



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Jhony Fernandes Ferreira

**IDENTIFICAÇÃO DE CATEGORIAS DE IMPACTO UTILIZADAS NA
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA COMO CRITÉRIOS PARA UMA AVALIAÇÃO
MAIS SIMPLIFICADA PARA O DESEMPENHO DO GERENCIAMENTO DE
RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS**

Rio de Janeiro
2020



UFRJ

Jhony Fernandes Ferreira

**IDENTIFICAÇÃO DE CATEGORIAS DE IMPACTO UTILIZADAS NA
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA COMO CRITÉRIOS PARA UMA AVALIAÇÃO
MAIS SIMPLIFICADA PARA O DESEMPENHO DO GERENCIAMENTO DE
RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadoras: Prof.^a Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco
Prof.^a Ana Lúcia Nazareth da Silva

Rio de Janeiro
2020

F 474i Ferreira, Jhony Fernandes
IDENTIFICAÇÃO DE CATEGORIAS DE IMPACTO UTILIZADAS
NA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA COMO CRITÉRIOS PARA UMA
AVALIAÇÃO MAIS SIMPLIFICADA PARA O DESEMPENHO DO
GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS
ELETROELETRÔNICOS / Jhony Fernandes Ferreira. – Rio de Janeiro
2020. 87 f.
Orientadora: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco
Coorientadora: Ana Lúcia Nazareth da Silva
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, Escola Politécnica, Escola de Química, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Ambiental, 2020.
1. Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos. 2. Avaliação e
gerenciamento de WEEE. 3. Categorias de Impacto. I Pacheco, Elen
Beatriz Acordi Vasques, orient. II. Silva, Ana Lúcia Nazareth da,
coorient. III Título



UFRJ

**IDENTIFICAÇÃO DE CATEGORIAS DE IMPACTO UTILIZADAS NA
AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA COMO CRITÉRIOS PARA UMA AVALIAÇÃO
MAIS SIMPLIFICADA PARA O DESEMPENHO DO GERENCIAMENTO DE
RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS**

Jhony Fernandes Ferreira

Orientadoras: Prof.^a Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco
Prof.^a Ana Lúcia Nazareth da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela banca:

Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco PEA/UFRJ (Orientadora)

Ana Lúcia Nazareth da Silva PEA/UFRJ (Orientadora)

Thiago Santiago Gomes/UFRJ

Cristina Aparecida Gomes Nassar/UFRJ.

Teresa Maria Dias Fernandes/UFRJ.

Rio de Janeiro
2020

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos esforços da minha família.

AGRADECIMENTOS

À Deus

RESUMO

FERREIRA, Jhony Fernandes. Identificação de categorias de impacto utilizadas na avaliação do ciclo de vida como critérios para uma avaliação mais simplificada para o desempenho do gerenciamento de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Rio de Janeiro, 2020. Dissertação (mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (WEEE – *Waste Electrical and Electronic Equipment*) são uma preocupação mundial devido à sua grande geração. Há a presença de diversos componentes e elementos químicos que devem ser tratados, assim, se busca verificar quais as formas mais adequadas para a avaliação do gerenciamento desse tipo de resíduo. Dentro desse contexto, o presente trabalho propôs a identificação das categorias de impacto no nível *midpoint* (aquele que a caracterização ocorre ao longo do mecanismo ambiental, antes de alcançar o ponto final da categoria), utilizadas na Avaliação do Ciclo de Vida (LCA – *life cycle assessment*). Para isso, através de pesquisa bibliográfica, elencou-se trabalhos científicos que tiveram como foco principal estudos envolvendo LCA de WEEE e verificou-se quais eram as categorias de impacto mais estudadas e mais significativas (aquelas em que os próprios trabalhos indicavam como relevantes para o aspecto ora estudado), tanto no que se refere aos impactos ambientais quanto aos benefícios com relação às destinações que foram estudadas. Com isso, para as destinações reciclagem, recuperação de metais, reuso, incineração, aterro sanitário, recuperação e conserto de equipamentos eletroeletrônicos, as categorias de impacto aquecimento global, acidificação, toxicidade humana e eutrofização foram mais significantes. Por fim, conclui-se que a avaliação do gerenciamento de WEEE, que inclui a sua destinação final, poderá ser realizada com base nessas quatro categorias de impacto. Palavras-chave: resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, categorias de impacto, avaliação e gerenciamento de WEEE.

ABSTRACT

FERREIRA, Jhony Fernandes. Identification of impact categories used at life cycle assessment as criteria for a more simplified assessment for the performance of waste management of electronic equipment. Rio de Janeiro, 2020. Dissertation (master's degree) - Environmental Engineering Program, Polytechnic School and School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Waste electrical and electronic equipment (WEEE) is a worldwide concern due to its large generation. There is the presence of several chemical components and elements that must be treated, thus, it seeks to verify which are the most appropriate ways to assess the management of this kind of waste. Within this context, the present work proposed the identification of impact categories at the midpoint level (the one in which the characterization occurs along the environmental mechanism, before reaching the end point of the category), used in the Life Cycle Assessment (LCA). For this, through bibliographic research, scientific works were listed that had as their main focus studies involving WEEE LCA and it was verified which were the most studied and most significant impact categories (those in which the works themselves indicated as relevant to the aspect studied), both in terms of environmental impacts and benefits in relation to the destinations that were studied. Thus, for recycling, metal recovery, reuse, incineration, sanitary landfill, recovery and repair of electrical and electronic equipment, the impact categories global warming, acidification, human toxicity and eutrophication were more significant. Finally, it is concluded that the assessment of WEEE management, which includes its final destination, can be carried out based on these four impact categories.

Keywords: waste electrical and electronic equipment, impact categories, WEEE assessment and management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de indicadores para gestão dos WEEE.....	34
Figura 2 – Fases da metodologia	37
Figura 3 – Número de categorias de impacto mais estudadas dentre os 24 artigos avaliados.	63
Figura 4 – Número de categorias de impacto mais significativas dentre os 24 artigos avaliados.	65
Figura 5 – Número de artigos de LCA sobre WEEE por região dentre os 24 artigos selecionados.....	66
Figura 6- Número de artigos por metodologias de LCIA estudadas nos 24 artigos selecionados.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Substâncias tóxicas presentes em WEEE e seus impactos na saúde	29
Tabela 2 – Artigos selecionados que abordam estudos de LCA da destinação de WEEE.....	44
Tabela 3 – Breve descrição das categorias de impacto estudadas pelos autores selecionados	50
Tabela 4 – Destinações dos WEEE estudadas nos 24 artigos selecionados.....	67

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABS – Copolímero de Acrilonitrila-butadieno-estireno
As – Arsênio
Ba – Bário
Be – Berílio
BFR – *Brominated Flame Retardants* (Retardantes de chama bromados)
Cd – Cádmio
Cr VI – Cromo hexavalente
CRT – *Cathod Ray Tube* (Tubos de raios catódicos)
Cu – Cobre
DNA – Ácido desoxirribonucleico
EEE – Equipamento Eletroeletrônico
EoL – *End of Life* (fim de vida)
EPR – *Extended Producer Responsibilities* (Responsabilidade Estendida ao Produtor)
GPS – *Global Position System* (Sistema de posicionamento global)
Hg – Mercúrio
HIPS – Poliestireno de alto impacto
ILCD - *International Reference life cycle data system* (Sistema Internacional de Referência de Dados de Ciclo de Vida de Produtos e Processos)
LCA – *Life Cycle Assessment* (Avaliação do Ciclo de Vida)
LCIA – *Life Cycle Impact Assessment* (Avaliação de impacto do ciclo de vida)
LCD – *Liquid Cristal display* (Tela de Cristal Líquido)
LED – *Light Emitting Diode* (Diodo emissor de luz)
MCA – *Multi criteria Analysis* (Análise Multicritério)
MFA – *Material Flow Analysis* (Análise do fluxo de materiais)
Ni – Níquel
OCDE – Organização para Cooperação e o Desenvolvimento Econômico
PAH – *Polycyclic aromatic hydrocarbons* (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos)
Pb – Chumbo
PBB - *Polybrominated biphenyls* (Bifenilas Policloradas)
PBDE – *Polybrominated diphenyl ethers* (Éteres Fenílicos Polibromados)
PCB – *Polychlorinated biphenyls* (Bifenilas Policloradas)
PCDD/F – *Polychlorinated dibenzo-p-dioxins* (dibenzo-p-dioxinas policloradas/ Furanos)
PIB – Produto Interno Bruto
POP – *Persistent Organic Pollutants* (orgânicos poluentes persistentes)
Pt – Platina
PVC – Poli (cloreto de vinila)
Sb – Antimônio
Se – Selênio
SFA – *Substance Flow Analysis* (Análise do Fluxo de Substâncias)
TBBPA – *Tetrabromobisphenol A* (Tetrabromobisfenol A)
WEEE – *Waste electric and electronic equipment* (Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos)
WtE – *Waste to Energy* (Reciclagem Energética)
Zn – Zinco

SUMÁRIO

1	Introdução.....	13
2	Objetivos	15
2.1	Objetivo Geral.....	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	Revisão Bibliográfica	16
3.1	Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos.....	16
3.2	Gerenciamento de WEEE	17
3.2.1	Responsabilidade estendida ao produtor	18
3.2.2	Avaliação do Ciclo de Vida para WEEE.....	19
3.2.3	Análise do fluxo de materiais	26
3.2.4	Análise multicritério	27
3.3	Reciclagem de WEEE.....	27
3.3.1	Impactos dos WEEE durante o processo de tratamento	29
3.4	Avaliação do desempenho ambiental para o gerenciamento de WEEE	31
4	Metodologia.....	36
4.1	Pesquisa Bibliográfica	37
4.2	Pré-seleção dos artigos.....	40
4.3	Identificação das categorias mais significativas	41
5	Resultados e Discussão	42
5.1	Discussão dos artigos selecionados	51
5.2	Categorias de impactos mais relevantes a partir dos estudos selecionados.....	62
5.3	Metodologias de avaliação de impacto do ciclo de vida a partir dos estudos selecionados	70
6	Conclusões.....	72
7	Sugestões	73
8	Referências	75

1 Introdução

Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (WEEE – *Waste Electrical and Electronic Equipment*) são os que mais têm crescido no mundo em volume (KUMAR; HOLUSZKO; ESPINOSA, 2017). Tais resíduos têm chamado a atenção devido à possível presença de substâncias tóxicas que podem contaminar o meio ambiente e a saúde humana, caso não sejam corretamente gerenciados (KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013).

O crescimento econômico, o menor período de vida de utilização, o avanço tecnológico e a disponibilidade de produtos mais acessíveis são os principais fatores que levam ao crescimento dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (ISMAIL; HANAFIAH, 2017, 2019; KUMAR; HOLUSZKO; ESPINOSA, 2017). Como podem conter substâncias tóxicas em sua composição, se esses materiais forem reciclados de maneira informal podem causar impactos ambientais e trazer problemas para a saúde humana. Entretanto, por conter metais preciosos, podem agregar benefícios econômicos com sua reciclagem (KUMAR; HOLUSZKO; ESPINOSA, 2017). Widmer et al. (2005) afirmaram que mais de 60% em massa dos materiais presentes nos WEEE são valiosos, porém há mais de 1000 variedades de substâncias tóxicas e perigosas.

Kumar, Holuszko e Espinosa (2017) mencionam que há um aumento no fluxo de WEEE e que os maiores constituintes para esse crescimento são pequenos e grandes aparelhos, telas e monitores e equipamentos de troca de temperatura. Também há uma expectativa de aumento de resíduos de painéis fotovoltaicos e decréscimo de tubos de raios catódicos (CRT – *Cathod ray tube*).

Além disso, Kumar, Holuszko e Espinosa (2017) revelaram que há correlação linear entre o Produto Interno Bruto (PIB) e a geração de resíduos eletrônicos. Os autores observaram que quanto maior o poder de compra por habitante, maior é a produção de WEEE.

Uma pequena parcela dos WEEE é reciclada ou retorna ao ciclo produtivo, considerando o reuso ou recondicionamento. O conhecimento de como o gerenciamento de WEEE é conduzido é extremamente importante para a avaliação dos pontos positivos e negativos do processo e, assim, buscar melhorias.

Fazem parte do gerenciamento a coleta, o tratamento e o reprocessamento. Kumar, Holuszko e Espinosa (2017) concluem que a reciclagem informal tem baixa taxa de recuperação e que o fomento à reciclagem formal pode melhorar o gerenciamento de WEEE. As seguintes abordagens são propostas pelos autores para otimizar a reciclagem, tais como: os países deveriam desenvolver novas tecnologias para reciclagem; as nações em desenvolvimento deveriam adaptar suas legislações, melhorar o sistema de coleta com maximização do potencial

de reciclagem; uso de plantas móveis e sistemas de reciclagem portáteis para locais pequenos; e, em locais de pequena geração, o estabelecimento de pontos de transbordo para o melhor gerenciamento. Dentre as ferramentas disponíveis para a avaliação do gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos, a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA – *life cycle assessment*) é uma das poucas alternativas que considera todo o ciclo do material. Nesse sentido, afirma-se que LCA é uma ferramenta aplicável para o gerenciamento de WEEE (AWASTHI; LI, 2017).

A avaliação do ciclo de vida e o pensamento de ciclo de vida ocupam posição de destaque porque provêm informações relevantes sobre aspectos ambientais quando se trata de gerenciamento de resíduos sólidos. Além disso, a metodologia LCA é a ferramenta adequada para a identificação de categorias de impacto dos processos de recuperação e tratamento de WEEE, quando comparada a outros métodos, tais como análise de fluxo de materiais, análise multicritério, e responsabilidade estendida ao produtor (FINNVEDEN *et al.*, 2007).

