et al. (2017).

Tais recursos permitiram o desenvolvimento do LED, e da *Solid-State Lighting* (SSL), que significa iluminação em estado sólido em inglês. Essa área se refere apenas a aplicação do LED para substituir outras tecnologias em produtos de iluminação (CHO et al., 2017).

Dentro da SSL, aplicações luminosas de alta potência tem demandas e interesses específicos. Enquanto a iluminação de lugares extensos é um objetivo, o LED, perde eficiência quando se aumenta a intensidade de corrente e consequente potência. Assim, Cho et al. (2017) aponta que LEDs brancos de alta potência dependem de recursos para garantir condições térmicas favoráveis de condutividade e estabilidade, e só assim conseguem manter desempenho competitivo na iluminação.

Ao comparar tecnologias de iluminação domésticas, é claro o benefício dos LEDs. Contudo, para aplicações externas, dados sobre durabilidade e índice de correspondência de cor complementam para constatar melhor características da SSL. Na Tabela 3, é possível analisar a diferença e vantagem da tecnologia LED na faixa de produção de 10 000 lm e 20 000 lm. Em especial nos itens de potência em torno de 100 W, a eficiência do LED é mais dependente de outros fatores, como tempo de vida, para afirmar vantagem.

Tabela 3 – Comparação entre diferentes tecnologias para iluminação pública.

Tecnologia da	Lumens	Ano do	Potência	Eficiência	Índice de	Tempo de
---------------	--------	--------	----------	------------	-----------	----------

Luminária	(lm)	modelo	(W)	(lm/W)	Renderização de cor (IRC)	vida (h)
Vapor Metálico (MH) A	20500	2020	250	82	60	10 000
Vapor Metálico (MH) B	9200	2020	100	92	60	10 000
Vapor de Sódio em alta Pressão (HPS)	9500	2014	100	73	22	24 000
LED A	10125	2021	81	125	80	90 000
LED B	20250	2021	162	125	80	90 000

FONTES: Adaptado de OSRAM SYLVANIA (2014), SIGNIFY HOLDING (2020) e WE-EF LIGHTING (2021a, 2021b).

Alta eficiência luminosa, renderização de cor ótima, vasta opções de temperatura de cor (de 2700 K até 6000 K), ausência de mercúrio, não emissão de raios ultravioletas e infravermelhos - que desbotam cores, e vida útil longa. Esse conjunto de vantagens já garante a superioridade do LED sobre outras fontes de luz convencionais (CHO et al., 2017), mas mais um avanço marcante já está acontecendo.

Os LEDs são inerentemente compatíveis com controles digitais, pois ambos são baseados em semicondutores e dispositivos de baixa voltagem (ROBERSON, 2017). A partir disso, ao se implementar a IoT na tecnologia LED, uma iluminação inteligente é possível. Por meio de sensores, controladores, conectividade com ferramentas da Tecnologia de Informação, a *smartlighting* passa a ganhar muitas vantagens: monitoramento remoto e instantâneo, geração de dados, regulação da intensidade de luz, adaptação de funcionamento a cenários diversos, roteamento de WiFi e conectividade Bluetooth (ALPTEKIN, 2019).

A companhia Interact, traz um exemplo do potencial da iluminação inteligente. A empresa implementou IoT junto com a renovação para LED na capital da Indonésia, Jakarta, atingindo 90 mil pontos da iluminação pública urbana. O monitoramento remoto, permite acionar a manutenção simultaneamente a falhas; os sensores permitem usar menores intensidades de luz em casos de pouca movimentação ou presença de luz solar; o controle remoto também permite aumentar a intensidade de iluminação em casos de acidentes e crimes (INTERACT LIGHTING, 2018).

A partir dessa conectividade com os sensores ocorre a geração de dados diversos, como intensidade de movimento de pessoas, temperatura, umidade e acompanhamento ao vivo de ativos de interesses. Tais informações podem ajudar políticas públicas a ações de

grande impacto imediato nas cidades (ROBERSON, 2017; INTERAC LIGHTING, 2018; ALPTEKIN, 2019).

2.3. IMPACTOS AMBIENTAIS DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM LED

Quando um produto, serviço ou atividades humanas interage com o meio ambiente, impactos ambientais podem acontecer. Eles podem ser entendidos como alterações do meio ambiente, sendo benéficas ou maléficas, total ou parcialmente desencadeadas pela ação antrópica. (TUKKER; JANSEN, 2006; ABNT, 2015; TUKKER, 2015).

São várias metodologias para avaliar impacto ambiental. Contudo, desde os anos 70, o entendimento do impacto ambiental se depurou. As análises focadas na produção e uso do produto não bastavam, precisava-se incluir o impacto de todo o sistema. A partir disso, o escopo das análises se estendeu até o conceito “berço-ao-túmulo”. Isto é, desde extração da matéria prima até a disposição final do produto (TUKKER; JANSEN, 2006; GUINÉE et al., 2011).

A fim de abranger esse escopo completo, esforços diversos desenvolveram a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Um marco desse processo foi a normatização internacional da metodologia em 2006 (ABNT, 2009a, 2009b; GUINÉE et al., 2011). As normas, então, estabelecem diretrizes metodológicas comuns para o uso da ACV.

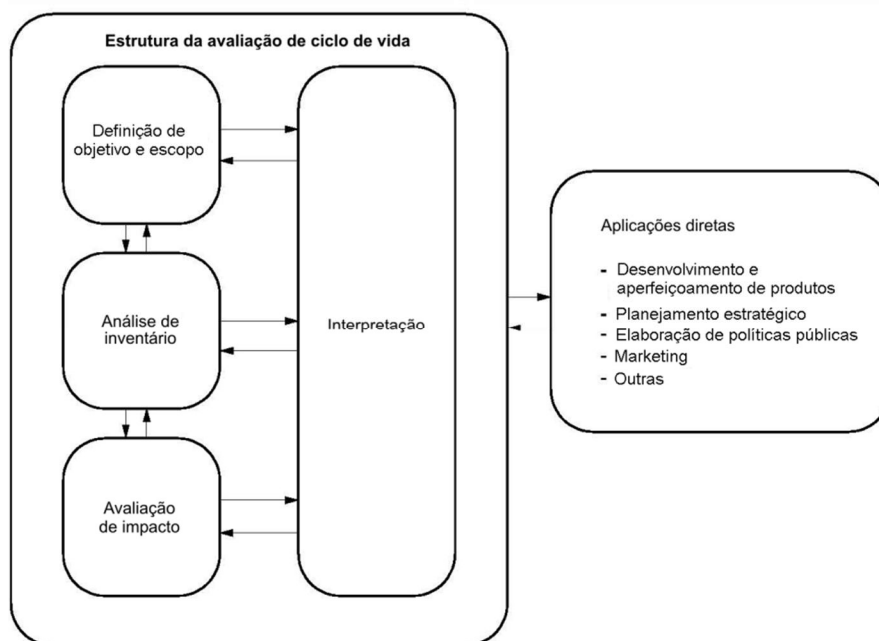
Na avaliação de produtos complexos, como os dispositivos de iluminação LED, a ACV estabelece fases distintas. Essas fases separam os estágios de “vida” do produto e podem ser divididas em até cinco (MURALIKRISHNA; MANICKAM, 2017). Pelo LED ser um componente eletrônico complexo, a maior parte dos estudos adotam uma simplificação de 3 fases, a qual é reproduzida neste trabalho, opta-se pela separação mais comum de três estágios: São elas 1) Início de Vida, 2) Meio de Vida e 3) Fim de vida (FRANZ; WENZL, 2017).

O início de vida aborda a extração de matéria prima, fabricação e transporte do produto. O meio de vida trata o uso do produto. Por fim, o final de vida abrange a disposição final, que inclui tanto a reciclagem quanto o descarte (GUINÉE et al., 2011; FRANZ; WENZL, 2017).

A norma da ACV indica quatro fases para o estudo, assim como o indicado na Figura 3. São elas a 1) Definição de objetivo e escopo; 2) Análise do inventário; 3) Avaliação do Impacto e 4) Interpretação dos resultados. Apesar da ordem sequencial na aplicação das fases, cada etapa pode gerar informações que aprimorem ou alterem outras. A fase de Definição de

Objetivos e Escopo diz respeito ao nível de detalhamento do estudo e suas fronteiras, que são escolhidas em função do objeto de estudo e o uso pretendido dos resultados (ABNT, 2009a). A seguir vem a Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Essa fase aborda a coleta de dados de saída e entrada do sistema. (ABNT, 2009a).

Figura 3 – Fases de um ACV



FONTE: ABNT (2009a)

O objetivo da terceira fase é prover melhor entendimento da significância ambiental de aspectos do sistema. A Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) aborda a tradução dos dados do inventário para indicadores impacto ambiental (ABNT, 2009a). Por exemplo, as entradas de materiais, energia somados aos descartes e gastos do sistema são quantificados em emissão de gases de efeito estufa consequente ou litros de água contaminada.

Na última fase, a de Interpretação, os dados obtidos em todo o estudo são sumarizados e interpretados. A partir disso são construídas indicações, conclusões e tomadas de decisão de acordo com o escopo do estudo (ABNT, 2009a).

As análises são convergentes nos resultados de economia energética na fase de uso (TÄHKÄMÖ et al., 2012; SHAHZAD K., REHAN M., ISMAIL I.M.I., SAGIR M., TAHIR M.S., BERTOK B., 2015; TÄHKÄMÖ; HALONEN, 2015; US DEPARTMENT OF ENERGY; NAVIGANT; STOBER, 2015). A partir desse ponto, contudo, várias discrepâncias começam a aparecer (FRANZ; WENZL, 2017). Elas se consistem na diferença de fonte de dados, metodologia e impactos em um primeiro plano. Num segundo, elas

também apontam para peculiaridades de avaliar o ciclo de vida de um componente eletrônico complexo e com alta variação de produção.

Dada as distinções de cada estudo, a revisão de artigos de Franz e Wenzl (2017) traz um complemento para poder analisar o ciclo de vida a partir dos dados de vários estudos. A partir desse estudo podemos entender a visão geral desses estudos e como eles podem se relacionar com a situação do Brasil. Assim, os autores confirmam que os estudos ACV apontam que os impactos de Luminárias LED estão intimamente relacionados a fase de uso. De modo que, quando maior a eficácia luminosa e duração da luminária, maior as vantagens em relação a outras tecnologias, como a de vapor de sódio. De forma positiva, ela fala da necessidade de estudar como a implementação de sistemas de controle pode impactar ainda mais essa situação.

Por um lado mais crítico, Franz e Wenzl (2017) apontam que o melhor desempenho do equipamento individual não implica isso na realidade. Para isso, eles citam a tendência mundial de gastos energéticos de iluminação. De fato, não tem como garantir que projetos de troca de tecnologia terão como foco a economia energética, afinal o outro potencial do LED é aumentar exponencialmente as condições de iluminação noturna, a custo de consumo maior.

Considerando as fases de análise, no início de vida são apresentados os maiores impactos após a fase de uso (TÄHKÄMÖ; HALONEN, 2015; FRANZ; WENZL, 2017; RICHTER; TÄHKÄMÖ; DALHAMMAR, 2019). Tais impactos são relacionados a produção de partes metálicas, como o corpo da luminária, e os componentes eletrônicos em sequência. Contudo, Franz e Wenzl (2017) apontam que os dados para estimar os impactos de produção não são precisos, em especial na produção de chip de LED. As fontes dessa imprecisão são a falta de substâncias no inventário e a pureza de substâncias menor do que a real nos chips de LED (FRANZ; WENZL, 2017).

Essas informações sugerem que os impactos de manufatura podem estar sendo subestimados. Contudo, apesar da limitação das análises, luminárias LED possuem mais impactos na produção em relação a lâmpadas HPS em quase todas as categorias (TÄHKÄMÖ; HALONEN, 2015). Dessas categorias, um estudo aponta que o Potencial de Toxicidade Humana e Ecotoxicidade são muito maiores para o LED. Os valores de ecotoxicidade chegam a ser quatro vezes maiores para o LED (DALE et al., 2011).

Apesar disso, entende-se que esses impactos podem se tornar menos relevantes. Isso se dá a partir das diferenças de eficácia luminosa e tempo de vida dos produtos LED em relação a outras tecnologias de iluminação (FRANZ; WENZL, 2017). Não só isso, mas produtos LED

com menor tempo de vida geram grande aumentos nos impactos (RICHTER; TÄHKÄMÖ; DALHAMMAR, 2019).

Partindo para as análises de uso, Franz e Wenzl (2017) criticam a escolha recorrente de duas categorias de análise. Eles consideram que as categorias de Consumo energético e Potencial de geração de gases de efeito estufa camuflam a relevância de outros impactos. De modo que prejudica a análise de outros impactos no ciclo de vida completo.

Ainda sobre essas duas categorias, nota-se que a malha energética muda drasticamente os resultados associados ao consumo energético na fase de uso. De modo que, quanto mais limpa a malha de energia, mais destaque os impactos de fabricação ganham (FRANZ; WENZL, 2017).

No panorama do fim de vida do LED, Franz e Wenzl (2017) indicam que alguns pressupostos da análise afetam muito a confiabilidade de uso dos dados. Principalmente fora da União Europeia e nos Estados Unidos. Isso se dá. Pois esta etapa do estudo foi feita somente nas condições destes países, onde o LED é classificado dentro de uma cadeia de resíduos perigosos ou eletrônicos, com metas de reciclagem e com meios disponíveis para melhor disposição final possível. Contudo, se pegarmos condições mais comuns, temos países sem respaldo para resíduos de LED, onde eles podem tanto ir para um final inadequado quanto ser reciclado em condições insalubres.

Uma parte importante do final de vida de LED são as Terras Raras concentradas no chip. Ainda não se tem uma perspectiva clara de como resgatar essas substâncias de produtos LED, sendo que o maior desafio é a viabilidade financeira de se separar esses componentes para posterior beneficiamento (GASSMANN; ET AL., 2016).

2.4. ILUMINAÇÃO PÚBLICA (IP)

Na segunda década de 1850, começou a implantação de energia elétrica. Isso foi um marco para a IP, pois a iluminação foi um dos primeiros serviços providos pela energia elétrica (ELETROBRAS, 2002). De fato, as primeiras usinas elétricas no Brasil tinham a Iluminação Pública e doméstica como objetivo (BARBOSA, 2000).

No Brasil, IP é um serviço público. Seu objetivo exclusivo é prover luz durante períodos noturnos ou em ocasiões de baixa luminosidade em logradouros públicos. O serviço pode ocorrer em regime periódico, contínuo ou eventual (ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA., 2010).

A prestação do serviço desse serviço de Iluminação é de competência municipal. Dado a realidade Brasileira, com mais de cinco mil municípios, o gerenciamento de IP a nível municipal produziu grande diversidade de sistemas, tecnologias, níveis de atendimento, relacionamento com a população e qualidade dos serviços prestados (FRÓES DA SILVA, 2006).

Contudo, a responsabilidade municipal não traz apenas variedade na IP. Mais essa delegação para as municipalidades deflagra a carência de competências técnicas e recursos humanos em cidades pequenas. Nesses contextos, a manutenção e expansão dos serviços públicos de iluminação apresenta pouco planejamento e gestão deficiente (FRÓES DA SILVA, 2006).

Quanto ao desenvolvimento da IP, o ano de 1934 é um ponto divisor. Antes desse ano, o fornecimento de energia elétrica era considerado uma atividade privada, exercida por meio de contratos de concessão feitos diretamente com as municipalidades. Foi com a Constituição de 1934 e o Código de Águas que a atividade passou a ser considerada como serviço público (BARBOSA, 2000).

Contudo, a IP permaneceu na esfera municipal, conforme o artigo 8º do Decreto Lei nº 3.763, de 25/04/1941. Esse decreto estabeleceu a necessidade de celebração de contratos entre os municípios e as concessionárias, a fim de prover iluminação em vias públicas. Além disso, foi o primeiro marco legal que definiu a IP como um serviço público e de competência dos Municípios (CODI, 1984).

Hoje, no Artigo 30 da constituição, temos o registro das competências dos municípios, dos quais se destaca a responsabilidade de organizar e prestar serviços públicos de interesse local, de modo direto ou por concessão. Nesse caso, a IP se insere como um serviço público e de interesse local, onde também há continuidade na responsabilidade do município de prestar o serviço (BRASIL., 1988).

Até 1996, a maior parte dos sistemas de IP era sustentada pelas concessionárias de energia e distribuição. Contudo, privatizações começaram a ocorrer após 1996. Após privatizar, muitas concessionárias não tiveram interesse em continuar a administrar a IP. Isso ocasionou uma transferência dos ativos dos sistemas de iluminação aos municípios. Tal transferência provocou a piora nos sistemas de vários municípios, que careciam de competências e mão-de-obra para administrar a IP (FRÓES DA SILVA, 2006).

Fróes da Silva (2006) observou duas alternativas principais para a prestação dos serviços de iluminação pública:

- 1) Municípios são responsáveis pela instalação da iluminação e proprietários dela. A municipalidade, neste caso, pode prestar o serviço de modo direto ou contratar uma empresa terceira, que pode ser a própria concessionária;
- 2) Concessionárias de energia são responsáveis pela instalação de iluminação e tem propriedade deles. Essas atribuições permanecem até o fim da concessão, se houver.

No caso 1, o município arca com todas as despesas relacionadas a prestação da Iluminação Pública: instalação, operação, manutenção e consumo energético. No caso 2, o contrato da concessão dita as condições para a exploração dos serviços, em especial quanto a propriedade das instalações após o tempo de concessão (FRÓES DA SILVA, 2006).

Em 2010, contudo, a situação dos ativos de iluminação sob responsabilidade de concessionárias foi alvo de uma resolução da ANEEL. Por meio de uma resolução, foi determinado o repasse de todos os ativos de IP para os municípios (ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA., 2010). Entende-se que a normativa visa corroborar a responsabilidade final da IP para os municípios, mesmo no caso de administração de terceiros.

2.5. ESTUDO DE CASO

Diante da demanda do estudo e compreensão de fenômenos complexos, o estudo de caso permite uma contemplação do mundo real em uma perspectiva holística dos casos observados (YIN, 2015). Esse método se origina nas ciências sociais, mas demonstrou grandes capacidades em várias disciplinas, das quais se cita a Gestão Operacional (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002).

Segundo Yin (2015), o estudo de caso é uma investigação empírica de um fenômeno na profundidade do seu contexto real. Quando os limites entre fenômeno e contexto não são claros, essa imersão se torna uma vantagem. Assim, o método promove uma investigação que enfrenta mais variáveis de interesse do que os dados iniciais podem apontar.

Dentro do contexto de análise operacional, um escopo das diferentes motivações para um estudo de caso é mostrado na Tabela 4. Há uma progressão nos propósitos de um estudo de caso, partindo da exploração de um tema para construção de teorias, aprimoramento e expansão. Contudo, cada uma exige peculiaridades de questões de pesquisa e estrutura únicas,

as quais competem para o bom resultado do estudo (HANDFIELD; MELNYK, 1998; VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002).