Verifica-se, na avaliação do gerenciamento de WEEE, a necessidade de avaliar seu desempenho ambiental. Assim, a proposta desse trabalho foi buscar indicadores mais significativos de desempenho ambiental (categorias de impacto que foram destacadas pelos autores dos trabalhos avaliados/selecionados no presente texto), a partir de estudos de LCA sobre destinação, análise ou gerenciamento de WEEE, que podem ser evidenciados através de suas categorias de impacto ambiental. De posse das categorias de impacto mais significativas para o gerenciamento de impactos, sugere-se simplificar a avaliação de desempenho no gerenciamento de WEEE com número reduzido de indicadores (categorias de impactos), aqueles mais significativos.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho foi identificar e selecionar as principais categorias de impacto utilizadas na Avaliação do Ciclo de Vida de WEEE para serem utilizadas na análise de desempenho ambiental de processos de gerenciamento desses resíduos.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- ✓ Identificar as categorias de impactos ambientais mais significativas em estudos de LCA, que envolvam a destinação, análise ou o gerenciamento dos WEEE.
- ✓ Sugerir o uso dessas categorias como critérios para avaliação do desempenho no processo de gerenciamento de WEEE.
- ✓ Buscar a simplificação da avaliação de desempenho ambiental com o uso de um número reduzido de indicadores (categorias de impactos), aqueles mais significativos, para o processo.
- ✓ Verificar as quais foram as metodologias de avaliação do ciclo de vida dos artigos selecionados;
- ✓ Verificar as categorias de impacto mais utilizadas por continente para o gerenciamento de WEEE (América do Norte, América do Sul/Latina, Europa; Oceania e África).
- ✓ Identificar, nos estudos que envolveram LCA de WEEE, quais foram as destinações estudadas.

3 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica abordará a definição e classificação de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (WEEE); informará como é realizado o seu gerenciamento (mostrando os aspectos de Responsabilidade Estendida ao Produtor, Avaliação do Ciclo de Vida, Análise de Fluxo de Materiais e Análise Multicritério) mostrando os estudos que envolvem LCA e WEEE; reciclagem de WEEE; assim como abordará sobre os critérios para avaliação do desempenho ambiental para o gerenciamento dos WEEE.

3.1 Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos

Segundo Kiddee, Naidu e Wong (2013), o avanço tecnológico com o desenvolvimento de aparelhos elétricos com funções *smart*, novas tecnologias e novos designs são atrativos aos consumidores, o que vem repercutindo na geração de WEEE.

A Diretiva 2012/19/EU do Parlamento e do Conselho Europeu (UNIÃO EUROPEIA, 2003), de 04 de julho de 2012, que trata de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (WEEE), em seu artigo 3º, define Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE) e Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (WEEE), alíneas (a) e (e), respectivamente:

(a) Equipamentos Elétrico e Eletrônicos ou EEE, os equipamentos dependentes de corrente elétrica ou de campos eletromagnéticos para funcionarem corretamente, bem como os equipamentos para geração, transferência e medição dessas correntes e campos, e concebidos para utilização com uma tensão nominal não superior a 1.000 V para corrente alternada e 1.500 V para corrente contínua.

[...]

(e) Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos ou WEEE, equipamentos elétricos e eletrônicos que constituem resíduos na acepção do artigo 3º, ponto 1, da Diretiva 2008/98/CE, incluindo todos os seus componentes, subconjuntos e materiais consumíveis que fazem parte integrante do produto no momento em que é descartado. (UNIÃO EUROPEIA, 2008).

A Diretiva da União Europeia 2008/98/CE (UNIÃO EUROPEIA, 2008), de 19 de novembro de 2008, do Parlamento Europeu e Conselho, traz a definição de resíduos no artigo 3º, ponto 1: “Resíduos, quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou obrigação de se desfazer.”

A União Europeia, por meio da Diretiva 2012/19/EU (UNIÃO EUROPEIA, 2012) classificou os EEE, em seu anexo III, em seis categorias:

1. Equipamentos de troca de temperatura: refrigeradores, freezers, ares-condicionados e aquecedores;
2. Telas e monitores: televisores, monitores, *laptops*, *notebooks* e *tablets*;
3. Lâmpadas: fluorescentes, LED (*Light Emitting Diode*, Diodo emissor de luz) e de descarga de alta intensidade;

4. Equipamentos grandes: Máquinas de lavar roupa, máquinas de costura, fogões elétricos, impressoras grandes, copiadoras de grande porte e painéis fotovoltaicos;
5. Equipamentos pequenos: aspiradores de pó, torradeiras, micro-ondas, ventiladores, balanças, calculadoras, rádios, chuveiros elétricos, cafeteiras, câmeras, brinquedos, brinquedos eletrônicos, equipamentos médicos, pequenos equipamentos de monitoramento e controle; e
6. Equipamentos pequenos de telecomunicação: telefones celulares, GPS (*Global Position System*, sistema de posicionamento global), calculadoras de bolso, roteadores, computadores pessoais, impressoras e telefones de mesa.

3.2 Gerenciamento de WEEE

Uma vez definido o que são os WEEE, assim como sua forma de classificação, é importante analisar como esses resíduos são gerenciados, assim como as alternativas para a sua destinação e quais são os impactos durante o tratamento.

Liu, Tanaka e Matsui (2007) avaliaram o gerenciamento de WEEE em Beijing, China. Relataram sobre a previsão de geração desses resíduos, planejamento e otimização das estruturas de coleta e transporte, assim como realizaram uma análise econômica dos processos de reciclagem. Os autores concluíram que a ideia chave para aumentar a coleta estaria na diminuição do valor que os proprietários de WEEE dão aos seus equipamentos (diminuindo ao valor de 40% do preço corrente) – afirmam que os proprietários mantêm o valor de compra em mente mesmo quando os equipamentos estão usados. Evidenciando que a coleta é uma etapa muito importante no processo de gerenciamento e, dessa forma, o estabelecimento de um sistema formal de coleta seria essencial.

Há várias ferramentas ambientais para avaliação do gerenciamento do fim de vida de WEEE: responsabilidade estendida ao produtor (EPR, *Extended Producer Responsibilities - EPR*), que se baseia no princípio do poluidor pagador, e, além dela, verifica-se a avaliação do ciclo de vida (*LCA, Life Cycle Assessment*), a análise do fluxo de materiais (*MFA, Material Flow Analysis*), a análise do fluxo de substância (*SFA, Substance Flow Analysis*) e a análise multicritério (*MCA, Multi Criteria Analysis*) (ISMAIL; HANAFIAH, 2017; KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013).

As alternativas para o correto gerenciamento de WEEE são o desenvolvimento de aparelhos, coleta apropriada, recuperação e reciclagem por métodos seguros e de menor impacto ambiental, social e econômico, disposição por técnicas adequadas, evitar a

transferência de WEEE para países em desenvolvimento e aumentar a preocupação dos usuários e fabricantes acerca dos impactos da poluição dos WEEE (KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013).

3.2.1 Responsabilidade estendida ao produtor

A responsabilidade estendida ao produtor (EPR) é uma abordagem de política ambiental que atribui a responsabilidade aos fabricantes em receber de volta produtos usados e tem como princípio poluidor pagador. A principal abordagem é o retorno de equipamentos à manufatura. Entretanto, a maior parte desses tipos de programas encontra-se em nações avançadas, tais como Suíça, União Europeia, Japão e estados dos Estados Unidos. A EPR é baseada no guia para governantes da Organização para Cooperação e o Desenvolvimento Econômico (OCDE) (KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013; OCDE, 2001).

A Diretiva 2002/96/CE do Parlamento Europeu e do Conselho (UNIÃO EUROPEIA, 2003) da União Europeia para WEEE - desenvolveu-se baseada em EPR, incluindo a meta de reutilização e reciclagem de componentes de WEEE mínima de 50% em massa ao ano por aparelho e valorização de 75% em massa ao ano por aparelho até o fim de 2008 (MAYERS; FRANCE; COWELL, 2005; NNOROM; OSIBANJO, 2008; ROLLER; FÜHR, 2008; WIDMER *et al.*, 2005). Posteriormente, a Diretiva 2012/19/EU, do mesmo parlamento (UNIÃO EUROPEIA, 2012), estabeleceu, a partir de 2016, uma taxa de coleta mínima em 45% em massa ao ano, com base na massa total de WEEE coletados. Tal percentagem, de acordo com a diretiva, passou a ser de 65% em 2019. E a parcela a ser reciclada deveria partir de um mínimo, em 2015, de 50% em massa, e 80% para reutilização e/ou reciclados até 2018.

A Suíça tem uma regulação quanto ao gerenciamento de WEEE com o uso de organizações não governamentais com alto nível de enquadramento às leis, o que inclui os interessados, distribuidores, usuários e recicladores (KHETRIWAL; KRAEUCHI; WIDMER, 2009; NNOROM; OSIBANJO, 2008; WIDMER *et al.*, 2005). No Japão, há duas leis que regem a matéria: uma para reciclagem de aparelhos domésticos específicos (TVs, refrigeradores, ar-condicionados e máquinas de lavar) e outra lei de reciclagem de aparelhos elétricos domésticos (CHUNG; MURAKAMI-SUZUKI, 2008; LEASE, 2002; NNOROM; OSIBANJO, 2008; TOJO, 2001). Ainda no Japão, há uma terceira lei que promove a efetiva utilização de recursos que trata de computadores e baterias que passou a cobrar, a partir de 2003, uma taxa de reciclagem avançada embutida no custo dos produtos (CHUNG; MURAKAMI-SUZUKI, 2008; NNOROM; OSIBANJO, 2008). As duas primeiras leis são usadas de forma voluntária e a terceira de forma obrigatória para os interessados como fabricantes e importadores (CHUNG; MURAKAMI-SUZUKI, 2008; OGUSHI; KANDLIKAR, 2007). Em trabalho conjunto com o

governo, fabricantes desenvolveram soldas sem chumbo, placas de circuito impresso sem bromo e aparelhos projetados com desmontagem facilitada e fácil reuso (LEASE, 2002; NNOROM; OSIBANJO, 2008; TOJO, 2001).

Nos Estados Unidos, a EPR ocorre de forma diferente dos países europeus, porque os estados não são obrigados a seguir a política do governo federal. Então esse país lança mão da responsabilidade compartilhada (entre interessados, geradores e municípios), uma vez que os fabricantes resistiram fortemente à essa política (SACHS, 2006)

No Canadá não tem um sistema nacional de EPR para o gerenciamento de WEEE, entretanto a Federação de Municípios Canadense fez a pesquisa nacional para a sua disposição e concluiu-se que os fabricantes seriam responsáveis pelos custos de coleta, recuperação, reciclagem e disposição (KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013).

Países não pertencentes à Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) também podem ter a política de EPR como norteadora para os WEEE. Na Índia, por exemplo, há possibilidade de que o gerenciamento seja movido por EPR (MANOMAIVIBOOL, 2009).

No Brasil, através da Lei n.º 12.305/10 (BRASIL, 2010) foi requerido a instauração e implementação de sistemas de logística reversa para pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista e de produtos eletroeletrônicos e seus componentes, baseando-se no princípio da EPR. Em 31 de outubro de 2019, foi publicado o acordo setorial para a implantação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes (BRASIL.; MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2019). Esse documento coloca em prática a exigência de logística reversa da alínea VI do artigo 33 da Lei n.º 12.305 (BRASIL, 2010) incluindo a meta de coleta e destinação de 17% dos WEEE, em massa, para o ano de 2025, elencando atribuições aos fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes e consumidores no ciclo de vida dos EEE. Esse acordo, dentre outros, dá a preferência à reciclagem como destinação, corroborando com o que já é aplicado na Europa.

3.2.2 Avaliação do Ciclo de Vida para WEEE

Segundo a ABNT NBR ISO 14040 – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de Vida – Princípios e Estrutura (ABNT, 2014), a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA – *life cycle assessment*) é a compilação e avaliação de entradas, saídas e impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ou serviço ao longo do seu ciclo de vida. Essa mesma norma institui a seguinte estrutura metodológica para estudos de LCA em quatro fases: 1. Definição de objetivo

e escopo (que abrange: definição da unidade funcional, fronteiras do sistema, requisitos da qualidade dos dados, comparações entre sistemas e análise crítica), 2. Análise do inventário do ciclo de vida (que envolve descrição geral e coleta de dados), 3. Avaliação do impacto do ciclo de vida, e 4. Interpretação do ciclo de vida, relatório, análise crítica (que envolve: descrição geral das análises críticas, necessidades da análise crítica, processos da análise crítica, análise crítica por especialista interno, análise crítica por especialista externo, análise crítica por partes interessadas).

De acordo com Finnveden et al. (2007), a avaliação do ciclo de vida e o pensamento de ciclo de vida ocupam posição de destaque porque provêm informações relevantes de impactos ambientais quando se trata de gerenciamento de resíduos sólidos. Além disso, é a ferramenta mais adequada para avaliação de impacto dos processos de recuperação e tratamento de WEEE, quando comparada a outros métodos, tais como análise de fluxo de materiais, análise multicritério e responsabilidade estendida ao produtor, por exemplo.

Na mesma linha, Kiddee, Naidu e Wong (2013) mostram que a LCA é uma ferramenta utilizada para o gerenciamento de resíduos eletrônicos e para desenvolver equipamentos, minimizando os problemas dos WEEE. Assim, pode-se utilizá-la para o desenvolvimento de novos produtos (impressoras, computadores pessoais, aparelhos aquecedores e ar-condicionados, máquinas de lavar e brinquedos), assim como definir impactos ambientais importantes e relevantes (carcinogênicos, mudanças climáticas, depleção da camada de ozônio, ecotoxicidade, acidificação, eutrofização e uso da terra, por exemplo) e, ainda, ser usada para a análise do impacto do fim de vida de alternativas de tratamento de WEEE. Nos estudos de fim de vida, incluem a reciclagem, e são utilizadas na comparação de diferentes métodos de destinação, tanto na questão ambiental, social quanto econômica.

Os estudos de LCA para o gerenciamento de WEEE podem variar de acordo com o conteúdo e com o escopo e ainda não proveem uma comparação baseada na hierarquia de gerenciamento de resíduos (4Rs - redução, reutilizar, reciclar, recuperação). No mesmo sentido, salienta-se que há falta de uma avaliação holística dos WEEE (que iria desde a prevenção à disposição) (ISMAIL; HANAFIAH, 2019).

Para analisar o conteúdo de estudos de LCA de gerenciamento de WEEE, Ismail e Hanafiah (2019) salientam que esse tema pode ser dividido em: (i) artigos que tratam de estratégias de destinação (reciclagem, recuperação, aterro, reuso, recuperação, taxas de reciclagem ou de coleta; (ii) trabalhos que fizeram comparação de sistema de reciclagem de todo o produto (o que os autores chamam de sistema completo) ou estudos que usa somente do componente (abordagem que os autores colocam como sistema parcial) com outros sistemas,

(recuperação de energia e com ou sem legislação, por exemplo) e (iii) publicações sobre o potencial de periculosidade do gerenciamento da reciclagem dos WEEE, ou seja, – trabalhos que usaram categorias de impacto da LCA para indicar essa periculosidade.

Quanto à reciclagem, recuperação e disposição, para comparação de formas de destinação tem-se que Niu et al. (2012), na China, avaliaram CRT (tubos de raios catódicos) as seguintes destinações: desmontagem manual, reciclagem mecânica e incineração. Boyden, Soo e Doolan (2016), na Austrália, compararam as tecnologias de reciclagem pirometalúrgica, hidrometalúrgica e aterro para baterias de íons lítio. Rocchetti e Beolchini (2014), na Itália, verificaram as possibilidades de destinação de monitores CRT para aterro de resíduos perigosos, reciclagem para produção novas telas CRT e reciclagem para produção de telas planas. Amato, Rocchetti e Beolchini (2017), também na Itália, estudaram estratégias de destinação de monitores LCD, como aterro, incineração, reciclagem e recuperação de metal índio. Xu et al. (2016), nos Estados Unidos, analisaram alternativas de destinação para o tubo de vidro do CRT, como aterro de resíduos perigosos, aterro de resíduos municipal, reciclagem para fechamento de ciclo, tecnologias de reciclagem piro e hidrometalúrgica. Biswas et al. (2013), no Reino Unido, compararam a produção de um novo compressor com sua reparação. Zink et al. (2014) verificaram as seguintes estratégias para telefones celulares: condicionamento tradicional, reuso do celular como paquímetro (aparelho que mede o tempo de permanência de veículos nas vagas de estacionamento em vias ou em estacionamentos), e o reuso do celular através de uso de bateria solar. Na China, observaram-se três estudos: um comparou o reuso e recuperação de materiais de celulares (Lu, Bin et al., 2014); outro estudo verificou o reuso integral de refrigeradores e fontes de computadores (LU, BIN *et al.*, 2017), e Yu et al. (2014) analisaram a partir de LCA, os ciclos de montagem e desmontagem de baterias. Gonda e Degrez (2018), na Bélgica, realizaram a comparação ambiental de duas cadeias de tratamento de fim de vida de computadores.

No que se refere a cenários de comparação, Moraes, Rocha e Ewald (2014) compararam a reciclagem de celulares no Brasil, propondo que ela seja realizada integralmente no Brasil. Bian et al. (2016) compararam cenários de reciclagem de celulares: em um primeiro cenário em países em desenvolvimento (com desmonte manual, reciclagem da carcaça e da placa de circuito impresso, com envio da bateria e da tela de LCD para o aterro); e outro cenário, com reciclagem em países desenvolvidos (desmonte mecânico e reciclagem da carcaça, LCD, placa de circuito impresso e bateria) e combinação dos dois cenários. Arduin et al. (2017), na França, verificaram três cenários para reciclagem de *tablets*: um otimista com a melhor tecnologia

disponível, outro conservador, utilizando um canal de referência de reciclagem e um último tomado como pessimista, o qual considera as piores situações de reciclagem.

A LCA também pode ser utilizada para comparar taxas de reciclagem e taxas de coleta. Apisitpuvakul *et al.* (2008) estudaram as categorias de impacto ambiental, tais como: carcinogênicos, orgânicos respiratórios, inorgânicos respiratórios, mudanças climáticas, radiação, depleção da camada de ozônio, ecotoxicidade, acidificação, eutrofização, uso da terra e minerais, para diferentes taxas de reciclagem de lâmpadas fluorescentes e concluíram que os impactos negativos reduzem com o aumento das taxas de reciclagem na Tailândia. Mayers, France e Cowell (2005) compararam taxas de recuperação de (99, 68, 61 e 0%) de impressoras, no Reino Unido, com quatro alternativas, e concluíram que a destinação em aterro, sem a recuperação de material, não é o pior caso quando comparado com alternativas de reciclagem e recuperação, ou seja, não havia indícios de que nenhuma alternativa se sobressaía às outras. Lu, Li-Teh *et al.* (2006) analisaram taxas de reciclagem com diferentes proporções entre reuso, incineração e aterro em Taiwan, considerando vendas no mercado de equipamentos usados sob os aspectos ambientais e econômicos. E, contrariando os resultados da maioria dos estudos, os autores concluíram que a reciclagem de WEEE não é uma boa opção devido à presença de materiais perigosos. Alcántara-Concepción, Gavilán-García e Gavilán-García (2016) verificaram várias taxas (0, 25, 35 e 100%) de reciclagem para computadores no México. Unger *et al.* (2017), na Áustria, compararam a taxa de reciclagem de WEEE com o mínimo requerido pela União Europeia. Horta Arduin *et al.* (2016), na França, compararam taxas de reciclagem de carregadores de celular.

De forma geral, Compagno *et al.* (2014) propuseram tratamento estendido (com recuperação de chumbo) para a reciclagem de CRT. Song, Xiaolong *et al.* (2018), de forma semelhante na China, compararam os impactos da corrente prática de reciclagem de CRT com o prescrito da diretriz chinesa para WEEE, sugerindo tratamento adicional para recuperação de chumbo. Johansson e Björklund (2010) sugeriram etapas em pré-tratamento para recuperação de cobre em reciclagem de lava-louças. Dodbiba *et al.* (2012) verificam os impactos de dois métodos de liberação – moagem convencional e desintegração elétrica – no sistema de pré-tratamento para aumentar as taxas de recuperação de metal índio para telas de LCD no Japão. Villares *et al.* (2016) compararam os impactos ambientais de um novo processo de biolixiviação com pirometalurgia para recuperação de cobre na placa de circuito impresso nos Países Baixos. Rubin *et al.* (2014) compararam dois métodos para recuperação de cobre da placa de circuito impresso no Brasil, um utilizando ácido sulfúrico e outro com água régia.

A ferramenta LCA também pode ser utilizada para comparar os impactos da produção de esmalte cerâmico do vidro de CRT com a produção de esmalte com materiais primários (ANDREOLA *et al.*, 2007). Dodbiba *et al.* (2008) compararam duas estratégias para reciclagem de plásticos de TV, uma com reciclagem térmica para recuperação de energia e outra reciclagem mecânica para recuperação de materiais. Abeliotis *et al.* (2017), na Grécia, verificaram a produção de placa de circuito impresso com materiais primários com materiais obtidos da reciclagem. Solé *et al.* (2012) avaliaram um modelo de coleta para a adoção da coleta seletiva e reciclagem de brinquedos eletrônicos com a variação das taxas de coleta. Yao *et al.* (2018) analisaram a reciclagem de telefones celulares na China.

Considerando-se o EEE como um todo, a LCA pode verificar os impactos do tratamento de WEEE (ISMAIL; HANAFIAH, 2019). Hirschler, R., Wäger e Gauglhofer (2005) avaliaram o atual sistema de reciclagem na Suíça com um novo sistema de incineração com recuperação de energia. Assim como fez Wäger, Hirschler e Eugster (2011), que também compararam o atual sistema de reciclagem na Suíça com a inclusão de destinações como incineração e aterro. Song, Qingbin, Wang, Li e Zeng (2013), na China, examinaram o sistema de reciclagem de WEEE de vários produtos. Assim como, em outro estudo, Song, Qingbin, Wang e Li (2013) fizeram verificação do sistema de reciclagem em Macau. Biganzoli *et al.* (2015) estudaram o sistema de reciclagem de WEEE na Itália, para vários produtos. No Japão, Menikpura, Santo e Hotta (2014) avaliaram os impactos na mudança climática para TVs, máquinas de lavar roupa, refrigeradores e ares-condicionados. Nos Estados Unidos, Noon, Lee e Cooper (2011) verificaram a comparação de tecnologias de TVs LCD com CRT.

Van Eygen *et al.* (2016), na Bélgica, compararam as tecnologias de computador: notebook e computador pessoal. Nelen *et al.* (2014), conjugando a LCA com a análise de fluxo de materiais, propuseram indicadores baseados na massa de material reciclado, criticidade do material, risco de estoque e importância econômica. Foelster *et al.* (2016) avaliaram o sistema de reciclagem de refrigeradores no Brasil. Belboom *et al.* (2011), na Bélgica, compararam o antes e o depois do estabelecimento de sistemas de reciclagem para refrigeradores. Hong *et al.* (2015) compararam sistemas de reciclagem de vários WEEE.

Considerando-se apenas partes do EEE, ou seja, aqueles utilizando-se as partes dos WEEE ou suas misturas, pode-se avaliar placa de circuito impresso, como fizeram Xue *et al.* (2015), na China, e Iannicelli-Zubiani *et al.* (2017), na Itália. Também, pode-se verificar os impactos ambientais no sistema de tratamento de baterias misturadas nos resíduos gerais (TRAN *et al.*, 2018) como também para recuperação de materiais de mistura de WEEE de forma geral (BIGUM, MARIANNE; BROGAARD; CHRISTENSEN, 2012), ROCCHETTI *et*

al. (2013), na Itália, examinaram os impactos ambientais de recuperação de quatro tipos de resíduos: lâmpadas fluorescentes, CRT, baterias Li-íon e placa de circuito impresso.

Considerando-se os resíduos de plásticos dos WEEE, Wager e Hischer (2015), na Áustria, avaliaram o tratamento de plástico de WEEE que seriam destinados a pós consumidores de plástico reciclado ou incinerado com recuperação de energia. Mendes Campolina *et al.* (2017), no Brasil, avaliaram o sistema de tratamento de plásticos de WEEE para produzir paletes de copolímero de acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e poliestireno de alto impacto (HIPS). Alston e Arnold (2011), no Reino Unido, estudaram o sistema de tratamento de mistura de plástico de WEEE, comparando variações nas taxas de reciclagem, incineração com recuperação de energia e aterro. Bientinesi e Petarca (2009) estudaram sistemas de tratamento térmico de plástico de WEEE e compararam a combustão de plástico em uma planta de incineração de resíduos sólidos urbanos da Alemanha com um sistema de gaseificação por etapas de um sistema de gás turbina nos Países Baixos.

Considerando a coleta e transporte em sistemas parciais (somente os componentes) de gerenciamento de WEEE, Barba-Gutiérrez, Adenso-Díaz e Hopp (2008) compararam as distâncias de transportes e os tipos de veículos para sistemas de reciclagem para TVs, máquinas de lavar roupa, refrigeradores e computadores pessoais, incluindo o sistema de coleta, e concluíram que a reciclagem é a melhor alternativa para o tratamento de fim de vida de WEEE. Xiao, Zhang e Yuan (2016), na China, analisaram a recuperação de refrigeradores, incluindo o sistema de coleta. Gamberini *et al.* (2010) compararam os impactos de quatro opções rotas de transporte.

Para avaliar o potencial de periculosidade da reciclagem e do gerenciamento de WEEE, Lim *et al.* (2011), nos Estados Unidos, verificaram os impactos ambientais e na saúde humana, para nove tipos de LED, utilizando as categorias de impacto de depleção de recursos e toxicidade. Em outro estudo, Lim *et al.* (2013), fizeram estudo com lâmpadas incandescentes, lâmpadas compactas fluorescentes, e lâmpadas LED, com as categorias de impacto de depleção de recursos e toxicidade. Kang, Chen e Ogunseitan (2013) verificaram os impactos ambientais e na saúde causados por baterias de lítio, utilizando as categorias de impacto depleção de recursos, toxicidade humana e ecotoxicidade. Nos Estados Unidos, Hibbert e Ogunseitan (2014) analisaram os impactos ambientais e na saúde humana da incineração de telefones celulares. Song, Qingbin *et al.* (2015) analisaram os impactos ambientais e na saúde da reciclagem de placa de circuito impresso e CRT em uma estação de tratamento na China.

Na Europa, Kiddee, Naidu e Wong (2013) mencionam que a LCA foi utilizada para avaliar os impactos ambientais do tratamento de fim de vida (EoL). Por exemplo, na Suíça,

Hischier, R., Wäger e Gaughhofer (2005) concluíram que os sistemas de reciclagem estabelecidos tiveram clara vantagem ambiental em relação à incineração. Também usando a LCA, Wäger, Hischier e Eugster (2011) concluíram que no ano de 2009, quando comparado com o de 2004, os impactos ambientais (aquecimento global e camada de ozônio) foram significativamente menores através da recuperação de WEEE. Scharnhorst *et al.* (2005) analisaram o fim de vida de celulares e observaram que a reciclagem de materiais leva a duas conclusões: evita a produção de materiais primários que são recuperados e reduz significativamente os impactos na saúde humana através da recuperação de metais raros e preciosos. Cabe destacar que a disposição em aterros sanitários não é boa para o ambiente devido ao transporte, porque usa combustíveis fósseis.

Na Ásia, a LCA também é utilizada para o gerenciamento de WEEE. Na Coreia, Junbeum Kim *et al.* (2004) utilizaram as variáveis ambientais e econômicas para avaliar o potencial de reciclagem. No quesito ambiental, os melhores resultados em termos de impacto ambiental foram para a reciclagem de vidro, placas de circuito, ferro, cobre, alumínio e plástico e, em valores econômicos, o ranking foi cobre, alumínio, ferro, plástico, vidro e placas de circuito. Choi *et al.* (2006) estudaram os cenários de fim de vida para aterro e reciclagem de computadores pessoais (aterro e reciclagem) e concluíram que reciclar é a opção mais eficiente de disposição. No Japão, Nakamura e Kondo (2006), com LCA, avaliaram os custos do ciclo de vida e concluíram que a destinação para aterro é a que tem mais custos, assim como causa mais impactos em termos de emissões de carbono e consumo de recursos abióticos.

Na América do Sul, Streicher-Porte *et al.* (2009) estudaram o estoque de computadores doados, tanto localmente quanto oriundos de outros países para escolas da Colômbia. A opção de reuso demonstrou-se uma alternativa técnica, entretanto, com dificuldades de manutenção e limitações nos aspectos ambientais, tal como o maior uso de energia quando se compara com a opção de uso de computadores novos.

A maioria dos estudos indicam a reciclagem como melhor saída, quando comparada com incineração e aterro (APISITPUVAKUL *et al.*, 2008; CHOI *et al.*, 2006; HISCHIER, R.; WÄGER; GAUGLHOFER, 2005; JUNBEUM KIM *et al.*, 2004; SCHARNHORST *et al.*, 2005; WÄGER; HISCHIER; EUGSTER, 2011). Contudo, apenas dois outros estudos indicam que reciclagem não seria a melhor opção por incorrerem em impactos ambientais como aquecimento global, acidificação, toxicidade humana e eutrofização, por exemplo (BARBAGUTIÉRREZ; ADENSO-DÍAZ; HOPP, 2008; LU, LI-TEH *et al.*, 2006).