Tabela 4 – Combinação de objetivos de pesquisa de um estudo de caso com estrutura.

Propósito	Questões de pesquisa	Estrutura de Pesquisa
EXPLORAÇÃO Descobrir áreas para pesquisa e desenvolvimento de teorias	Existe algo interessante o suficiente para justificar uma pesquisa?	Estudo de casos profundos Estudos sem foco específico, com envolvimento de diversas áreas de conhecimento
CONSTRUÇÃO DE TEORIA Identificar e descrever variáveis-chaves Identificar relação entre variáveis Encontrar a justificativa da relação entre variáveis	Quais são as variáveis-chave? Quais são os padrões ou conexões entre variáveis? Por que essas relações existem?	Poucos estudos de caso Estudos de campo profundos Estudos de diversos casos
TESTE DE TEORIA Testar as teorias desenvolvidas em casos anteriores Prever resultados futuros	As teorias que foram construídas são capazes de suportar testes de dados empíricos? Os comportamentos observados estão de acordo com a teoria elaborada ou observamos algo incomum?	Experimentação Quase experimentação Estudo de casos múltiplos Amostras grandes da população de estudo
EXTENSÃO E REFINAMENTO DE TEORIA Busca aprimorar a estrutura da teoria por meio dos resultados observados	Qual generalizável é a teoria? Onde a teoria se aplica?	Experimentos Quase experimentação Estudo de caso Grande amostra de população

FONTE: Adaptado de Handfield e Melnyk (1998).

Os primeiros passos de um estudo de caso são a definição das questões de pesquisa e uma estrutura base. Uma estrutura base fornece uma visão prévia dos objetos de estudo e suas relações. Essa base explica os pontos principais a serem estudados, fatores, elementos, variáveis e as relações presumidas entre eles. Essa explicação pode ser feita de maneira ampla: descrição extensa, narrativa ou mesmo por meios gráficos. Por fim, a base conceitual feita irá ajudar o pesquisador a pensar com cuidado e de modo seletivo sobre os elementos e variáveis incluídos no estudo (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002).

Em sequência, as questões iniciais de pesquisa são feitas. Elas também podem ser feitas antes da base conceitual, a sua elaboração posterior tem vantagens. Nessa etapa, é importante ser claro em definir um foco para a pesquisa (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002).

Essas questões, contudo, não são pontos imutáveis. Elas podem evoluir, ser modificadas, desenvolvidas ou abandonadas durante a pesquisa. Essa maleabilidade é uma

força que permite desenvolver maiores conhecimentos do que as primeiras perguntas permitiam (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002; YIN, 2015).

Após a base conceitual e as questões de pesquisa, vem o Projeto. Nele, é estabelecida uma sequência lógica entre dados empíricos, as questões de pesquisa iniciais e, por fim, as conclusões. É nessa etapa que as unidades de análise e os critérios para interpretação para constatações são elaborados (YIN, 2015).

Junto disso, as questões de pesquisa são frisadas novamente, junto com proposições necessárias a aspectos dentro do escopo do estudo. Elas podem ser uma impressão sobre relações e funcionamento dos componentes a serem estudados. Esse cuidado com o projeto visa evitar situações nas quais a evidência não corresponde as questões da pesquisa (YIN, 2015).

Todo o desenho do estudo começa a tomar forma palpável na definição dos casos a serem estudados. A quantidade, tipo de casos, fontes de informação e tipos de informação são feitos a partir da base conceitual e preposições. Dados começam a ser coletados e organizados. Caso haja dissonância, é caso de reavaliar tanto a escolha dos casos, seus dados, como os aspectos anteriores de planejamento e projeto (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002; YIN, 2015).

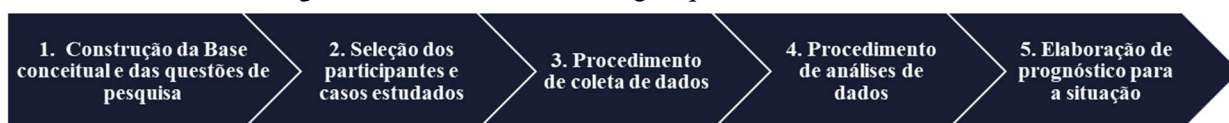
Nesse ponto, chega-se ao ponto em que os casos estão construídos com seus dados e respectivos dados coletados. É hora de organizar e analisar as informações. Para isso, um bom ponto de partida é a construção de tabelas e matrizes entre os elementos, constructos e atores presentes. Outras maneiras de fazer isso são listas, mapas conceituais, rede de relações etc. Essas formas de visualização dos dados são um meio de apresentar a informação de modo sistemático, o que permite que interpretações válidas sejam construídas de modo reconhecível (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002).

A parte final do estudo de caso é a busca do pesquisador por explicações e casualidades referentes aos achados das informações apresentadas. Mas validade dessas afirmações finais não é espontânea, a força delas depende de como diferentes evidências do estudo apontam para as mesmas conclusões (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002; YIN, 2015).

3. METODOLOGIA

O Estudo de múltiplos casos descritivos foi utilizado para a análise da gestão de iluminação pública e seus resíduos em 9 municípios que possuem Luminárias LED instaladas. Com base em Voss, Tsikriktsis e Frohlich (2002) e Yin (2015), o estudo seguiu os seguintes passos:

Figura 4 – Passos da metodologia aplicada nesse trabalho.



FONTE: Elaboração própria com base em Voss, Tsikriktsis e Frohlich (2002) e Yin (2015).

3.1. CONSTRUÇÃO DA BASE CONCEITUAL

Ao iniciar a construção dessa base conceitual, os seguintes pontos foram considerados como proposições essenciais:

- 1- A EC é um objetivo viável em termos ecológicos, tecnológicos e ambientais para os sistemas de iluminação pública;
- 2- Os impactos do ciclo de vida completo são o contorno de áreas mais críticas ou não de impactos nos sistemas de iluminação;
- 3- Os sistemas de iluminação já possuem uma boa infraestrutura de manutenção para as tecnologias antecessoras ao LED, de modo que há um potencial de isso ser herdado na renovação tecnológica;
- 4- Características do LED, como sua durabilidade, ou as possibilidades criativas de design são oportunidades que facilitam a implantação da EC na IP.
- 5- O escopo do estudo trabalha desde o meio de vida, quando a prefeitura recebe e instala o equipamento, até o seu final de vida. O início de vida foi desconsiderado pois foge do escopo do estudo de casos municipais de IP.

Além disso, como base para análise dos casos, foram selecionadas variáveis chaves para a iluminação pública. Esses pontos podem se relacionar com dificuldades, oportunidades, forças e fragilidades dos sistemas de iluminação estudados.

São as variáveis: Capacidade administrativa municipal dos sistemas de iluminação; Fluxos de resíduos; Fabricantes de LED; Incentivos dentro da Iluminação Pública; falta de recursos; projetos de instalação de LED.

3.2. DEFINIÇÃO DAS QUESTÕES DE PESQUISA

Perguntas coerentes guiam o trabalho na coleta e análise de cada dado. Elas são a base para o desenvolvimento do estudo de caso. A pergunta que guiou esse trabalho é:

- Quão próxima dos fluxos de uma EC é a gestão de LED na Iluminação Pública no Brasil?

3.3. SELEÇÃO DOS PARTICIPANTES E CASOS ESTUDADOS

Os casos foram selecionados de um trabalho prévio realizado pela Eletrobras em parceria com a empresa Genos Consultoria e Engenharia Ambiental. Nesse trabalho houve nove visitas técnicas em municípios diferentes. O critério de escolha do estudo envolveu a abranger todas as regiões do Brasil de diferentes portes, conforme os agentes municipais concordavam em nos permitir visitas e se no município foi instalado equipamentos LED para IP.

Os municípios visitados foram:

- Brasília (DF)
- Campo Grande (MS)
- João Pessoa (PA)
- Lauro de Freitas (PA)
- Manaus (AM)
- Matão (SP)
- Poços de Caldas (MG)
- Porto Alegre (SC)
- São Paulo (SP)

3.4. PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

As informações dos casos encontravam-se em documentos sistematizados pela Consultoria Genos, incluindo outros dados das cidades, fotos e anotações dos consultores. Nessas visitas técnicas o formulário do Anexo A foi aplicado. Dentro deles, as seguintes informações sobre cada município foram coletadas:

- População
- Atores internos da IP
- Atores externos da IP
- Modelo do cadastro dos equipamentos do parque de IP e sua operação
- Número de luminárias total e do tipo LED
- Histórico de luminárias LED (projeto de implantação)
- Procedimentos de manutenção e descarte de luminárias LED
- Responsáveis pelo descarte de equipamentos
- Condições de armazenamento de equipamentos retirados da IP
- Fotos da visita

3.5. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DE DADOS

Com os dados, verificou-se a presença dos fluxos da EC em cada caso para os equipamentos LED. Os fluxos utilizados para a análise são da via tecnológica do diagrama borboleta. A partir dos nove casos desenhados, elaborou-se uma tabela resumo sobre a interpretação dos casos segundo a ótica de resíduos e EC. Além disso, um diagrama resumo também foi elaborado.

Na análise, há cinco fluxos de interesse: Manutenção, Reuso e compartilhamento, Remanufatura e recondicionamento, Reciclagem e Descarte. Eles foram analisados em cada caso a partir das informações já descritas.

A avaliação se pautou em dois eixos principais, presença e qualidade. Com base na análise dos casos, buscou-se construir critérios para avaliar a existência dos fluxos e qualificá-los. Lembrando que os indicadores selecionados e produzidos devem refletir aspectos da EC.

3.1. ELABORAÇÃO DE ESTRUTURA DE TRABALHO

A partir dos achados encontrados, uma lista de fatores é elaborada. Esses fatores são relacionados a pontos positivos e negativos encontrados e generalizados para um panorama

geral. Um panorama geral é o ponto de partida para a construção da estrutura de trabalho a ser proposta. Essa proposição objetiva aproximar a EC da IP com LED, se apropriando dos fatores encontrados no estudo de caso exploratório.

A base das propostas é fundamentada na EC, ramificada nos fluxos de descarte e ordenada de acordo com o diagnóstico encontrado da IP. Assim, busca-se criar propostas para impactar a situações dos fluxos de descarte. Onde a prioridade é estabelecida de acordo com os pontos críticos já diagnosticados.

A partir disso, constrói-se uma tabela para a apresentação dos resultados e um diagrama. O diagrama busca ilustrar uma sequência ao estado dos fluxos de descarte já diagnosticado. Sendo essa sequência um ponto intermediário para a total implementação da EC na IP, por meio das oportunidades da tecnologia LED.

A tabela, além da ordem de prioridade das propostas, busca também relacionar os atores de interesse envolvidos e outros impactos relacionados com cada linha de trabalho proposta.

4. RESULTADOS

Os nove casos foram analisados, tendo como base os fluxos tecnológicos da EC. Exceto pelo fluxo de Remanufatura e Recondicionamento, todos os outros foram identificados. O fluxo mais presente foi o de reciclagem (todos os casos), seguido pelo de manutenção (8 casos). Nas próximas seções, são discutidos os resultados para cada um dos fluxos.

Na Sequência, vem a definição de critérios, frutos da análise dos casos, para verificar a presença e qualidade dos fluxos circulares de resíduos de Luminária LED na IP, dada a realidade brasileira diagnosticada.

Na última parte dos resultados, apresenta-se uma proposta de estrutura de trabalho para promover maior avanço em direção à EC na gestão de IP.

4.1. MANUTENÇÃO

A manutenção é o fluxo mais interno dentro dos ciclos de materiais tecnológico. Ou seja, é a maneira com maior potencial para evitar a geração de resíduos e perpetuar o valor agregado das luminárias LED. A procura de evidências da sua presença obteve resultados afirmativos em oito casos.

O caso do Município de Matão foi o único onde não se encontrou indício de manutenção de Luminárias LED. A equipe do município tinha histórico de realizar procedimentos de concerto nas tecnologias anteriores ao LED, mas não houve continuidade deles após a renovação tecnológica.

Os fatores que foram considerados principais nisso foram o tamanho do município e os termos de garantia dos produtos LED. O município é o menor de todos desse estudo e, logo, possui dificuldades e muitas limitações administrativas. O principal motivo listado para os técnicos não realizarem procedimentos de conserto e reparo foi a garantia das luminárias. O receio de perder a garantia impedia até mesmo a abertura e diagnóstico de defeitos.

No caso de Lauro de Freitas, também houve empecilhos para manutenção; os técnicos informaram que mesmo nas situações em que eles sabiam qual era o problema, a garantia era sempre priorizada.

Mesmo com a atuação de um consórcio intermunicipal, entende-se que a situação administrativa foi um grande limitante geral e a situação da garantia é cômoda para não se buscar mais mudanças.

Nos demais oito casos, a garantia não impediu totalmente práticas de manutenção, mas foi um grande limitante em cinco municípios. Trocar a luminária com o fabricante sempre foi priorizado no lugar de um reparo.

Sobre os três casos em que o reparo acontecia independente da garantia, é importante destacar primeiro o município de Campo Grande, onde a fabricante das luminárias faliu, de modo que depender da garantia era inviável. Contudo, a taxa de sucesso em consertar as luminárias foi considerada baixa. Os conhecimentos para reparo foram construídos por tentativa e erro sem conhecimento sobre a tecnologia e a estrutura das luminárias LED.

Outro caso com manutenção foi o de João Pessoa. Os reparos, nesses casos, não eram feitos pela equipe do município, devido ao risco de perder a garantia, mas pelo próprio fabricante. A fábrica mandava um suporte técnico para consertar as luminárias sempre que uma quantidade acumulava. Os casos sem possibilidade de reparo e com garantia já eram coletados na mesma visita.

Poços de Caldas é o último dos casos em que se observou a manutenção sem receio de perda de garantia. Contudo, a equipe constatou outro desafio para realizar os reparos: componentes internos que barram o acesso a partes com possíveis falhas. A Figura 5 mostra um driver que retrata essa dificuldade, pois o componente tem uma película que o veda por inteiro e nenhum acesso aparente para ser desmontado.

Figura 5 – Driver de Luminária LED com design que barra acesso a componentes internos no município de Poços de Caldas – MG.



FONTE: Eletrobras et al. (2019).

Nos casos em que a garantia atrapalhou a realização de reparos, pode-se observar mais fatores relevantes ao fluxo. Em Brasília, os técnicos da área de manutenção relataram outra dificuldade na realização de reparos nas luminárias. Para eles, o design dos componentes

internos era complexo demais. Contudo essas tentativas só ocorriam nos casos de luminárias LED com falha que não foram aceitas pela garantia.

Além disso, três relatos de manutenção citam a troca de componentes internos das luminárias como reparos bem-sucedidos: Manaus, Porto Alegre e São Paulo. Esses componentes eram o Dispositivo de Proteção contra Surto (DPS) e o Driver. Observa-se que essa manutenção por troca de componentes tem semelhança com aspectos de modularidade de produtos da EC.

Nota-se que os três municípios são de grande porte, com mais de 1,5 milhões de habitantes, e capitais estaduais. Além de que São Paulo e Manaus possuem um vínculo muito próximo com fabricantes. Entende-se que a alta demanda comercial por IP e alta capacidade administrativa tenham relação com essa maturidade nos relatos de manutenção e relação com o fornecedor de Luminárias LED.

4.2. REUSO E COMPARTILHAMENTO

O reuso, na definição clássica do diagrama borboleta (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013), é o repasse ou venda para outros usuários, de modo a aproveitar toda a vida útil do produto. Dentro da IP, contudo, o termo possui limitações, que é expressa na relação de três fatores: natureza jurídica do usuário, muitos ativos e atuação em extensas áreas.

Em suma, as possibilidades do reuso tradicional não fazem jus ao tamanho das responsabilidades e alternativas dentro da gestão de iluminação de vias municipais. Dado a quantidade de ativos e área de atuação, a reutilização não acontece de forma espontânea e sem uma estruturação prévia. Assim, incluímos “reutilização interna” ao sentido original de reuso, o que inclui o reaproveitamento de ativos pelo próprio usuário. Isso dá visibilidade e importância às iniciativas de reinstalação de luminárias LED usadas. Sem essa adaptação, não haveria muito a ser relatado, com ela, seguimos a descrição do que foi encontrado nos casos.

Na análise de indícios do fluxo de Reuso na IP, considerando o “reuso interno”, observou-se duas práticas relacionadas com a aplicação da tecnologia LED. Uma delas ainda é relacionada com as tecnologias antigas e a outra é com os próprios componentes da luminária LED. No total, quatro casos apresentaram indícios de Reuso: Brasília, Campo Grande, João Pessoa e São Paulo.

A primeira prática, acontece logo após troca tecnológica de um ponto nos casos de Brasília e João Pessoa. Assim, após a instalação das Luminárias LED, os equipamentos com lâmpadas de descarga em vapor metálicos eram guardados. Essa armazenagem foi feita de modo adequado, de modo a permitir e deixar disponível esses ativos diante de qualquer necessidade dentro do município.

Como será observado no tópico de Descarte, nem todos os municípios tiveram um cuidado desse tipo com os equipamentos de iluminação retirados para que luminárias LED fossem instaladas. A Figura 6 mostra como eles colocaram os equipamentos dentro de um armazém, sem contato com solo. Além disso, o equipamento estava organizado e protegido de intempéries do clima.

Figura 6 – Equipamentos de iluminação funcionais retirados da Iluminação Pública para serem substituídos por luminárias LED.



FONTE: Eletrobras et al. (2019).

A segunda prática foi observada em Campo Grande e São Paulo. Nessas cidades, as luminárias LED com falha e sem garantia eram desmontadas para recuperar seus componentes funcionais. Assim, esses componentes eram reusados para consertos de outras luminárias com falha. Nesses casos, o fluxo de Reuso criado tem alta relação e estimula as práticas de manutenção.

Contudo, deve-se ressaltar as condições de Campo Grande, onde eles não tinham respaldo algum do fabricante das luminárias LED instaladas. Dada a falência, até mesmo o acesso a componentes originais para os reparos passa a se tornar um desafio.

Voltando a interpretação de Reuso no sentido interno, o Caso de São Paulo mostra outro fator que torna significativa o adendo: Os gestores de iluminação pública têm previsão de completa substituição do parque de iluminação LED, sendo que a data prevista não bate com o final da expectativa de fim de vida útil das luminárias LED já instaladas. De modo que, com renovações em massa das luminárias públicas, equipamentos já em uso e com vida útil a ser aproveitada ficam sujeitos a serem descartados.

Enfatizar o reuso interno é necessário para impulsionar infraestruturas que reaproveitem ao máximo os ativos funcionais da iluminação pública. Tal reaproveitamento teria menos visibilidade ao pairar entre as definições clássicas de Reuso e Manutenção da EC, o que possibilita maciça geração de resíduos de luminária LED funcionais. Apesar do ponto principal exposto para defender a prática e terminologia, tal proposta visa que tal reuso foque na substituição de tecnologias anteriores, promovendo economia de energia.