A LCA têm a vantagem de estimar os efeitos de consumo de materiais desde o planejamento do produto em seu desenvolvimento (MUÑOZ *et al.*, 2009; PARK *et al.*, 2006;

PREK, 2004; VAN MIER; STERKE; STEVELS, 1996), passando pelo desenvolvimento de produtos (KIM; HWANG; OVERCASH, 2001; POLLOCK; COULON, 1996) e aloca os impactos de produtos e processos de interesse ambiental (ANDRÆ; ANDERSSON; LIU, 2005; BAKRI; SURIF; RAMASAMY, 2008; BELBOOM *et al.*, 2011; FAIST EMMENEGGER *et al.*, 2006; HISCHIER, ROLAND; BAUDIN, 2010; HORIE, 2004; SATAKE; OISHI, 1998; SCHARNHORST, 2006; SOCOLOF; OVERLY; GEIBIG, 2005; SPIELMANN; SHISCHKE, 2001; UENO; SHIINO; ONISHI, 1999; YANAGITANI; KAWAHARA, 2000), (SPIELMANN; SHISCHKE, 2001). Assim como pode também avaliar aspectos econômicos e ambientais relacionados à disposição e fim de vida de aparelhos eletroeletrônicos e permite melhores opções de destinação final (AHLUWALIA; NEMA, 2007; APISITPUVAKUL *et al.*, 2008; BARBA-GUTIÉRREZ; ADENSO-DÍAZ; HOPP, 2008; CHOI *et al.*, 2006; HISCHIER, R.; WÄGER; GAUGLHOFER, 2005; JUNBEUM KIM *et al.*, 2004; LU, LI-TEH *et al.*, 2006; MAYERS; FRANCE; COWELL, 2005; NAKAMURA; KONDO, 2006; SCHARNHORST *et al.*, 2005; STREICHER-PORTE *et al.*, 2009; WÄGER; HISCHIER; EUGSTER, 2011).

3.2.3 Análise do fluxo de materiais

A análise do fluxo de materiais é uma ferramenta de gerenciamento de resíduos (pode ser ambiental, econômica e social). Basicamente utilizada para rastrear a rota dos materiais, passando por áreas de reciclagem, disposição e estoques de materiais, tanto no espaço quanto no tempo. Dessa forma, pode-se rastrear os WEEE entre continentes e países, o quantitativo de equipamentos que vão para a disposição e reciclagem e os que tiverem reuso assim como os que são destinados para exportação. A análise de fluxo de materiais também pode ser utilizada para estimar a geração de WEEE. Com o uso do quantitativo de mercado, podendo produzir dados de vendas e produção. Assim, pode-se estimar o quantitativo de receitas para recicladores, por conta da recuperação de metais, tais como alumínio e cobre (KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013).

Essa forma de análise pode ser utilizada para estimar o quantitativo de WEEE gerado com os seguintes métodos (KUMAR; HOLUSZKO; ESPINOSA, 2017):

1. **Método de obsolescência das vendas:** utiliza dados de vendas de determinada região e a vida útil dos equipamentos (que considera o uso, capacidade, reuso – dados obtidos através de pesquisa). Entretanto, há que se tomar cuidado com os equipamentos que entram em circulação sem registro.
2. **Método de pesquisa aplicada:** utiliza dados de pesquisa e de censo para quantificar a geração e coleta de WEEE de uma região.

3. **Método híbrido de obsolescência de vendas e dados de compra e venda:** usa dados de vendas (pode considerar exportação) e dados de pesquisas para estimar a geração de WEEE (para estimar a coleta).
4. **Método do balanço de massa:** usa a extrapolação de dados de pesquisa para quantificar os fluxos de eletrônicos.

Esse tipo de análise, assim como o próximo a ser analisado (Análise Multicritério), por não ter relação íntima com os objetivos do presente trabalho não serão apresentados em maior profundidade.

3.2.4 Análise multicritério

A análise multicritério pode ser utilizada como ferramenta para a tomada de decisão em decisões estratégicas e problemas complexos, tanto em aspectos quantitativos quanto qualitativos. Pode ser utilizada no contrassenso econômico existente entre benefícios econômicos e as receitas de processamento de fim de vida de equipamentos, levando-se em consideração alternativas de fim de vida, modelos de produto, análise de desenvolvimento de modelo de fim de vida, formulação de problemas multiobjetivo, soluções de Pareto para que sejam feitos gráficos comparativos que tragam maior benefício econômico e menores custos econômicos. Apesar de ser uma ferramenta útil para o gerenciamento de WEEE é mais utilizada para resíduos sólidos de forma geral (KIDDEE; NAIDU; WONG, 2013).

3.3 Reciclagem de WEEE

Entre as razões para a realização da reciclagem de WEEE estão os fatores econômicos, ambientais, de segurança e saúde pública. Na área econômica, há diversos metais preciosos presentes nos WEEE como: cobre, ouro, prata, paládio, alumínio e ferro (NAMIAS, 2013). Da mesma forma, afirma-se que a porção mais valiosa do WEEE é a placa de circuito impresso (PCB, *printed circuit board*) com mais de 40% dos metais valiosos encontrado nos WEEE (GOLEV *et al.*, 2016). Na mesma linha, *notebooks, tablets e smartphones* são os itens de maior valor, por apresentarem metais valiosos e metais críticos (aqueles cuja demanda é alta ou há criticidade em relação à sua coleta ou extração natural). Apesar de apenas 3 a 6% dos WEEE serem placas de circuito impresso, elas contêm significantes proporções de ouro, prata e paládio (CUCCHIELLA *et al.*, 2015). Pode-se verificar que a quantidade de metais presentes nos WEEE é maior do que a encontrada em mineração comum (LÉBRE; CORDER, 2015). Na questão trabalhista, a indústria de WEEE pode gerar empregos numa relação de 296 empregos a cada 10 mil toneladas de WEEE (ELECTRONICS TAKE BACK COALITION, 2014).

No quesito ambiental, verifica-se que a indústria da reciclagem pode deixar os resíduos perigosos longe dos aterros sanitários, entre eles, mercúrio, cádmio, chumbo, cromo, retardantes de chama, produtos químicos depletors da camada de ozônio, evitando os riscos associados à disposição inadequada desses materiais (BALDE *et al.*, 2015). De outro lado, a reciclagem de metais pode reduzir a demanda de produção de novos metais, assim como trazer redução significativa de gasto energético, quando se compara com a produção de materiais virgens (ELECTRONICS TAKE BACK COALITION, 2014). Por exemplo, reciclagem de 10 kg de alumínio promove 90% de economia de energia e previne da criação de 13 kg de resíduo de bauxita, 20 kg de CO₂ e 0,11kg na poluição do ar. Assim como, a reciclagem de ferro e aço proporciona 74% de economia de energia, 86% na redução da poluição do ar, 40% na redução do uso da água, 76% de redução da poluição da água, 97% de redução de resíduos de mineração e 90% de uso de materiais virgens (CUI; FORSSBERG, 2003; ELECTRONICS TAKE BACK COALITION, 2014).

Quanto à questão de saúde pública e segurança, Kumar, Holuszko e Espinosa (2017) ressaltam que as substâncias perigosas que estão presentes nos WEEE podem contaminar a água, solo, ar, e podem trazer riscos para a saúde humana, atrapalhando o desenvolvimento mental, causando lesões nos rins, fígado e pulmão.

A reciclagem pode ocorrer em pré-processamento (descomissionamento, trituração, e separação mecânica) e pós-processamento (piro/hidro/bio metalurgia) (KUMAR; HOLUSZKO; ESPINOSA, 2017)

No descomissionamento, há a retirada prévia de materiais perigosos com posterior separação de metais, vidros e plásticos. Os materiais que não podem ser removidos manualmente são enviados ao triturador para serem separados novamente através de processos magnéticos, no caso de metais (KUMAR; HOLUSZKO; ESPINOSA, 2017).

Na trituração ou pulverização, há a quebra do resíduo em partículas menores para posterior processamento. Os sistemas automatizados têm vantagens sobre os manuais, entretanto, geram muita poeira e perda de material, que pode chegar até 40%, e trazem consigo a desvantagem de se ter um grande investimento em maquinário (KUMAR; HOLUSZKO; ESPINOSA, 2017).

A separação mecânica dos materiais pode ser realizada por processos secos ou úmidos, que podem ser mais eficazes por terem operações de decantação ou flutuação. Na separação magnética, pode-se separar o ferro, aço e demais metais ferromagnéticos. Separadores de densidade podem ser utilizados para recuperar metais, como o cobre, ouro e prata, das frações não metálicas. Sensores infravermelhos podem ser usados para identificar e separar plástico

assim como sensores ópticos podem separar vidros (KUMAR; HOLUSZKO; ESPINOSA, 2017).

Na etapa de pós processamento, há a possibilidade de recuperação de metais por pirometalurgia, que é a fusão de mistura de metais desejados em altas temperaturas em alto-forno. Os metais são recuperados pelas diferenças de temperaturas de fusão dos metais. Com essa técnica, pode-se obter cobre, ouro, prata e paládio. Consegue-se a separação dos metais valiosos do resíduo, entretanto, isso requer alta demanda de energia, gera dioxinas, furanos e liberação de metais voláteis (KUMAR; HOLUSZKO; ESPINOSA, 2017).

No que se refere à hidrometalurgia, há a aplicação de soluções químicas para dissolver os metais. Comparada à pirometalurgia, é menos intensa em energia, mais controlável e previsível, entretanto, tende a ser um processo lento que demanda o uso de reagentes e há geração de efluentes (KUMAR; HOLUSZKO; ESPINOSA, 2017).

Já na biometalurgia, há o uso de micro-organismos para separar os metais valiosos e é usada para recuperação de cobre e ouro. Embora use menos produtos químicos e apresente baixo custo operacional, é um processo lento e não muito bem desenvolvido para metais de mais alta complexidade (KUMAR; HOLUSZKO; ESPINOSA, 2017).

3.3.1 Impactos dos WEEE durante o processo de tratamento

Na reciclagem de WEEE, pode-se lançar substâncias tóxicas no ambiente e pode afetar a saúde humana. Nesse caso, pode-se citar duas possibilidades dessas substâncias atingirem o homem: (i) entrada através da cadeia alimentar e, portanto, transferindo-se aos humanos e (ii) causando impacto direto nos trabalhadores de áreas de reciclagem que ficam expostos a essas substâncias tóxicas. Na Tabela 1, adaptada e resumida de Kiddee, Naidu e Wong (2013), são apresentadas as substâncias químicas mais comuns presentes nos WEEE, sua aplicação e o que podem causar na saúde humana.

Tabela 1 – Substâncias tóxicas presentes em WEEE e seus impactos na saúde

Substância	Aplicação nos WEEE	Impacto na saúde
Antimônio (Sb)	Agente colante de vidros e plásticos	Cancerígeno (estômago)
Arsênio (As)	Usado em LED (<i>light emitting diodes</i>)	Danos na pele, câncer no pulmão e sistema nervoso
Bário (Ba)	Velas de ignição, lâmpadas fluorescentes, calas de CRT em tubos de vácuo	Inchaço no cérebro, fraqueza muscular, danos ao coração, fígado, baço por longa exposição

Substância	Aplicação nos WEEE	Impacto na saúde
Berílio (Be)	Fontes de energia, placas mãe, relés e plugues	Berilicose (cancerígeno), câncer de pulmão e danos na pele
Retardador de chama bromados (BFR): Bifenilos polibromados (PBB), Éter difenílico polibromado (PBDE) e Tetrabromobisfenol (TBBPA)	BFR são usados para reduzir a flamabilidade em placas de circuito impresso, carcaças de plástico, teclados, e isolamento de cabos.	Durante a combustão, as placas de circuito impresso e carcaças de plástico emitem vapores tóxicos.
Cádmio (Cd)	Baterias recarregáveis de Ni/Cd, <i>chips</i> semicondutores, detectores infravermelhos, impressoras a tinta e <i>tonners</i>	Danos irreversíveis aos rins
Clorofluorcarbonos	Unidades refrigeradoras e espumas expandidas	Impactam na camada de ozônio
Cromo hexavalente (Cr VI)	Carcaça de plástico de computadores, cabeamentos, discos rígidos, colorantes e pigmentos	Extremamente tóxico ao ambiente, danos ao DNA, comprometimento ocular.
Chumbo (Pb)	Soldas, baterias ácido-chumbo, tubos de raio catódicos (CRT), cabeamento, placas de circuito impresso e tubos fluorescentes	Danos ao cérebro, sistema nervoso, danos aos rins e sistema reprodutivo, desordens no sangue.
Mercúrio (Hg)	Baterias, lâmpadas, telas planas, <i>switches</i> e termostatos	Danos ao cérebro, rins e fetos
Níquel (Ni)	Baterias, carcaça de computador, tubos de raios catódicos e placas de circuito impresso	Reações alérgicas, bronquites, reduz o funcionamento dos pulmões e câncer de pulmão
Bifenilas policloradas	Condensadores, transformadores e fluidos de transferência de calor	Pode causar câncer em animais e danos no fígado de humanos
Poli (cloreto de vinila) (PVC)	Monitores, teclados, cabos e carcaça de computadores	A combustão incompleta pode emitir grandes quantidades de cloreto de hidrogênio que forma ácido clorídrico, o que pode causar problemas respiratórios.

Substância	Aplicação nos WEEE	Impacto na saúde
Selênio (Se)	Máquinas antigas de cópia	Altas concentrações causam lesões

Kiddee, Naidu e Wong (2013) afirmam, com base em estudos que foram feitos nas áreas de reciclagem da China, Índia e Tailândia, que a reciclagem inadequada de WEEE em países em desenvolvimento ocorre domesticamente, com o uso de processos manuais, resultando em significantes contaminações no solo, água e ar. Tais procedimentos podem prejudicar a saúde de pessoas locais engajadas nesse processo de reciclagem. Entre os poluentes pode-se citar: os POP (*persistent organic pollutants*, poluentes orgânicos persistentes), metais pesados (tais como: Pb, Cd, Ni, Cr, Hg e As), poluentes orgânicos (PAH - hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, bifenilas policloradas, BFR – Retardadores de chama bromados, tais como, PBDE - éter difenílico polibromado, PCDDs/Fs -dibenzo-p-dioxinas policloradas/Furanos) – que são formadas durante o tratamento térmico no processo de reciclagem. Assim, afirmam que, no impacto nas águas, pode-se dizer que a concentração de certos metais, como o chumbo, por exemplo, é maior que o padrão em determinadas áreas próximas de locais de reciclagem. Da mesma forma acontece com a contaminação do ar, as concentrações de certos metais, Cr, Zn e Cu são maiores do que as de regiões próximas.

3.4 Avaliação do desempenho ambiental para o gerenciamento de WEEE

Em países desenvolvidos já existem várias regulações e políticas elaboradas para o fim de vida de equipamentos eletroeletrônicos (EEE), ao passo que em países em desenvolvimento ainda falta esse tipo de regulação (ISMAIL; HANAFIAH, 2017).

A diretiva da União Europeia n.º 2008/98/EC (UNIÃO EUROPEIA, 2008) propõe uma hierarquia para a gestão de resíduos da ordem mais importante para a menos importante para o ambiente: prevenção e redução, preparo para o reuso, reciclagem, outros tipos de valorização (reciclagem, por exemplo); por último a disposição e eliminação. A diretiva da União Europeia n.º 2012/19/UE (UNIÃO EUROPEIA, 2012) complementa esse tipo de gestão com medidas de proteção do ambiente e da saúde humana, contribuindo para o desenvolvimento sustentável. Entretanto, de acordo com Saner, Walser e Vadenbo (2012), essa hierarquia para o gerenciamento de resíduos – comumente chamada de ‘3Rs’ (**R**edução, **R**euso e **R**eciclagem) – não é considerada em estudos de LCA de WEEE.

Para o gerenciamento de WEEE, a Diretiva 2002/96-CE (UNIÃO EUROPEIA, 2003) trouxe a obrigatoriedade de os fabricantes coletarem seus produtos dos consumidores e os dispor apropriadamente. As diretivas posteriores da UE sobre WEEE ratificam a prioridade da

avaliação do quantitativo de massa de WEEE tratados. Assim, o critério de massa pode ser considerado uma base para o gerenciamento dos WEEE, como se vê no artigo 7º da Diretiva de 2012/19/UE, quando se define como metas taxas de recuperação em massa dos resíduos coletados (UNIÃO EUROPEIA, 2012).

Nelen *et al.* (2014) elencaram indicadores multidimensionais (que consideram massa de material recuperado, escassez dos materiais ou risco de falta, valor de mercado, e impactos evitados pela recuperação de material) para analisar os benefícios da reciclagem de WEEE. Basearam-se na quantificação pela massa de resíduos, como recomendado pela Diretiva da União europeia sobre WEEE (UNIÃO EUROPEIA, 2003). Constituem quatro tipo de indicadores:

(1º) percentual dos materiais reciclados é dado pela divisão da somatória da quantidade em massa de material recuperado/reciclado, pela somatória do total de massa de material que entra no processo de reciclagem. Uma possível interpretação seria: caso o indicador valha 1 (em uma situação hipotética), haveria completa reciclagem dos materiais de entrada.

(2º) recuperação de materiais escassos ou críticos (que, além de considerar a massa de materiais, acrescenta a variável de escassez – definida como a importância econômica e o risco de falta dos materiais), dessa forma, o indicador seria a somatória da multiplicação da massa do material pela importância econômica dele, multiplicada pelo risco de falta dos materiais de entrada divididos pelas mesmas variáveis dos materiais de saída do processo de reciclagem; Uma possível interpretação seria: se o indicador vale 1 (em uma situação hipotética), significa que todos os materiais presentes na entrada do processo são desejáveis; caso seja menor do que 1 (situação usual) significa que há mais materiais que não são recuperáveis (portanto, deveriam ter outra destinação, por exemplo).

(3º) fechamento de ciclo de material – considera que os materiais voltam para a mesma aplicação de antes do processo de reciclagem (da mesma forma que no indicador de escassez, acrescenta-se o valor de mercado à massa de material como variável multiplicadora), assim, o indicador seria calculado pela somatória de massa de material reciclado multiplicando ao seu valor de mercado divididos pela somatória da multiplicação da massa do material de saída da reciclagem pelo respectivo valor de mercado. Uma possível interpretação seria: em uma situação ideal, caso o indicador valha 1, todos os materiais seriam recuperados e o preço de mercado dos materiais, produtos ou substâncias recicladas seriam iguais aos seus equivalentes no equipamento original.

(4º) avaliação do impacto ambiental evitada (esses indicadores estão relacionados à importância do impacto ambiental evitado com a reciclagem dos materiais dividido pelos

impactos ambientais da produção de materiais novos), nesse caso a comparação é feita com o uso da LCA. Uma possível interpretação – em uma situação ideal, na qual o indicador vale 1, haveria um ciclo fechado em que há reciclagem de todos os materiais no processo. O valor do indicador diminui à medida que há redução da massa de material recuperado ou quando o material da fração de saída não causa tanto impacto quanto a produção do novo. Se desejável, nesse indicador, pode-se levar em conta as categorias de impacto (mudanças climáticas ou ecotoxicidade, por exemplo).

Motta e Barreto (2019) apontam uma série de indicadores para a gestão dos WEEE sob os aspectos econômicos, ambientais e sociais para instituições públicas e privadas. Esses indicadores foram selecionados a partir de pesquisa bibliográfica. Para os indicadores econômicos/financeiros, eles elencam como categoria a caracterização da empresa (ramo, porte, despesa com EEE, número de colaboradores, proporção de cada tipo de EEE, quantidade de EEE adquirida). Já para os indicadores ambientais elencam como categorias de indicadores: a geração de WEEE, logística interna em relação aos WEEE (existência de plano de gerenciamento de WEEE, manutenção de equipamentos, por exemplo), destinação final dos WEEE (revenda, reciclagem, destinação adequada, reuso, por exemplo) e normas institucionais (existência de normas e monitoramento de coleta e destinação adequada de WEEE). E, por fim, indicadores sociais que tratam de capacitação e sensibilização interna (conhecimento da equipe sobre logística reversa de WEEE e sensibilização ambiental e preocupação com questões sociais, por exemplo), externalização da informação (existência de informações sobre a gestão de WEEE sistematizada e disponibilidade de sugestão acerca do WEEE na instituição) sobre os WEEE. Conforme se resume na Figura 1, montada a partir desse estudo.



Figura 1 – Esquema de indicadores para gestão dos WEEE.

Marinescu, Cicea e Ciocoiu (2005) analisam a *performance* do gerenciamento de WEEE em países da União Europeia. Para isso, estabeleceram como dados de saída a taxa de coleta de WEEE e, como dados de entrada, variáveis que podem influenciar na coleta de WEEE (por exemplo, cada país estabelece a própria quantidade de material que será reciclado). Os autores fizeram uma comparação relativa entre os países membros da região, considerando, assim, não apenas o nível ambiental, mas também o econômico e social na *performance* do gerenciamento de WEEE. Os autores enfatizaram que, na questão ambiental, a *performance* estaria relacionada à ecoeficiência.

Vasilenko, Gurauskienė e Varžinskas (2009) avaliaram a análise de eficiência do sistema de gerenciamento de WEEE do setor público na Lituânia. Através de pesquisa anônima, entrevistas, análise estatística de dados oficiais, e revisão de artigos científicos concluíram que esse setor deveria aderir às compras públicas verdes; substituição da compra de equipamentos pelo sistema de serviços; inclusão de contratos entre compradores e vendedores que garantam os recursos para a correta destinação final dos WEEE; construção de iniciativas de criação de capacidade que envolva todos os funcionários; sistema de coleta; avaliação técnica, ambiental e econômica dos WEEE antes do envio para leilão; monitoramento do fluxo de WEEE no setor público.

Redondo *et al.* (2018) analisaram estratégias para o gerenciamento integrado de WEEE com objetivos de redução da geração, incentivo ao uso e participação integrada, o que permitiu uma avaliação socioeconômica do tema. Foram gerados dois grupos, um com estratégias de

economia circular, educação ambiental e promoção de trabalho e outro grupo considerando responsabilidade estendida ao produtor, iniciativas da população e taxas de coleta. Os autores concluíram que o primeiro grupo apresentou uma diminuição nas taxas de geração de WEEE; enquanto o segundo grupo apresentou uma melhora nas taxas de disposição.

Lu, Bin *et al.* (2015) analisaram os impactos ambientais da inovação tecnológica nas estratégias de gerenciamento de WEEE através de uma análise múltipla do ciclo de vida (esse tipo de análise difere da LCA convencional na forma de definição de escopo, unidade funcional e no método de cálculo do inventário do ciclo de vida. Assim como, é utilizada para inovação tecnológica, geração múltipla e substituição de produtos) e concluíram que a constante inovação que ocorre da rápida troca de equipamentos pode levar às flutuações na geração desse tipo de resíduo e impactos significantes. Concluíram que os produtos concebidos por políticas ambientais (o que inclui gerenciamento) deveriam levar em consideração a inovação tecnológica. Avaliam quantitativamente a geração de WEEE como impactantes ambientais e tomaram por estudo de caso os monitores, considerando as categorias de impacto mais significativas as categorias minerais (no caso de produção de cobre) e ecotoxicidade (para recuperação de cobre). Dessa forma, correlacionam diretamente a geração de resíduos aos impactos gerados.

Ibanescu *et al.* (2018) fizeram a análise do perfil de sistemas de gerenciamento de WEEE e sustentabilidade em países da União Europeia. Essas análises levaram em conta indicadores relacionados aos estágios do ciclo de vida dos WEEE: coleta, transporte e tratamento apenas em termos de emissões dos gases do efeito estufa. E na comparação relativa entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, destacam-se: tamanho da economia, *performance* geral do gerenciamento de resíduos sólidos e existência (ou desenvolvimento) de práticas adequadas no gerenciamento de WEEE. Os autores afirmam que o gerenciamento dos WEEE é analisado em termos quantitativos em função da geração, coleta, recuperação, reciclagem, tratamento e disposição, que não é suficiente para a análise dos sistemas de gerenciamento de WEEE. Esse trabalho reforça que a LCA é útil para análise ambiental que busca a sustentabilidade. E, assim, finalizam concluindo que os gases do efeito estufa, medidos através do indicador de pegada de carbono seria o indicado para esse tipo de gerenciamento.

Barletta *et al.* (2016) propuseram uma nova estrutura metodológica para permitir a análise, comparação e visualização dos impactos de sustentabilidade (econômica, ambiental e social) no gerenciamento de WEEE aplicada a uma estação de tratamento no que se refere à disponibilidade de soluções de tratamento automatizadas. Essa estrutura de tomada de decisões foi elaborada com base em um modelo com etapas de solução de problemas o qual segue a

seguinte sequência: identificação e conceituação do problema; análise do problema (seleção de critérios para medir os impactos e seleção de critérios e ferramentas de sustentabilidade); solução do problema (alternativas de solução); tomada de decisão (avaliação das alternativas, uso das ferramentas, avaliação de resultados, apresentação dos impactos aos interessados); e avaliação (seleção da solução e sua implementação). Assim, da mesma forma que o presente trabalho, os autores lançam mão da utilização, somente para o viés ambiental, a avaliação do ciclo de vida e indicadores como critérios.

De um modo geral, verifica-se que a quantificação de massa de material de WEEE encaminhado à reciclagem é utilizada como forma de avaliação do desempenho do gerenciamento de WEEE.

Com isso, é possível identificar vários trabalhos que envolvem o uso da metodologia LCA no gerenciamento de WEEE, podendo-se citar: Lu, Bin *et al.* (2015) correlacionaram a LCA com a inovação tecnológica de EEE; da mesma forma, Ibanescu *et al.* (2018) utilizaram a LCA para fazer a análise ambiental e em todo o ciclo de vida dos EEE em países da União Europeia; Barletta *et al.* (2016) propuseram uma estrutura metodológica para o gerenciamento de WEEE e utilizaram a LCA no campo ambiental para soluções automatizadas em uma estação de tratamento; por outro lado, os trabalhos de Motta e Barreto (2019) avaliaram o gerenciamento de WEEE em empresas privadas e públicas; Marinescu, Cicea e Ciocoiu (2005) verificaram como se dá a coleta de WEEE em países da União Europeia; Vasilenko, Gurauskienė e Varžinskas (2009) analisaram o sistema de gerenciamento no sistema público; e Redondo *et al.* (2018) lançaram mão de economia circular e responsabilidade estendida ao produtor para avaliação dos WEEE, entretanto, não utilizaram a LCA.

Na tentativa de elencar uma proposta de identificar indicadores de sustentabilidade para a avaliação de WEEE, Ferreira, Pacheco e Silva (2018) sugerem que essa busca pode ser feita com indicadores (ambiental, econômico, social e técnico) obtidos através de pesquisa bibliográfica e com pesquisa Delphi (pesquisa que é dividida em fases, nas quais selecionam-se especialistas da área, avalia-se a importância dos indicadores através de entrevistas, avaliam-se os resultados das entrevistas e análise dos dados obtidos).

4 Metodologia

A sequência metodológica de estudo está esquematizada na Figura 2.

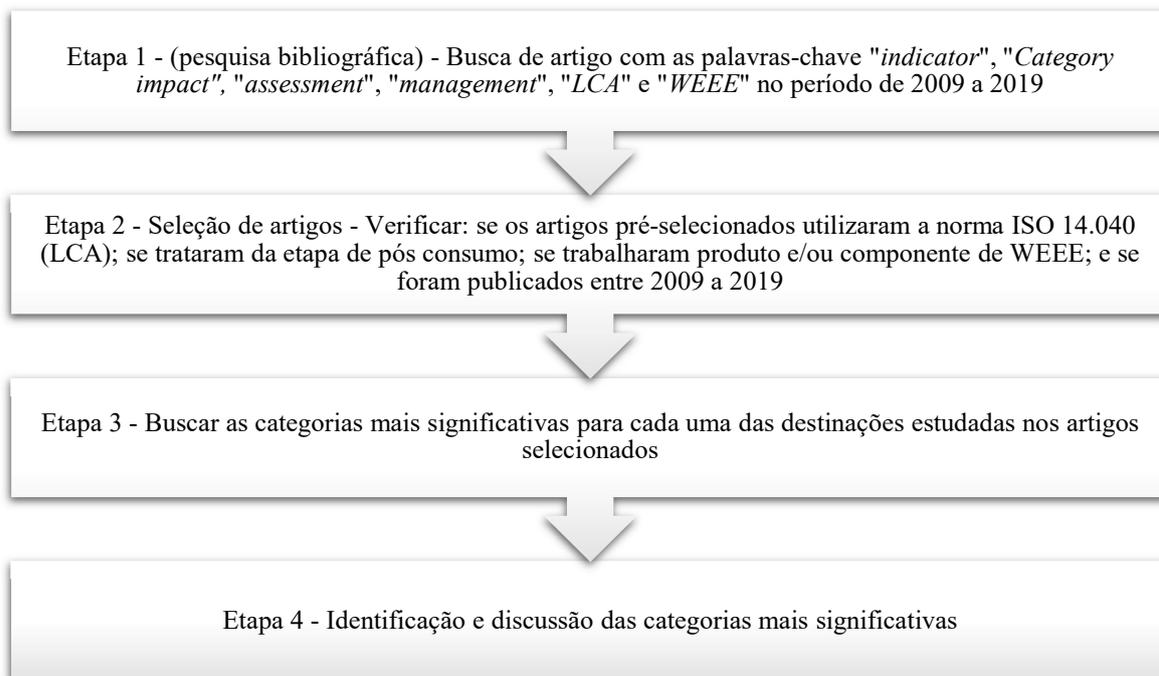


Figura 2 – Fases da metodologia

4.1 Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica subdivide-se em, basicamente, quatro partes com buscas em sites de pesquisa:

- (i) uma primeira com as palavras-chave "indicator", e ["WEEE ou e-waste"], buscando indicadores para WEEE;
- (ii) outra com as palavras-chave "assessment", "management", "e-waste", "electronic" e "weee", procurando por gerenciamento/análise de WEEE;
- (iii) uma terceira com as palavras "category impact", "weee" e "e-waste", na busca por categorias de impacto com WEEE, e, uma última e quarta etapa
- (iv) com os termos "LCA", "e-waste" ou "weee", com o fito de encontrar trabalhos de LCA de WEEE.