4.3. RECONDICIONAMENTO E REMANUFATURA

Dos nove casos, não foi identificado nenhum indício de Recondicionamento e Remanufatura. Contudo, encontrou-se uma oportunidade para a sua implementação no caso de São Paulo. O contrato de Parceria Público-Privada que é responsável pelo município possui uma peculiaridade no seu contrato, como já foi observado anteriormente.

Assim, nesse contrato já há um plano para substituição total do parque LED antes do fim de vida útil do equipamento já instalado. A substituição mantém a tecnologia de luminárias LED, sendo o seu objetivo acompanhar outros avanços nos produtos de iluminação, relativos a controle de operação e internet das coisas.

Se isso ocorrer, ou é uma grande oportunidade para usar o material LED retirado em outros lugares ou é um risco de todo esse ativo virar resíduo, devido a mal armazenamento ou mesmo abandono.

4.4. RECICLAGEM

O fluxo de reciclagem foi o único com indícios observados em todos os casos. Contudo, há aspectos que indicam baixa qualidade e atenção antes de otimismo.

Dois fatores foram observados como de grande relação com reciclagem: equipamento coletado pelo fabricante e resíduos de luminárias LED sendo vendidos. O caso de Brasília foi único em que as duas coisas aconteceram simultaneamente.

Tratando primeiro da venda de resíduos, a prática foi observada em 4 casos. As cidades em que isso ocorreu eram de médio a grande porte. Além de Brasília, Campo Grande, Lauro de Freitas e João Pessoa fazem parte desses casos. Contudo vale se observar das peculiaridades de cada processo em que ocorreu a venda.

Brasília apresentou o molde de leilão para realizar a venda. Com os técnicos e entrevistados não se conseguiu muita informação sobre os compradores desses leilões, mas eles explicaram que são recicladores informais. O interesse deles nos resíduos de luminária LED é no valor agregado das partes de alumínio, que compõe o corpo e dissipadores de calor. Quanto as partes eletrônicas, não se sabe qual o destino. Entendeu-se que esse perfil de comprador se estende para os demais casos em que se vendeu o resíduo de Iluminação Pública.

João Pessoa repete o procedimento de realização de leilões municipais dos resíduos eletrônicos. Contudo Campo Grande relata um processo em que há venda indireta. Firms que coletam o resíduo é que realizam a venda, também no modelo de leilões.

No município de Lauro de Freitas, não há indício claro do molde de venda. Contudo, as luminárias LED são entregues a prefeitura pela empresa terceira que realiza a gestão do parque de iluminação da cidade. Essas entregas apresentavam equipamentos LED misturados a um lote de outras sucatas de IP. Nesses lotes, vários outros resíduos com partes metálicas estão incluídos, dando valor agregado a reciclagem de metais.

Quanto aos casos em que a fabricante coletou as luminárias com defeito, usou-se o caso de Manaus como um precedente para considerar todos como sendo de reciclagem. Na capital do Amazonas, observou-se que o fabricante, além de coletar, providenciava uma recicladora para tratar as luminárias LED com falha. Manaus possui uma grande proximidade com o fabricante, tal proximidade atípica possibilitou saber dessas informações dos resíduos após a coleta.

Os casos de Matão, Poços de Caldas e Porto Alegre são casos em que as evidências do que acontece com o resíduo são limitadas. Após a coleta por garantia, a responsável por gerir o parque de iluminação não possui mais nenhuma informação do destino dessas luminárias LED, mas considerou-se que foi reciclagem com base no precedente de Manaus.

São Paulo também apresentou coleta de resíduos por garantia, mas, somando a isso, o fabricante também coletava luminárias LED sem garantia. Segundo o que foi relatado, há um acordo de proporção, onde luminárias sem garantia são coletadas de modo proporcional as que possuem garantia. Sendo que as que tem garantia sempre são a maior parte do que foi coletado. A Figura 7 demonstra como esse equipamento é armazenado em ótimas condições para o fabricante coletar.

Apesar da alta recorrência de reciclagem, ela ocorre de maneira incerta e sem busca de melhoria. O principal ponto fraco é a falta de empenho em reciclar os componentes eletrônicos e falta de evidência dos processos de reciclagem envolvidos. Interpreta-se isso,

pois os resíduos de luminárias são vendidos em leilões de sucata pelas prefeituras. Tais eventos são atendidos por recicladores informais e ferros velhos, os quais esperam comprar partes metálicas para revenda. Nesse contexto, não há qualquer compromisso na reciclagem dos resíduos eletrônicos: a prefeitura se desprende das obrigações e, ao mesmo tempo, o comprador não se compromete a reciclar os componentes internos. Após revender o corpo metálico e dissipador de calor, os dados não conseguem esclarecer o paradeiro de placas de circuito, drivers, fios e outros itens. A falta de entendimento do futuro de resíduos coletados pelos fabricantes é outra questão a ser melhorada.

Figura 7 - Luminárias LEDSTAR armazenadas para troca do fabricante no município de São Paulo - SP.



FONTE: Eletrobras et al. (2019).

4.5. DESCARTE

O fluxo de descarte foi identificado em quatro fluxos, sendo que em apenas um houve um descarte direto e nos demais casos, práticas análogas ao descarte. Campo Grande foi o município com relato de descarte direto.

Nos outros casos, o que foi considerado como descarte foram práticas de armazenamento de resíduos em péssimas condições: contato com o solo e exposição a intempéries do clima.

Brasília foi o maior caso em que se pode verificar condições péssimas de armazenagem. Nas Figura 8 e Figura 9, observam-se o armazenamento de resíduos

eletrônicos da IP ou equipamentos retirados de campo em contato com agentes intempéries e em contato com solo permeável, de modo a ser um exemplo de armazenamento de condições ruins.

Figura 8 – Local de armazenamento de resíduos da Iluminação Pública de Brasília em contato com tempo e solo permeável.



FONTE: Eletrobras et al. (2019).

Figura 9 – Local de armazenamento do corpo de luminárias antigas em Brasília, em contato com vegetação, agentes climáticos e solo permeável.



FONTE: Eletrobras et al. (2019).

Poços de Caldas apresentou armazenamento de resíduos. Ainda há pouca quantidade, mas ainda fica uma situação incerta de como esse resíduo será gerido.

Em Porto Alegre foi observado uma grande quantidade de luminárias LED falhas em armazenamento, sem destino certo. A Figura 10 mostra um pouco das condições desses resíduos. Apesar de se encontrarem em cima de área cimentada e coberta, a umidade evidente no chão demonstra alto contato das luminárias com intempéries climáticas.

Figura 10 – Armazenamento de luminárias convencionais.



FONTE: Eletrobras et al. (2019).

4.6. AVALIAÇÃO DE FLUXOS

A partir do que foi encontrado nos 9 casos de Iluminação Pública usando tecnologia LED, as Tabelas 5 e 6 foram construídas. A Tabela 5 é para constatar presença dos fluxos circulares da Economia Circular. A Tabela 6, por sua vez, é para avaliar a qualidade desses fluxos. As duas possuem um sistema de verificação de presença de fatores para concluir tanto a presença quanto a qualidade desses fluxos.

Tabela 5 – Critério para analisar se o fluxo é presente no caso, se valendo da presença de um número mínimo de fatores.

Fluxo analisado	Número de indícios para supor existência	Lista de fatores considerados como indicadores de presença
Manutenção	2	Equipe de manutenção municipal é capaz de realizar consertos em luminária LED Luminárias LED com defeitos são consertadas e devolvidas a iluminação pública Luminárias com defeito são encaminhadas para a elaboração de laudo técnico
Reuso e compartilhamento	1	Armazenamento e testagem de equipamentos retirados do campo para renovação da IP, com objetivo de reutilizar, mesmo que sejam de outras tecnologias Previsão em contrato de reutilização de equipamentos retirados em campo e destinação para RC
Remanufatura e recondicionamento	1	Fabricante realizou recondicionamento ou remanufatura em luminárias LED usadas Fabricante vendeu equipamentos reconicionados ou remanufaturados
Reciclagem	1	Resíduos eletrônicos são destinados para reciclagem Resíduos eletrônicos são leiloados Luminárias Led com defeito são mandadas para o fabricante pela garantia*
Descarte	1	Armazenamento por tempo indefinido de equipamentos LED danificados Armazenamento inadequado de resíduos de luminárias LED Registro ou relato de operação de descarte

Fonte: Elaboração própria.

Notas: * Em contato com fabricante, observou-se que há prática de reciclagem de equipamentos defeituosos após a sua análise.

Como o teor do trabalho traz um grande teor exploratório dos potenciais da Economia Circular, achou-se válido um número de indícios baixos para todos os fluxos, exceto para o da manutenção. Essa escolha deve-se a proposição de que a manutenção é um dos poucos fluxos que deveria possuir alguma estrutura, a qual foi herdada das tecnologias de iluminação anteriores ao LED. As listas de indicadores das Tabelas 5 e 6 se desenvolveram de modo iterativo com os achados dos estudos de caso. De início, ela abordava aspectos diretamente relacionados com a Economia Circular. Contudo, o andamento dos casos demonstrou que eles não bastavam para uma análise exploratória e contextualizada ao Brasil. Assim, peculiaridades frequentes em vários casos ou em um caso com destaque foram acrescentadas aos poucos.

Tabela 6 – Critério para analisar se o fluxo é de boa qualidade no caso, se valendo da presença de um número mínimo de fatores.