Nos três primeiros casos o objetivo da busca era saber se o objetivo principal desse trabalho já fora executado anteriormente, e a quarta pesquisa foi no sentido de fazer uma seleção de artigos de LCA de WEEE.

Na primeira parte da etapa 1 da metodologia – pesquisa bibliográfica, em abril de 2019, buscou-se, primeiramente, o assunto: indicadores para avaliação de gerenciamento de WEEE (com as palavras-chave: "indicator", e ["WEEE ou e-waste"]), no site do Periódicos Capes, e obteve-se como resultado correlacionado com o assunto de indicadores para o gerenciamento de WEEE apenas o artigo de Nelen *et al.* (2014), o qual demonstra uma metodologia de cálculo

de indicadores para a reciclagem. Esses indicadores já foram detalhados no subitem 3.4: Avaliação do desempenho ambiental para o gerenciamento de .

O trabalho de Nelen et al. (2014), dentre os pesquisados, foi o único que apareceu nas pesquisas bibliográficas como resultado quando da busca pelo termo ‘*indicator*’ em pesquisas em periódicos, por isso, optou-se por utilizar as categorias de impacto como indicadores para o gerenciamento de WEEE. Em uma segunda subdivisão, ainda na etapa 1 da pesquisa bibliográfica, e na busca de trabalhos que tinham alguma relação com o objetivo do corrente trabalho, fez-se também uma pesquisa sobre avaliação do gerenciamento de REEE no site do Periódicos Capes, com as palavras-chave, em inglês, “*assessment*”, “*management*”, “*e-waste*”, “*electronic*” e “*weee*” (com a intenção de se obter resultados que continham as palavras avaliação, gerenciamento, WEEE ou eletrônicos ou WEEE), que revelou 112 resultados (artigos). Com a leitura dos títulos e dos resumos, verificou-se que apenas 07 (sete) trabalhos (BARLETTA *et al.*, 2016; BIGUM, MARIANNE, 2014; IBANESCU *et al.*, 2018; LU, BIN *et al.*, 2015; MARINESCU; CICEA; CIOCOIU, 2005; MOTTA; BARRETO, 2019; REDONDO *et al.*, 2018; VASILENKO; GURAUSKIENĖ; VARŽINSKAS, 2009) apresentavam alguma relação com o tema de análise do gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos (eles também foram apresentados e discutidos no subitem 3.4). Apesar disso, nenhum utilizou as categorias de impacto como critério para a simplificação do gerenciamento de WEEE como critério de avaliação ambiental, fazendo com que nenhum desses trabalhos fosse considerado selecionado para a proposta desse trabalho.

Com diferentes palavras-chave e, em uma terceira etapa da pesquisa bibliográfica, focando em categorias de impacto e WEEE, foram feitas diversas pesquisas: uma primeira pesquisa *booleana* (tipo de pesquisa avançada em que *AND*, traz resultados inclusivos e *OR*, traz resultados alternativos, em ambos os casos pode-se usar parênteses para delimitação de assuntos e palavras-chave da seguinte maneira: ["*category impact*" (categorias de impacto) e (AND) ("*weee*" OR "*e-waste*")]), inicialmente sem fixar nenhum período específico e depois filtrando-se entre 2009 e 2019, no site do Periódicos Capes (www.periodicos.capes.gov.br). Ao se colocar as palavras-chave “*category impact*”, “*weee*” e “*e-waste*” para aparecerem juntas nos resultados, obteve-se 14 resultados. Eles não apresentaram tema semelhante ao proposto nessa dissertação. Ou seja, nenhum estudo anterior abordou as principais categorias de impacto como critérios para o gerenciamento de WEEE por LCA no intuito de simplificá-lo. Uma segunda pesquisa, agora no Google Acadêmico (www.google.com.br/academico), com os mesmos critérios de buscas, obteve 26 resultados e da mesma forma que na pesquisa feita no Periódico Capes, não encontrou trabalho que tinha o mesmo objetivo dessa dissertação.

Após a pesquisa no endereço eletrônico do Google Acadêmico, fez-se também pesquisa no endereço da *Web of Science* (www.webofknowledge.com), em agosto de 2019, com as palavras-chave [“*category impact*” e “*weee*”] e obteve-se 41 resultados. Porém não se encontrou artigo cujo objetivo era a identificação das principais categorias de impacto para o gerenciamento de WEEE com o uso da LCA. Isso tudo indica que o objetivo principal do presente trabalho não foi obtido anteriormente, justificando sua importância. Nesse sentido, Xue e Xu (2017) afirmam que são poucos os estudos de LCA de WEEE que têm resultados significativos no que tange à utilização da LCA como avaliação da performance ambiental no gerenciamento de WEEE.

Na última etapa (iv) da pesquisa bibliográfica, com o objetivo de selecionar artigos de LCA de WEEE, pesquisou-se, no Periódico Capes (www.periodicos.capes.gov.br), as palavras-chave [“*LCA*” e “*WEEE*”], e obteve-se 591 resultados. Entretanto, visando aumentar o número de resultados, fez-se uma nova busca booleana com as palavras-chave “*LCA*”, [“*e-waste*” ou “*weee*”] e foram aplicados outros filtros, como se segue. Optou-se por verificar artigos mais recentes, assim foi selecionado o período entre 2009 e 2019, pois segundo Ismail e Hanafiah (2019) houve um aumento significativo nos estudos a partir de 2011. Outro filtro utilizado foi a escolha da língua dos artigos: inglês, português, espanhol e italiano. Dessa busca, obteve-se 802 resultados que foram posteriormente (como demonstrado no item 4.2 pré-seleção de artigos) submetidos a uma pré-análise (que consistiu em leitura de título, do resumo e partes do texto) para o enquadramento na metodologia adotada nesse trabalho. Nessa pré-seleção, não foram considerados trabalhos que tratam de assuntos gerais e que não tinham o mesmo objetivo desse trabalho ou não tratavam de LCA de WEEE, como exemplo o artigo de Hsieh e Meegoda (2009) que tratou apenas de desenvolvimento sustentável de resíduos e, por isso, não foram contabilizados nessa pré-análise.

Foi necessário baixar todos os artigos selecionados no *site* dos periódicos (www.periodicos.capes.gov.br) uma vez que se utilizou programa de gerenciamento de bibliografia para a elaboração das referências, ou seja, todos os artigos que porventura seriam citados deveriam estar devidamente fundamentados e de posse do autor.

Na base Scopus, utilizando as palavras-chave *LCA* e *WEEE* foram obtidos 77 resultados. Desses, 19 não estavam entre os 802 artigos do resultado anterior. Totalizando, ao final, 821 artigos pré-selecionados para análise.

4.2 Pré-seleção dos artigos

Como o intuito da atual pesquisa é simplificar o gerenciamento de WEEE com a indicação de categorias mais significativas de impacto ambiental, verificadas a partir de estudos de LCA de WEEE, fez-se uma seleção de artigos pré-selecionados anteriormente. Para a seleção foram utilizados os seguintes critérios: (i) artigos cujo assunto principal era LCA de WEEE, nesses casos, a escolha se deu (ii) tanto para o produto completo (todo o EEE) ou de parte dele (somente os componentes: CRT, monitores, placa de circuito impresso, por exemplo), estudos realizados no período entre 2009 e 2019, (iii) e que tinham executado a LCA com base na estrutura da norma ANBT NBR ISO 14.040 (ABNT, 2014) e (iv) que tratavam de fim de vida de WEEE.

Essa seleção não levou em consideração se os estudos de LCA estavam normalizados ou não, porque essa etapa é não obrigatória.

Assim, optou-se por selecionar os artigos que utilizaram a norma ANBT NBR ISO 14.040 (ABNT, 2014) para o seu desenvolvimento. Não foram considerados artigos (i) que estudaram produtos eletroeletrônicos não usuais pela sociedade (caso dos painéis fotovoltaicos). Também teve-se o cuidado de verificar (ii) os estudos duplicados (aqueles trabalhos que apareceram duas vezes quando buscados em diferentes sites). Considerou-se os estudos que apresentavam a análise para diferentes EoL (end of life) no pós consumo: aterro, reciclagem (tema tratado como principal/foco) e incineração, apesar de os estudos de LCA contemplarem, por vezes, todo o ciclo de vida dos produtos ou componentes. Também não foram considerados (iii) os artigos que tratavam de desenvolvimento de metodologia para LCA.

O número total de artigos científicos sobre LCA de WEEE que pudessem auxiliar na busca de categorias de impacto foi 821 (802 Periódicos Capes +19 Scopus). Ao cabo, com as inclusões (os 19 do Scopus) e exclusões (72) de artigos, excluídos com base nos critérios estabelecidos acima (se tratavam de WEEE, repetidos, desenvolvimento de tecnologia de WEEE), a pesquisa (pré seleção) resumiu-se em um total de 749 (821-72) trabalhos.

Esses 749 resultados foram tabulados e analisados com base nos critérios da atual pesquisa (se usou a ISO 14040, se tratavam de pós-consumo, se eram LCA de WEEE, e se eram do período de 2009 a 2019). Dessa pré-seleção, foram selecionados 24 artigos, que serão discutidos e analisados no item RESULTADOS E DISCUSSÃO. A proposta é obter as categorias mais significativas a partir desses artigos.

4.3 Identificação das categorias mais significativas

Esse trabalho tem um foco ambiental e não serão verificados estudos de LCA que avaliaram os aspectos econômico e social.

Foram identificadas as categorias de impacto mais estudadas e as importantes/significativas (consideradas aquelas que acarretaram mais impactos negativos ou que trouxeram benefícios) para o gerenciamento de WEEE, considerando reciclagem, reuso, incineração, recuperação de metais, recuperação de equipamento, conserto de equipamento e aterro sanitário.

Na escolha das categoria mais estudadas, elencou-se quais categorias foram estudadas, por autor, e se fez uma contagem. Esse levantamento teve variação de 01 (uma) citação (para o caso das categorias consumo de materiais renováveis e consumo de materiais não renováveis, por exemplo) a 30 (trinta) citações no caso de aquecimento global. Assim, fez-se uma média do número de aparições/contagens das categorias de impacto nos trabalhos selecionados, as categorias de impacto que tiveram contagem acima dessa média (que foi de 11 contagens) foram consideradas as mais estudadas.

Para a identificação das categorias mais significativas, buscou-se as categorias de impacto que os autores julgavam mais importantes para o gerenciamento em questão. Assim, os critérios utilizados para o julgamento das categorias mais significativas foram baseados no conteúdo dos próprios artigos analisados. Nesses trabalhos ocorreram os seguintes cenários: indicação qualitativa e quantitativa das categorias de impacto. Houve casos em que não havia uma demonstração com cálculos, tabelas, gráficos e números dos cálculos realizados durante o estudo de LCA, e o autor apenas indicava qualitativamente, nomeando quais eram as categorias mais importantes para o seu estudo; e, em uma segunda observação, demonstrou-se que, por outro lado, houve casos em que as categorias foram calculadas (alguns com tabelas e gráficos e uso dos programas e metodologias da LCA), e as mais significativas apresentaram um valor relativo de destaque, considerando o sistema analisado. De toda forma, a fim de simplificar, elegeu-se as categorias que o próprio autor indicou como significativas.

Os estudos de LCA são realizados no mundo todo, para identificar a maior incidência regional, por continentes, foram verificados, dos 24 artigos selecionados, os locais em que foram executados os estudos, assim pode-se quantificar também onde o assunto de LCA de WEEE foi mais abordado.

Os artigos pesquisados foram tabulados no item resultados e discussão para melhor identificar seus resultados mais significativos.

As categorias de impacto Aquecimento Global e Mudanças Climáticas estão relacionadas ao mesmo impacto (efeito estufa), sendo assim, foram consideradas, para fins do presente trabalho, como a mesma categoria de impacto.

Entretanto, as categorias de impacto Depleção da Camada de Ozônio e Criação Fotoquímica de Ozônio apesar de se referirem à camada de ozônio (mas com metodologias de cálculo diferentes), por terem sido diferenciadas pelos próprios autores (em 08 (oito) dos 22 (vinte e quatro) artigos selecionados) optou-se por manter essa diferenciação no presente estudo.

5 Resultados e Discussão

A seleção dos artigos, no presente trabalho, se deu a partir dos estudos que realizaram uma LCA de WEEE e que mostraram as categorias de impacto que avaliam o desempenho do gerenciamento de WEEE, conforme demonstrado no item metodologia.

A maior parte dos artigos estudados (22 dos 24 selecionados) utilizaram, para o nível de avaliação do impacto, o *midpoint* – caracterização que ocorre ao longo do mecanismo ambiental (nessa análise de impactos foram consideradas as diversas categorias de impacto: Depleção Abiótica (DA), Acidificação (AC), Eutrofização (EU), Aquecimento Global (AG), Depleção da Camada de Ozônio (DCO), Toxicidade Humana (TH), Ecotoxicidade de Água doce (ETA), Ecotoxicidade Marinha (ETM), Ecotoxicidade Terrestre (ETT), Oxidação Fotoquímica (OF), por exemplo) antes de alcançar o ponto final da categoria que é chamado de *endpoint*. Por isso, a caracterização *midpoint* foi considerada para a consecução do objetivo principal desse trabalho. E, portanto, serão considerados para fins de contagem das categorias de impacto.