Fluxo analisado	Número de indícios para supor que o fluxo tem boa qualidade	Lista de indicadores usados para cada fluxo
Manutenção	2	Conserto é realizado por equipe situada no próprio município ou nas vizinhanças Conserto e laudo técnico são priorizados antes de se acionar a garantia Há componentes compatíveis no mercado para conserto das luminárias LED Luminárias compradas apresentam arranjo que facilita a troca de componentes e laudo técnico
Reuso e compartilhamento	2	Armazenamento e testagem de equipamentos retirados do campo para renovação da IP, com objetivo de reutilizar, mesmo que sejam de outras tecnologias Reutilização de equipamentos LED retirados de campo Utilização de equipamentos LED retirados de outros municípios
Remanufatura e condicionamento*	-	-
Reciclagem	1	Empresa que coletou resíduos ou os compro emitiu certificado de recolhimento ou de reciclagem das luminárias LED em específico Fornecedor encaminhou ao município certificado de destinação de luminárias LED coletadas por causa da garantia
Descarte**	Sempre será de má qualidade	-

Fonte: Elaboração própria.

Notas:

* Preferiu-se não criar uma avaliação de qualidade para Remanufatura, pela sua ausência nos casos.

** Como descarte tem que ser evitado ao máximo, todos foram classificados como de má qualidade.

Com base nesses critérios, fez-se a Tabela 7. Essa Tabela contém a análise de cada cidade. Se um fluxo foi identificado, ele possui sua qualidade apontada. Se não foi observado nenhuma evidência de presença, o espaço foi deixado em branco. O símbolo ‘+’ indica baixa qualidade e ‘++’, boas condições.

Apesar do fluxo de manutenção ter grande presença, contatou-se barreiras para que reparos fossem mais frequentes e bem-sucedidos. Estes empecilhos são os termos de garantia e design interno complexo. A garantia foi citada por gestores e técnicos, já o arranjo interno foi apontado pelos técnicos principalmente. As equipes de manutenção descrevem que o interior dessas luminárias foi intencional por parte dos fabricantes, podendo incluir até blindagem de partes; o reparo só era possível ao violar permanentemente algumas estruturas dos componentes da luminária.

Tabela 7 – Análises dos fluxos de cada município, onde ‘+’ sinaliza baixa qualidade, ‘++’ aponta boas condições e branco indica ausência.

Casos	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Cidade	Brasília	Campo Grande	João Pessoa	Lauro de Freitas	Manaus	Matão	Poços de Caldas	Porto Alegre	São Paulo
População	3.015.268	895.982	809.015	198.440	2.182.763	83.170	167.397	1.483.771	12.252.023
Manutenção	+	++	++	+	++		++	++	++
Reuso	+	+	+						+
Remanufatura									
Reciclagem	+	+	+	+	+	+	+	+	++
Descarte	+	+					+	+	

Fonte: Elaboração própria.

Nota: *População estimada para 2019 (IBGE, 2019).

Desconsiderando o descarte, contou-se os fluxos para cada município. O maior número de fluxos simultâneos foi três e ocorreu em quatro casos. Nota-se que os quatro casos sempre corresponderam a locais com população maior que 800 000 e os fluxos coincidem: manutenção, reuso e reciclagem. Cidades com menos de 200 000 habitantes, com exceção do caso peculiar de Poços de Caldas, apresentaram dificuldades para apresentar mais de dois fluxos. Além disso, o fluxo de condicionamento não foi identificado em nenhum caso.

Em Manaus e São Paulo, a proximidade das fabricantes de LED melhorou a manutenção e reciclagem. Há alguns fatores que podem ter colaborado para isso além da proximidade geográfica, como o grande porte dos municípios e decorrente demanda de produtos LED.

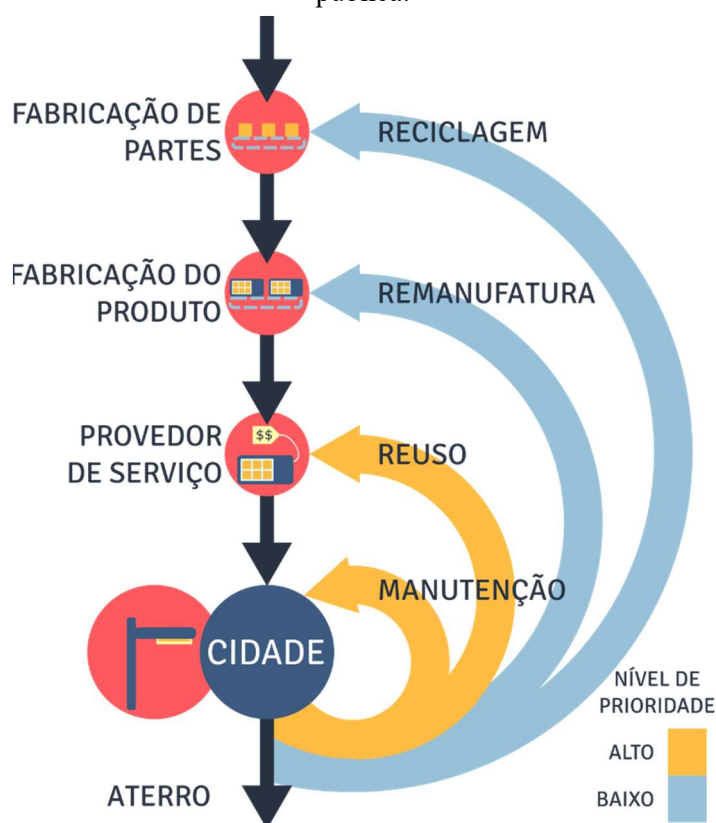
O caso de Poços de Caldas também é distinto dos demais. Todos os municípios receberam a responsabilidade e os ativos da iluminação pública a partir de 2014 (ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA., 2010). Depois do repasse, muitas cidades de pequeno e médio porte ainda estão com problemas de gestão do sistema já consolidado, o que compromete também o gerenciamento dos resíduos de iluminação pública. Contudo, Poços não teve esse empecilho, pois a empresa fornecedora e que geria a rede de iluminação já era de propriedade municipal.

4.7. PROPOSTA DE ESTRUTURA DE TRABALHO

Como a Figura 11 mostra, a proposta de estrutura de trabalho foca nos ciclos de manutenção e reuso. Isso se dá pensando na urgência de mudanças para os próximos cinco anos. Nessa metade de década, muita renovação de LED ocorrerá, junto com a evolução de riscos de descarte de equipamentos LED antigos e funcionais.

Para expressar a relevância da renovação de luminárias LED a partir de 2025, observa-se a situação dos Estados Unidos em 2015, com 20% da iluminação viária já com LED instalado (NAVIGANT CONSULTING INC. et al., 2016). Assim, em 2025, essa parte LED do parque de iluminação completará 10 anos de uso no mínimo, de modo que atingiu o tempo de vida útil esperado pelo equipamento.

Figura 11 – Prioridades da estrutura de trabalho para implementar Economia Circular na Iluminação pública.



Fonte: Elaboração própria com base no diagrama de economia circular de (EMAF, 2013).

A partir da análise dos casos, dos fluxos e das prioridades, criou-se a estrutura de trabalho. Na Tabela 8 estão todas as diretrizes do framework, suas descrições, fluxos impactados e atores envolvidos.

De início, para aumentar e aprimorar os índices de manutenção, pontua-se duas necessidades de melhora na garantia dos produtos LED. O primeiro é que, ao comprar

luminárias LED, os responsáveis em cada município devem negociar para que os termos de garantia sejam adaptados pelo fabricante. Como resultado dos ajustes, espera-se que haja maior liberdade para reparos sem perda de garantia. O segundo ponto é que a garantia só recolha componentes com defeito e não a luminária inteira, para que as partes úteis e o processo de manutenção fiquem nas mãos de equipes locais.

Tabela 8– Descrição da estrutura de trabalho para reduzir resíduos de luminárias LED em iluminação pública por meio da Economia Circular e indicação de atores chave.

Diretriz	Descrição	Fluxo	Ator chave
Aperfeiçoar a manutenção	Alguns termos de garantia dificultam reparos locais. Para melhor manutenção das luminárias LED, é necessário conciliar a garantia, os interesses dos fabricantes e a operação municipal de manutenção. Com isso, espera-se aumentar reparos in loco, evitar descarte de equipamento, processos de reparos onerosos e acionamento de garantia para o equipamento inteiro	Manutenção Reuso	Fabricantes Municípios
Aprimorar o reuso interno	Municipalidades podem minimizar descarte ao reutilizar componentes usáveis de uma luminária sem conserto. Para isso, fabricantes e fornecedores devem ajustar termos de garantia para recolherem apenas os componentes com falha. No futuro, quando novas gerações de luminária LED substituírem os pontos LED instalado, deve-se prever a reutilização do equipamento antigo antes de cogitar seu descarte até que se esgote sua vida útil	Reuso Manutenção	Fabricantes Municípios
Executar reciclagem de alta performance	No contexto nacional, a administração da iluminação pública precisa implementar práticas que aumentem a taxa de reciclagem nos componentes eletrônicos de luminárias LED. Além disso, é preciso expandir a recuperação de materiais para além dos metais usados no corpo e dissipador de calor	Reciclagem Reuso	Municípios Recicladores
Aplicar responsabilidade compartilhada nos resíduos	A implementação da responsabilidade compartilhada dos resíduos impulsiona fabricantes e fornecedores a exercerem papel ativo no fim de vida adequado dos seus produtos, mesmo se não tiver garantia. Espera-se com isso maior colaboração na cadeia de produção para minimizar resíduos, diminuir descarte incorreto e melhorar os fluxos da economia circular	Manutenção Reciclagem	Municípios Fabricantes
Empoderar pequenos municípios	Pequenas municipalidades têm menor demanda de luminárias LED em comparação a grandes centros. Essa diferença causa menor poder de negociação para estabelecer compras e projetos com maiores benefícios. Mas isso é remediado se os municípios elaborem e executem seus projetos e compras juntos. Como resultado, melhores negócios de compra, projeto, manutenção, operação e gestão de resíduos ficam disponíveis e possíveis	Manutenção Reuso Reciclagem	Vários municípios

Fonte: Elaboração própria.