Por outro lado, como já dito no item metodologia, os 02 (dois) artigos que não foram contabilizados são os trabalhos de Unger *et al.* (2017) – por ter estudado apenas gases do efeito estufa – e Song, Qingbin, Wang, Li e Yuan (2013) – por ter demonstrado apenas categorias de impacto *endpoint* (caracterização considera o mecanismo ambiental até o seu ponto final e se refere a um dano específico relacionado a uma área mais ampla). Por isso, esses autores não foram contabilizados para verificação de categorias de impacto para uma avaliação mais simplificada. Dessa forma, a seleção resumiu-se em 22 trabalhos selecionados.

Os artigos selecionados estão apresentados na Tabela 2, assim, após análise detalhada, elegeu-se as categorias de impacto mais estudadas e mais significativas, aquelas que os autores concluíram como mais significativas em suas discussões e resultados.

Os artigos são apresentados na Tabela 2: por autor, objetivo do trabalho, país onde foram obtidos os dados, as destinações estudadas, e, então, são indicadas com um “X” as categorias de impacto estudadas (separadas por benéficas [+]) e impactantes ao ambiente

[-]) e hachuradas nas categorias mais significativas para cada estudo (com marcação em cinza para destacá-las).

As categorias de impacto tiveram as seguintes abreviações: Depleção Abiótica (DA), Acidificação (AC), Eutrofização (EU), Aquecimento Global (AG), Depleção da Camada de Ozônio (DCO), Toxicidade Humana (TH), Ecotoxicidade de Água doce (ETA), Ecotoxicidade Marinha (ETM), Ecotoxicidade Terrestre (ETT), Oxidação Fotoquímica (OF), Criação Fotoquímica de Ozônio (CFO), Consumo de Materiais Renováveis (CMR), Consumo de Materiais Não Renováveis (CMNR), Consumo de Energia (CE), Mudanças Climáticas (MC), Formação de Partícula (FP), Radiação Ionizante (RI), Ocupação da Terra para Agricultura (OTA), Ocupação da Terra Urbana (OTU), Transformação da Terra (TT), Depleção da Água (DAG), Depleção de Metais (DP), Depleção fóssil (DF). Uma breve descrição delas encontra-se na próxima tabela, Tabela 3, com definições baseadas na literatura sobre o assunto (EUROPEAN COMMISSION, 2010; HUIJBREGTS *et al.*, 2017).

Tabela 3 – Breve descrição das categorias de impacto estudadas pelos autores selecionados

Categoria de impacto	Descrição
Depleção Abiótica (DA)	Tem relação com recursos naturais, tais como minas de ferro, petróleo, energia eólica, materiais inertes. Medida por kg de antimônio equivalentes.
Acidificação (AC)	Relaciona-se à deposição de ácidos. Medida em SO ₂ eq.
Eutrofização (EU)	Relaciona-se ao lançamento de macronutrientes no ambiente, tal como fósforo e nitrogênio. É medida por kg de PO ₄ equivalentes.
Aquecimento Global (AG)	Radiação infravermelha que aumenta o efeito estufa. Medida por kg de CO ₂ eq.
Depleção da Camada de Ozônio (DCO)	Quantifica, ao longo do tempo, a diminuição concentração de ozônio na estratosfera. Medida por kg de CFC-11 equivalente.
Toxicidade Humana (TH)	Relaciona-se à presença de substâncias tóxicas no ambiente, é expressa como emissão química de 1,4 diclorobenzeno-equivalente.
Ecotoxicidade de Água doce (ETA)	
Ecotoxicidade Marinha (ETM)	
Ecotoxicidade Terrestre (ETT)	
Oxidação Fotoquímica (OF)	Está relacionada à emissão de óxidos de nitrogênio no ar. Relaciona-se à criação de componentes químicos no ar (ozônio) pela ação de luz solar e certos poluentes primários. É medida por kg de etileno equivalente.
Criação Fotoquímica de Ozônio (CFO)	
Consumo de Materiais Renováveis (CMR)	Relaciona-se ao consumo de materiais renováveis.
Consumo de Materiais Não Renováveis (CMNR)	Relaciona-se ao consumo de materiais não renováveis.
Consumo de Energia (CE)	Relaciona-se ao consumo de energia.
Mudanças Climáticas (MC)	Comumente usada como Aquecimento Global, quantifica a radiação infravermelha que aumenta o efeito estufa.
Formação de Partícula (FP)	É medida pela concentração de material particulado - PM _{2.5} equivalentes (formado pela emissão de NH ₃ , NO _x , SO ₂ , por exemplo).
Radiação Ionizante (RI)	Relaciona-se com a exposição a substâncias radioativas. É a quantidade de Cobalto-60 equivalente no ar.
Ocupação da Terra para Agricultura (OTA)	Relaciona-se à perda de espécies causadas pela agricultura. Média por m ² x yr.
Ocupação da Terra Urbana (OTU)	Relaciona-se à perda de espécies causadas pela ocupação urbana.
Transformação da Terra (TT)	
Depleção da Água (DAG)	É a relação da quantidade água consumida com a quantidade de água gerada/extraída.

Categoria de impacto	Descrição
Depleção de Metais (DP)	Relacionado à concentração de minério. Expresso em kg Cu equivalente.
Depleção fóssil (DF)	Relaciona o maior valor de aquecimento de um recurso com a energia contida o petróleo bruto.

5.1 Discussão dos artigos selecionados

Abaixo serão discutidos e apresentados os artigos selecionados com base nos critérios estabelecidos na metodologia: se eram LCA de WEEE, se utilizaram a norma ISO 14.040, se eram de WEEE ou suas partes, se tratou do fim de vida e se eram do período de 2009 a 2019. Com o fito de verificar os locais onde esses assuntos foram abordados, também se verificou em quais continentes foi mais estudado.

De forma geral, analisou-se o tratamento de WEEE na China (SONG, QINGBIN; WANG; LI; ZENG, 2013). Foram investigados os impactos ambientais de estabelecimentos de tratamento de WEEE na China através da LCA. Os autores verificaram que a maior proporção de resíduos em 2010 foi de televisores. E que o tratamento pode até causar alguns impactos, mas traz grandes benefícios com recursos reciclados e reuso de alguns componentes, assim como evita o consumo de energia e emissões para o ar e água. Os autores afirmam que a reciclagem de metais, tal como cobre, traz grandes benefícios ambientais, como também a reciclagem de plásticos (cujo benefício é demonstrado com a redução de recursos fósseis) e o tratamento de placas de circuito impresso, no caso de aparelhos de TV. Da mesma forma, afirmam que outro benefício trazido é proveniente dos metais arsênio e cádmio, que tem sua extração evitada uma vez que a retirada primária (como matéria prima) desses metais requer grandes quantidades de energia. Os autores também citam que houve benefícios, de forma geral, nas categorias de impacto *endpoint*, para os impactos em saúde humana, recursos e qualidade do ecossistema, sendo que os mais relevantes foram os dois primeiros. Por outro lado, os maiores impactos foram devido ao consumo de energia durante o tratamento. Ao mesmo tempo, os autores indicam, que as categorias de impacto depleção abiótica e ecotoxicidade marinha são categorias relacionadas aos benefícios na redução de impactos para o ambiente e para a saúde humana.

Rocchetti *et al.* (2013) verificaram o gerenciamento de fim de vida de WEEE e utilizaram a LCA para a melhor escolha de recuperação de seus metais por hidrometalurgia através de uma planta móvel de reciclagem, comparando com a produção de metais virgens (produção primária). Apesar da redução de pureza do material reciclado, que é maior na produção primária, em relação ao aquecimento global, é preferível a recuperação, por

apresentar menor impacto ambiental, do que a produção de metais virgens. Apesar da necessidade de transporte da planta móvel de reciclagem, os impactos que ela causa são irrelevantes quando comparados com um centro fixo de reciclagem. Em suas conclusões verificaram que a categoria aquecimento global teve mais impactos críticos e que a extração de metais teve os maiores impactos no ambiente. Indicando, assim, as categorias de impacto aquecimento global, depleção abiótica e criação fotoquímica de ozônio como as mais impactantes.

Song, Qingbin, Wang e Li (2013) avaliaram um projeto piloto de tratamento de WEEE em Macau, utilizando análise de energia com LCA. E concluíram que o projeto tem grandes demandas de energia e traz poucos benefícios econômicos (não sendo viável a longo prazo) e baixos níveis de impactos ambientais (devido à recuperação de recursos). Quanto à LCA, concluíram que, a reciclagem de recursos (metais, plásticos e vidro), reuso de discos rígidos e memórias, tratamento de baterias podem trazer benefícios ambientais (tais como: evitar a emissão de íons de arsênio e cádmio para água e possibilidade de diminuir a extração de metais). Por outro lado, os maiores impactos são devido à incineração de painéis de LCD, materiais não ferrosos, componentes eletrônicos e outros, assim como, em menor proporção, os impactos de íons de cobre. Como destaque, pode-se citar os maiores benefícios provêm ao evitar o lançamento na água de arsênio e cádmio, evitando a extração e processamento desses metais.

Song, Qingbin *et al.* (2015), atentando-se para reciclagem de placas de circuito impresso (PCB) e tubos de raios catódicos (CRT), avaliaram a desmontagem manual e separação mecânica em duas oficinas. Os autores verificaram que os níveis de ruído para trabalhadores (abaixo de 80 dB) são satisfatórios e que o Pb foi o metal mais poluente na oficina de CRT. Assim, os resultados da análise de risco à saúde (câncer) podem ser devidos à presença desse metal, indicando que há que se ter uma maior eficiência na retirada desse metal. Entretanto, a presença de Cd era pequena em ambas as oficinas. Também concluíram que a reciclagem como um todo traz benefícios ambientais (tal como saúde humana – toxicidade). Apesar de trazer alguns impactos ambientais, os autores mostram que, para reciclagem de PCB e tubos de raios catódicos, evita-se a extração e processamento de matérias primas.

Ikhlayel (2017) estudou os impactos negativos e positivos das melhores tecnologias para WEEE, aplicando os resultados na Jordânia como estudo de caso. As destinações estudadas foram aterro sanitário, reciclagem de metais, materiais e metais preciosos, incineração de plástico e da porção perigosa das placas de circuito impresso. Concluiu que o cenário cuja destinação de WEEE em aterros é o pior deve ser evitado. E que a melhor opção se encontra no que o autor chama de gerenciamento integrado de resíduos, que trata de reciclagem de metais

(preciosos ou não), incineração de plásticos e placas de circuito impresso com recuperação de energia além do uso de aterros sanitários apenas para os resíduos não reaproveitáveis. Para a análise e comparação, o autor desenvolveu cinco cenários: 1º somente aterro; 2º cenário 1, com adicional reciclagem de metais; 3º cenário 2, com adicional reciclagem de metais preciosos; 4º cenário 3, com adicional incineração de plástico e 5º cenário 4, com adicional incineração de placa de circuito impresso. Os cenários 3, 4 e 5 são considerados, pelo autor, avançados em tecnologia. O autor concluiu que o cenário 5, para telefones celulares, é o que traz mais benefícios. E aponta que a recuperação de metais traz benefícios na toxicidade humana, enquanto eutrofização e aquecimento global trazem impactos negativos, devido à incineração.

Rubin *et al.* (2014) usaram a LCA para comparar duas estratégias para recuperação de cobre de placas de circuito impresso (uma com o uso de ácido sulfúrico e outra com o uso de água régia – ácidos nítrico e clorídrico). E mencionam que a recuperação de materiais de alto valor da placa de circuito impresso e retirada de materiais tóxicos da natureza contribuem para a redução de impactos ambientais. Concluíram que a água régia (mistura de ácido nítrico com três ou quatro partes de ácido clorídrico) tem melhor performance ambiental, comparada ao ácido sulfúrico, apesar de ambos os processos gerarem lodo após a neutralização. A acidificação se destaca, de forma negativa, entre as categorias de impacto, resultado esperado pelos autores, dado o potencial de toxicidade do processo hidrometalúrgico, enquanto nas demais categorias (aquecimento global, depleção de ozônio estratosférico, eutrofização aquática, e eutrofização terrestre) tiveram impactos insignificantes. Entre os recursos renováveis mais utilizados nos sistemas foram ar e água, e dentre os recursos não renováveis mais utilizados tem-se o ferro, chumbo, manganês e zinco, mas sempre a água régia com consumos menores que o de ácido sulfúrico. Segundo os autores, a categoria que mais se destacou foi acidificação, uma vez que os autores estudaram recuperação de cobre de PCB.

Hong *et al.* (2015) consideraram sistemas com e sem disposição final (aterro sanitário, incineração). O primeiro sistema é mais complexo (envolve produção de matéria prima e energia) e menos danoso ao ambiente devido à presença de destinação em lixões na opção sem destinação adequada. Assim, verificaram que há baixo impacto ambiental nas categorias toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade de água doce, e ecotoxicidade marinha na reciclagem com destinação adequada, por outro lado, aterro e incineração tiveram menor e maior impactos negativos, respectivamente. Isso tudo devido à otimização do consumo eficiente de energia, redução de águas residuais, e redução resíduos sólidos, aumentando o tratamento adequado de WEEE e evitando a disposição em aterros e incineração. Os principais contribuintes para mudanças climáticas foram dióxido de carbono e metano. Para toxicidade

humana, emissões de arsênio e selênio na água, e mercúrio para o ar. Para formação fotoquímica oxidante e eutrofização marinha foi o óxido de nitrogênio. Em formação de partículas e acidificação terrestre, óxidos de nitrogênio e dióxido sulfúrico tiveram atuação relevante.

Verificou-se também, possibilidades para o fim de vida de telefones celulares com as possibilidades de destinação: reuso, reaproveitamento e conserto. Utilizou-se a LCA para comparar o tradicional acondicionamento com o reaproveitamento. E concluiu-se que o conserto tem maiores impactos em todas as categorias de impacto, tais como acidificação, aquecimento global, toxicidade humana e geração de ozônio fotoquímico, exceto depleção atmosférica de ozônio, quando comparado com as possibilidades de reuso (bateria) (ZINK *et al.*, 2014).