A segunda diretriz vem para aumentar a taxa de reciclagem. Depois de um reparo malsucedido e sem abrangência de garantia, o município deve, antes de leiloar, segregar os

lotes de sucatas de acordo com a tipologia, em especial os que são resíduos eletrônicos. Assim evita-se duas coisas: que recicladores comprem sucata visando apenas reciclar partes com maior valor, como a carcaça de alumínio; que leilões e outras formas de venda sejam usados para evadir a responsabilidade de quem leiloa em garantir uma destinação adequada para os componentes eletrônicos.

Em seguida, é preciso aplicar a responsabilidade compartilhada dos resíduos para abranger todos desde o município até os fabricantes. Este princípio já é previsto na Política Nacional de Resíduos Sólidos do Brasil (BRASIL, 2010), e prevê que a gestão de resíduos comece na cadeia de produção e envolva todos do ciclo de vida do produto. Os estudos de caso indicam que as fabricantes têm maior responsabilidade e qualidade no processo de reciclagem das luminárias LED, contudo é necessário averiguar mais para evidenciar e mostrar a discrepância em comparação a situação dos municípios.

Além das luminárias LED que fabricantes já recolheram por falhas, as indústrias podem ajudar na gestão dos equipamentos sem garantia. Esse auxílio, contudo, seria restrito pela proporção em relação ao montante que já seria coletado dentro dos termos de garantia, assim como o caso de São Paulo.

Contudo, ajustar as propostas com fornecedores e fabricantes é difícil para municípios de pequeno porte. Esse ponto é tratado na última proposta de empoderar municípios pequenos.

Ao permitir que pequenas municipalidades tenham maior poder de negociação, a relação de formulação de propostas com fornecedores é facilitada. Para obter essa capacidade, defende-se a união de municípios pequenos nos projetos, compra, instalação e gestão da iluminação LED. Se possível até mesmo instalar um consórcio público para operar a manutenção e operação do parque de iluminação.

Ao concentrar a demanda em um negócio, o interesse do mercado de iluminação LED fica maior, de modo que melhores condições de compra e serviço se tornam possíveis. Outro benefício disso é a possibilidade de economizar recursos com o trabalho administrativo de todo processo (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS – CNM, 2016). Esse molde, no entanto, não é garantia de ausência de problemas, pois Matão – SP funciona dentro de um consórcio e mostra que ainda é necessário explorar as dificuldades específicas de consórcios.

No geral, a estrutura de trabalho visa reduzir resíduos na Iluminação pública, mas, secundariamente, os gestores municipais de iluminação devem consolidar a proposta de reuso interno dentro do fluxo clássico. Como os casos já apontam, as novas gerações de LED

substituirão as já instaladas, contudo antes do fim de vida útil dos equipamentos que já estavam em uso. A estrutura de trabalho visa reutilizar equipamentos, o que é uma solução fácil de ser considerada, com grande potencial de reduzir resíduos e consumo energético.

Quanto ao fluxo de condicionamento e remanufatura, nenhum caso apontou sua presença, o que limita qualquer indicação neste trabalho do mesmo nível que as outras propostas. É necessário que ocorram ou se identifiquem iniciativas nesse fluxo para trabalhos futuros possam sugerir avanços.

5. CONCLUSÕES

A iluminação pública com LED possui limitantes visíveis para implantação da EC. As principais barreiras se concentraram no fluxo de manutenção. A presença de blindagem de componentes internos, arranjos de difícil manuseio somados a termos de garantia, impedem ou desencorajam reparos na iluminação pública a nível municipal. Apesar das dificuldades na manutenção se originarem na produção e design dos produtos, a estrutura de trabalho proposta aponta melhorias iniciais que não dependem da fabricação. Contudo eles são imprescindíveis no longo prazo, pois a EC tem grande potencial de avanços desde o nível de projeto de novas luminárias LED, o que melhora todos os fluxos tecnológicos.

Não depender da iniciativa de fabricantes pode parecer drástico, mas este estudo de casos encontrou base para que Municípios protagonizem o início de uma EC na iluminação pública. Há nas luminárias duas características que favorecem o desenvolvimento independente das fábricas, o alto valor agregado e o potencial de grande vida útil. Ambos os aspectos compõem em concordância com os valores da EC. Essa similaridade facilita e possibilita uma circularização do setor de iluminação pública, a qual seria inicialmente protagonizada pelos municípios e gestores de iluminação pública.

Essa sinergia entre EC e a atual realidade das luminárias LED também é tida como uma das razões para as iniciativas já identificadas na reciclagem e manutenção, todavia isso não se repete no reuso, apesar de ser evidente o seu alto potencial daqui a alguns anos.

A falta de planejamento é notável na situação geral da reciclagem. Apesar da frequência do fluxo, os leilões de recicláveis não garantem reciclagem com qualidade e abrangência dos resíduos eletroeletrônicos. Afinal, após a compra da sucata, as municipalidades não têm conhecimento do destino das luminárias LED e seus componentes eletrônicos, nem possuem interesse nesses processos. A estrutura de leilões é comum nos contextos municipais e, após constatar acúmulo de sucata, é vista como solução fácil e rápida. Esse tratamento implica na desvalorização de recicláveis eletrônicos nas luminárias, pois nos leilões só partes metálicas grandes são recicladas, devido ao alto valor e fácil mercado.

A mudança de resíduos ao implantar de LED na iluminação pública é pouco tratada. Aspectos vantajosos como a ausência de mercúrio metálico e a menor frequência de falhas sempre são citados, enquanto não se menciona as demandas específicas dos resíduos LED e falhas de componentes internos como drive e DPS.

Como última dificuldade para melhorias, a baixa capacidade de gerenciamento é realidade de municípios pequenos. Esse ponto atinge a administração de maneira geral, não apenas nos setores de iluminação pública. A isso, soma-se que a gestão dos ativos de iluminação se tornou municipal recentemente (ANEEL, 2010), de maneira que problemas da transição são perpetuados frente a gerenciamentos limitados. Trabalhar a implantação de LED e gerenciamento de resíduos de iluminação pública necessita de análises próprias e específicas, as quais devem ainda avaliar as alternativas que superem a capacidade de gerenciamento limitada, disputas políticas e ainda preservem as autonomias municipais.

Encerrando, o estudo encontrou limitantes na análise. Os fluxos circulares não foram avaliados de forma quantitativa, o que é difícil no contexto brasileiro analisado, de início de adoção do LED para iluminação pública. Pelo método de estudos de casos, pode-se prospectar possibilidades futuras e pontos atuais, apesar da falta de quantificação. Para verificar viabilidade financeira, contudo, a análise quantitativa dos fluxos tecnológicos é necessária. Na legislação, a falta de clareza para os resíduos de luminárias LED, ou falta de aplicação da base gera controvérsias e questionamentos quanto a falta de clareza quanto a resíduos eletrônicos e não aplicação de instrumentos previstos na PNRS.

Uma dessas possíveis grandes mudanças é a inclusão de luminárias LED em algum acordo setorial de logística reversa, o que é difícil se analisar dada a concorrência entre a antiga indústria de reciclagem de lâmpadas e o recente crescimento das recicladoras industriais de equipamentos eletroeletrônicos.

REFERÊNCIAS

ABDUL HADI, S. et al. Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of streetlight technologies for minor roads in United Arab Emirates. **Energy for Sustainable Development**, v. 17, n. 5, p. 438–450, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2013.05.001>>.

ABNT. **ABNT NBR ISO 14040 : Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - princípio e estrutura**. [s.l.] ABNT, 2009a.

ABNT. **ABNT NBR ISO 14044 : Gestão ambiental - avaliação do ciclo de vida - requisitos e orientações**. [s.l.] ABNT, 2009b.

ABNT. **NBR ISO 14001:2015: Sistemas de gestão ambiental-Requisitos com orientações para uso**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.abnt.org.br>.

ALPTEKIN, C. **The Bright Future Of LED & IoT Lighting**. Disponível em: <<https://www.iotacommunications.com/blog/the-bright-future-of-led-iot-lighting/>>. Acesso em: 3 mar. 2021.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução Normativa Nº 414, de 9 de setembro de 2010: Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada. **Disponível em:** <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414comp.pdf>>., p. 205, 2010.

BANDO, K. et al. **Development of High-bright and Pure-white LED Lamps***Journal of Light and Visual Environment*, 1998. .

BARBOSA, R. **A Gestão e o Uso Eficiente da Energia Elétrica nos Sistemas de Iluminação Pública (Dissertação)**. 2000. São Paulo, 2000.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil***Texto constitucional originalmente publicado no Diário Oficial da União de 5 de outubro de 1988.*, 1988. .

CHO, J. et al. White light-emitting diodes: History, progress, and future. **Laser and Photonics Reviews**, v. 11, n. 2, p. 17 p, 2017.

CODI. **Iluminação Pública, Procedimentos Comerciais, Recomendações – Relatório SCSC.30.02 de 28/11/1984**. [s.l: s.n.].

DALE, A. T. et al. Preliminary Comparative Life-Cycle Impacts of Streetlight Technology. **Journal of Infrastructure Systems**, n. December, p. 193–199, 2011. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000138](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000138)>.

DZOMBAK, R. et al. Assessment of end-of-life design in solid-state lighting. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 8, 2017.

DZOMBAK, R.; ANTONOPOULOS, C.; DILLON, H. E. Balancing technological innovation with waste burden minimization: An examination of the global lighting industry. **Waste Management**, v. 92, p. 68–74, 2019.

ELETROBRAS. **Eletrobras 40 anos – Centro da Memória da Eletricidade no Brasil**. [s.l: s.n.].

ELETROBRAS et al. **RELATÓRIO TÉCNICO - 05. Projeto: descarte de luminárias LED**. [s.l: s.n.].

EMAF. **Towards the Circular Economy** Ellen MacArthur Foundation. [s.l: s.n.].

EMAF. **The Circular Economy in Detail**. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/explore/the-circular-economy-in-detail>>. Acesso em: 15 nov. 2020a.

EMAF. **What is Circular Economy?** Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept>>. Acesso em: 13 nov. 2020b.

EMAF. **Systemic diagram**. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/economia-circular/diagrama-sistemico>>. Acesso em: 12 nov. 2020.

EMAF; MCKINSEY. **Growth within: a circular economy vision for a competitive europe**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>>.

EUROPEAN COMMISSION. **Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy**. Luxembourg: European Union, 2018.

FEEZELL, D.; NAKAMURA, S. Invention, development, and status of the blue light-emitting diode, the enabler of solid-state lighting. **Comptes Rendus Physique**, v. 19, n. 3, p. 113–133, 2018.

FRANZ, M.; WENZL, F. P. Critical review on life cycle inventories and environmental assessments of led-lamps. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 21, p. 2017–2078, 2017.

FRÓES DA SILVA, L. L. **Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais**. 2006. Rio de Janeiro, 2006.

GASSMANN, A.; ET AL. **LED Lamps Recycling Technology for a Circular Economy — LED professional - LED Lighting Technology, Application Magazine**.

Disponível em: <<https://www.led-professional.com/resources-1/articles/led-lamps-recycling-technology-for-a-circular-economy>>. Acesso em: 9 out. 2018.

GRAEDEL, T. E. The Prospects for Urban Mining. **The Bridge**, v. 41, n. 1, p. 43–49, 2011.

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

GUINÉE, J. B. et al. Life cycle assessment: Past, present, and future. **Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 1, p. 90–96, 1 jan. 2011.

HANDFIELD, R. B.; MELNYK, S. A. The scientific theory-building process: A primer using the case of TQM. **Journal of Operations Management**, v. 16, n. 4, 1998.

IBGE. **Estimativas da população brasileira residente para os municípios e para as unidades da federação brasileiros com data de referência em 1º de julho de 2019**. Disponível em: <<https://bit.ly/BRpop2019>>. Acesso em: 2 maio. 2020.

INTERAC LIGHTING. **Interact City powers Jakarta's smart city transformation**. [s.l: s.n.].

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, n. April, p. 221–232, 2017.

LUCAS, G.; KURTZ, G. **Star Wars Episode IV: A New Hope** Star Wars, 1977. .

MURALIKRISHNA, I. v.; MANICKAM, V. Life Cycle Assessment. In: **Environmental Management**. [s.l.] Elsevier, 2017. p. 57–75.

NAKAMURA, S.; MUKAI, T.; SENO, M. emitting diodes Candela-class high-brightness InGaN / AlGaN. **Applied Physics Letters**, v. 64, n. 13, p. 1687–1694, 1994.

OSRAM SYLVANIA. **Product Information and Specification Guide - High Pressure Sodium Lamps**. [s.l: s.n.].

PEÑA-GARCÍA, A.; HURTADO, A.; AGUILAR-LUZÓN, M. C. Impact of public lighting on pedestrians' perception of safety and well-being. **Safety Science**, v. 78, p. 142–148, 2015.

RICHTER, J. L.; TÄHKÄMÖ, L.; DALHAMMAR, C. Trade-offs with longer lifetimes? The case of LED lamps considering product development and energy contexts. **Journal of Cleaner Production**, v. 226, n. 1194, p. 195–209, 2019.

ROBERSON, J. **Why LED Is Lighting the Way for the IoT Revolution**. Disponível em:

<https://www.ledinside.com/news/2017/3/why_led_is_lighting_the_way_for_the_iot_revolution>. Acesso em: 3 mar. 2021.

SHAHZAD K., REHAN M., ISMAIL I.M.I., SAGIR M., TAHIR M.S., BERTOK B., N. A. Comparative life cycle analysis of different lighting devices. **Chemical Engineering Transactions**, v. 45, n. March 2016, p. 631–636, 2015. Disponível em: <<https://hungary.pure.elsevier.com/en/publications/comparative-life-cycle-analysis-of-different-lighting-devices>>.

SIGNIFY HOLDING. **Product description - MH-NaSc**. [s.l: s.n.].

STAHEL, W. R. The circular economy. **Nature**, v. 531, n. 7595, p. 435–438, 2016.

TÄHKÄMÖ, L. et al. Comparison of Life Cycle Assessments of LED Light Sources. **Journal of Light & Visual Environment**, v. 36, n. 2, p. 44–54, 2012. Disponível em: <<http://japanlinkcenter.org/DN/JST.JSTAGE/jlve/36.44?lang=en&from=CrossRef&type=abstract>>.

TÄHKÄMÖ, L. et al. Life cycle assessment of light-emitting diode downlight luminaire - A case study. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 5, p. 1009–1018, 2013.

TÄHKÄMÖ, L.; HALONEN, L. Life cycle assessment of road lighting luminaires - Comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium technologies. **Journal of Cleaner Production**, v. 93, p. 234–242, 2015.

TUKKER, A. Product services for a resource-efficient and circular economy - A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 97, p. 76–91, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.049>>.

TUKKER, A.; JANSEN, B. **Environmental Impacts of Products A Detailed Review of Studies**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.mitpressjournals.org/jie>.

US DEPARTMENT OF ENERGY; NAVIGANT, M.; STOBBER, K. Adoption of Light-Emitting Diodes in Common Lighting Applications. n. July, p. 2014–2015, 2015.

VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. Case research in operations management. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 22, n. 2, p. 195–219, 2002.

WEBSTER, K. **The Circular Economy: A wealth of Flows**. 2nd. ed. Cowes, UK: Ellen MacArthur Foundation Publishing, 2016.

WE-EF LIGHTING. **VFL530-SE LED Street and area lighting VFL530-SE LED Street and area lighting**. [s.l: s.n.].

WE-EF LIGHTING. VFL540-SE LED Street and area lighting VFL540-SE LED Street and area lighting. [s.l: s.n.].

YIN, R. K. Estudo de caso : planejamento e métodos [recurso eletrônico]. 5 ed. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ANEXO A – Formulário de entrevista aplicado nas visitas

Município:	Pop.:
Responsável:	Cargo:
Telefone:	E-mail:
Parte 1. Cadastro	
1. O município possui o cadastro do parque de iluminação pública?	
Confere: Forma de cadastro: Informações abrangidas no cadastro: Fotografia exemplificativa do cadastro: Observações:	
2. O município realiza a atualização regular do cadastro do parque?	
Confere: Data da última atualização: Observações:	
3. Quantos pontos de iluminação pública o município possui atualmente?	
Confere: Observações:	
4. Quantas luminárias LED o município possui atualmente?	
Confere: Previsão de expansão: Observações:	
Parte 2: Manutenção	
5. Quem realiza a manutenção do parque de iluminação pública? Empresa terceirizada (contratada pelo município)?	
Confere: Nome da empresa: Forma de contratação: Responsabilidades: Observações:	
5.a. Existem procedimentos para a manutenção? O que os procedimentos abordam?	
Resposta: Verificação procedimentos:	
5.b. Visita ao local de manutenção e conversa com equipe de manutenção	
Observações:	
Parte 3: Descarte dos equipamentos	
6. Segundo o MMA, o seu município possui um PMGIRS, você já teve acesso ao PMGIRS?	
Confere: Observações:	
7. O PMGIRS de seu município contempla os equipamentos do sistema de iluminação pública?	
Confere – Verificação Genos PMGRIS: Observações:	
8. Em caso afirmativo, o que está contemplado?	
Confere – Verificação Genos PMGRIS: Observações:	
9. O município possui registro das operações de descarte dos resíduos do sistema de I.P.?	
Confere:	

Fotografia exemplificativa do registro: Observações:			
10. A cidade conta com um local de armazenamento temporário dos resíduos do sistema de iluminação pública?			
Confere: Fotografia exemplificativa do local: Observações:			
11. Em relação ao descarte de equipamentos do sistema de iluminação pública do município, vocês seguem algum manual, procedimento ou legislação específica?			
Confere: Conferência do documento: Observações:			
12. O que está contemplado no manual, procedimento ou legislação seguido?			
Confere: Observações:			
13. Quem realiza a destinação final dos equipamentos de iluminação pública? Empresa terceirizada (contratada pelo município), responsável pela coleta de todos os resíduos do município;			
Confere: Nome da empresa: Forma de contratação: Responsabilidades: Conversa com contratada: Observações:			
14. Quantidades de descarte ao ano e fim de vida dos equipamentos (comparação de dados fornecidos por telefone e <i>in loco</i>)			Confere e obs:
Luminárias convencionais			
Lâmpadas convencionais			
Luminárias LED			
Reatores			
Ignitores			
Relés			
Braços			
15. Você tem dúvidas quanto à solução para a destinação ambientalmente correta dos equipamentos do sistema de iluminação pública? Se sim, quais?			
Confere: Observações:			
16. Observações gerais:			