Fiore *et al.* (2019) analisaram a melhoria no gerenciamento de WEEE em grande escala com o uso de análise de fluxo de materiais e LCA em uma planta de reciclagem na Europa. Estudaram os equipamentos de resfriamento, grandes equipamentos domésticos e telas, por serem os WEEE mais abundantes na União Europeia. E escolheram dois cenários: um com reciclagem parcial das frações valoráveis (metais e plásticos, por exemplo) e envio do restante para o aterro sanitário (o que é o convencional na Itália) e outro com completa reciclagem das frações valoráveis, incineração restrita e envio do restante para o aterro. Nesse caso, a LCA considerou o transporte da coleta dos resíduos pós-consumo, tratamento, reciclagem, incineração e disposição final. Concluiu-se que a categoria de impacto ecotoxicidade aquática (tanto marinha quanto a de água doce) foram as mais significativas. Assim como a reciclagem de metais tem relevância nos benefícios ambientais (devido ao aço e ferro para aparelhos refrigerantes; ferro e cobre para grandes eletrodomésticos; e metais preciosos de placas de circuitos impressos para telas), mas o transporte e incineração de poliuretano e borracha apresentaram os maiores impactos negativos (no primeiro caso, devido à depleção na camada de ozônio e no segundo quanto à toxicidade aquática – tanto marinha quanto de água doce).

Unger *et al.* (2017) estudaram diferentes taxas de reciclagem de WEEE na Áustria e as compararam usando dados industriais. Uma das taxas foi de 80,5% e outra de 62,5% - que é o limite mínimo para a diretiva da União Europeia. Os autores buscavam saber se havia benefícios ao se aumentar a taxa acima do mínimo para recuperação de materiais (62,5%, de acordo com a diretiva europeia) em comparação com a taxa de reciclagem de WEEE de 80,5%. Eles buscavam saber quais as quantidades de materiais recuperados a cada taxa de reciclagem e quais os impactos gerados associados aos gases do efeito estufa pela reciclagem de fim de vida de WEEE. Assim, verificaram que, em termos de material recuperado, com a taxa de 80,5%, a recuperação é mais de 50% em relação às taxas de 62,5%, 45%. E que houve uma vantagem de

215 kg de CO₂ equivalentes por tonelada de WEEE, na taxa de reciclagem maior quando comparada com a mínima estabelecida pela União Europeia. E concluíram que os impactos sobre os gases do efeito estufa são praticamente idênticos para as taxas de reciclagem estudadas.

Lu, Bin *et al.* (2017) verificaram estratégias para o fim de vida de WEEE, na China, com o uso da LCA, e afirmam que, na hierarquia de destinação de resíduos, a estratégia de reuso seria prioridade quando comparada a recuperação de materiais. Para tanto, utilizaram refrigeradores e fontes de computador para suas análises, considerando os seguintes cenários de destinação: reuso do equipamento, reuso de componentes e recuperação de materiais. E concluíram que o reuso de partes de computadores pode ser realizado, mas para refrigeradores não. No caso de fontes de computadores, teve-se benefícios em combustíveis fósseis, mudanças climáticas e minerais (metais, por exemplo) devido ao reuso de peças (capacitores, indutores e transistores), ao passo que inaláveis orgânicos causaram impacto devido à grande produção de produtos químicos. Verificaram que o reuso gera benefícios e que a recuperação de materiais e de componentes gera impactos devido ao processo de tratamento. No caso de refrigeradores, analisou-se o reuso após a recuperação. E indicou-se que o consumo de energia, nesse caso, é o principal fator a ser analisado. E que houve apenas impactos relacionados a essas destinações, principalmente em mudanças climáticas, acidificação, eutrofização e consumo de combustíveis fósseis. Os autores afirmam que, exceto na categoria de camada de ozônio, o reuso de materiais é mais benéfico que o reuso do equipamento como um todo.

Wager e Hischer (2015) usaram a LCA para estudar a destinação de mistura de plásticos provenientes de WEEE, considerando como alternativas de destinação: incineração, produção de plásticos virgens e reciclagem. Considerando as categorias de impacto: potencial acidificação terrestre, potencial de aquecimento global, potencial de eutrofização de água doce, potencial de formação oxidante fotoquímica, potencial de depleção de ozônio, potencial de depleção fóssil, potencial ecotoxicidade marinha, potencial de toxicidade humana, e potencial ecotoxicidade terrestre, concluíram que os impactos da incineração excedem em 4 vezes quando comparados com a reciclagem. E que a produção de plásticos virgens excede cerca de 6 a 10 vezes os impactos gerados pelos plásticos pós reciclagem, demonstrando que as opções de reciclagem são claramente a melhor alternativa para o tratamento de WEEE ricos em plástico.

Bigum, M. *et al.* (2017) avaliaram, com o uso da LCA, os impactos ambientais da incineração de descarte de WEEE. Afirmam que as principais categorias de impacto ambiental (com valores normalizados) são as de toxicidade (devido ao mercúrio de lâmpadas e baterias) e depleção abiótica de recursos. Assim como, informam que a incineração gera impactos ambientais negativos em diferentes categorias de impacto, embora os diversos tipos de resíduos

eletrônicos estudados (lâmpadas, CRT, baterias, cartuchos de tinta e cabos) possam contribuir com a economia de recursos (recuperação de energia e substituição da produção primária de ferro e alumínio) trazendo benefícios para a categoria de impacto aquecimento global. A incineração demonstrou benefícios nas categorias depleção de ozônio, acidificação de água doce e depleção de recursos abióticos (fóssil) e estão relacionadas à economia de energia, que é gerada com a incineração. Por outro lado, apresentam-se impactos negativos devido à categoria de impacto de formação fotoquímica oxidante. Adicionalmente, afirma-se que cabos e cartuchos de tinta podem gerar benefícios porque têm grande capacidade calorífica. A presença de mercúrio e cromo impactam negativamente nas categorias toxicidade humana. Em relação à eutrofização terrestre, a incineração de lâmpadas e cabos tem a maior contribuição, devido à presença de cobre, ao mesmo tempo que baterias também o contêm e contribuem também para essa categoria de impacto. Por fim, todos os tipos de WEEE estudados implicaram em impactos negativos da depleção de recursos abiótica (fóssil), exceto cartuchos de tinta, devido, por exemplo, à presença de platina (Pt) e cobre.

Xu *et al.* (2016) analisaram ambiental e economicamente as opções de destinação de tubo de raios catódicos nos Estados Unidos, usando as seguintes opções de gerenciamento: aterro de materiais perigosos, aterro municipal, pirometalurgia, reciclagem fechada (a qual considera que o cone do tubo de vidro é também enviado à reciclagem) e hidrometalurgia. Os autores concluíram que o transporte tem papel principal, tanto ambiental quanto economicamente – aumentando a emissão de gases do efeito estufa e reduzindo as receitas. Assim como a reciclagem do cone do tubo de vidro corresponde ao menor impacto negativo em saúde humana e aquecimento global, seguido de pirometalurgia e hidrometalurgia. Da mesma forma, afirmam que as opções de aterro (tanto de produtos perigosos quanto municipal) causam maiores impactos negativos nas categorias de impacto analisadas. Verifica-se que, no quesito econômico, as melhores alternativas seriam hidro e pirometalurgia, em detrimento da reciclagem, uma vez que nos Estados Unidos a tecnologia de CRT já está obsoleta.

Alcántara-Concepción, Gavilán-García e Gavilán-García (2016) analisaram os impactos ambientais do fim de vida de computadores no México, comparando a taxa de 10% de reciclagem com taxas de 0%, 25% e 35%, assim como a eliminação em lixões. Verificaram substancial benefício com a taxa de reciclagem de 35% e eliminação dos lixões. Por outro lado, a prática de aterros sanitários e queima de materiais (tal como plásticos) pode trazer impactos negativos como mudanças climáticas e efeitos tóxicos para a saúde e o ambiente natural. O uso de materiais reciclados, ao invés de materiais virgens, pode trazer como benefícios a redução de até 10 vezes os impactos no aquecimento global e 3 vezes a toxicidade humana. Durante a

análise das taxas de reciclagem, com relação ao aquecimento global, verificou-se que quanto maiores as taxas de reciclagem menores eram os benefícios, quando comparado ao uso de materiais virgens.

Noon, Lee e Cooper (2011) analisaram o ciclo de vida para o gerenciamento do fim de vida de monitores na região metropolitana de Seattle, Estados Unidos. Como opções de destinação avaliaram: reuso, reciclagem, aterro sanitário e aterro de materiais perigosos. Verificaram duas situações: (a) disposição de um único monitor de CRT (tubo) contra um de LCD (tela plana) e (b) expectativa de mudança na disposição de monitores entre 2008 e 2010 em dois cenários, um em que há geração de créditos pelos materiais recuperados da reciclagem (quando se evita a produção de materiais primários) e outro em que não há créditos por isso. Concluiu-se que há redução no consumo de energia e no aquecimento global quando se evita a produção de matéria-prima. E que a disposição de monitores de LCD teve menores impactos do que os monitores de CRT em todas as categorias de impacto (potencial de aquecimento global, consumo de energia, gerenciamento de mercúrio e chumbo, consumo de combustível fóssil e poluentes no ar), exceto, no quesito mercúrio (devido à mudança de tecnologia entre dos tipos de equipamentos). No caso de mudança na disposição de monitores, houve diminuição no aquecimento global, total de energia consumida, consumo de combustíveis fósseis e redução de poluentes no ar no sistema em que há créditos gerados. Os autores esperam que, com a redução de monitores de CRT e o incremento de LCD, o gerenciamento sobre cobre (presente nos tubos de CRT) diminua e que a preocupação sobre o mercúrio aumente (presente nas telas de LCD).

Bian *et al.* (2016) realizaram uma LCA da reciclagem de celulares na China. Afirmam que a reciclagem de placas de circuito impresso, metais e baterias de lítio trazem benefícios ambientais – evitando a produção de novas matérias-primas e diminuição da poluição ambiental, gerando benefícios nas categorias de impacto: acidificação e nitrificação, efeitos carcinogênicos, mudanças climáticas, ecotoxicidade, uso de combustíveis fósseis, inorgânicos respiratórios e minerais, e impactos negativos nas outras categorias. Fizeram três cenários para avaliar essa reciclagem: um primeiro cenário, com atenção principal à carcaça e à placa de circuito impresso, enquanto o restante vai para o aterro (situação de reciclagem que ocorre no mundo em geral); um segundo cenário, com reciclagem mecânica, que inclui a retirada inicial da bateria – que é reciclada separadamente – com a fragmentação do resíduo restante como um todo, resultando em uma mistura de materiais metálicos e não metálicos que será posteriormente classificada e disposta em aterro (usado em países desenvolvidos); e um terceiro cenário, com a desmontagem manual com reciclagem modularizada (tipo de reciclagem que separada

carcaça, bateria, tela de LCD, e placa de circuito impresso) – o que seria uma integração dos dois cenários anteriores – com o adicional tratamento das telas de LCD dos telefones. Com a LCA concluíram que: no cenário 1, os maiores benefícios vieram da categoria recursos, pela grande recuperação de metais (cobre, por exemplo), ferro, e plásticos, seguido de efeitos carcinogênicos e ecotoxicidade. Por outro lado, os impactos negativos ficaram por conta dos efeitos respiratórios, mudanças climáticas, uso de combustíveis fósseis, acidificação e nitrificação, durante o processo de tratamento; no cenário 2, os benefícios ocorrem da reciclagem de baterias e refinação de metais preciosos (beneficiando as categorias de saúde humana e recursos, recursos minerais, inorgânicos respiráveis, efeitos carcinogênicos e ecotoxicidade) e que os impactos negativos ficam por conta do pré-tratamento das carcaças (qualidade do ecossistema e saúde humana – mudanças climáticas, acidificação e nitrificação); no cenário 3, demonstra impactos negativos da incineração das telas de LCD, o que causa os efeitos negativos da qualidade de ecossistema. Concluiu-se que os maiores benefícios são provenientes da reciclagem de baterias, nas categorias recursos e saúde humana, similares as do cenário 2. Assim como a desmontagem manual juntamente com a reciclagem modulada (separada) devem ser os sistemas de reciclagem a ser adotados.

Foelster *et al.* (2016) verificaram a eficiência energética da reciclagem de eletrônicos, tendo como estudo de caso a reciclagem de refrigeradores no Brasil. Utilizando a LCA, fizeram a análise de impacto ambiental dessa reciclagem, verificando as vantagens ambientais quando se compara com a produção de recursos. Concluíram que há uma redução de 720 kg de CO₂ – equivalentes na reciclagem por unidade de um refrigerador médio. Assim como, pode-se ter um ganho de redução de consumo de energia primária – por volta de 1.5 GJ por unidade.

Amato, Rocchetti e Beolchini (2017) realizaram a análise de impacto ambiental de fim de vida de estratégias de gerenciamento de LCD. Afirmam que, além da tradicional reciclagem, com recuperação de plástico, vidro, e metais, pode-se também usar tratamentos inovadores. Observou-se que a inclusão de recirculação de água no processo, como forma de obter inovação sustentável no processo de recuperação, proporciona um decréscimo de 35% em relação à categoria de impacto aquecimento global. Assim, avaliou-se a destinação desse tipo de componente em áreas de aterro sanitário (cenário 1), incineração (cenário 2), tratamento tradicional de reciclagem (cenário 3) e processos inovativos (cenário 4), como recuperação do metal índio. E concluiu-se que a reciclagem tradicional obteve o melhor cenário em termos ambientais, apesar de haver impactos negativos em categorias tais como aquecimento global e acidificação. Por não ter recuperação de materiais, o cenário 1 teve o pior desempenho em mudanças climáticas e o cenário 2 em acidificação. Concluiu-se que o melhor cenário é a atual

tecnologia de reciclagem, uma vez que há que se fazer um pré-tratamento de LCD para melhor concentração para recuperação do metal índio.

Yu *et al.* (2014) analisaram o fim de vida de baterias recarregáveis de Li-íon e Ni-MH (níquel-hidreto metálico – tipo de bateria usada em pilhas recarregáveis, celulares, câmeras digitais e *laptops* antigos) baseados em LCA. Os autores fizeram a análise de ciclos (de carregamento/descarregamento), ciclo de uso de carregamento e estágios do tratamento de baterias recarregáveis. E concluíram que o número mínimo de ciclos para diminuir os impactos ambientais negativos é de 200 ciclos (ou seja, deve-se ter atenção para fabricação de baterias com ciclos maiores de recarga que isso), assim como, o uso de baterias de maior sobrevida, as de maior densidade, têm menores impactos negativos sendo, portanto, uma tecnologia a ser perseguida. Além disso, verificaram que a reciclagem é o caminho mais promissor para diminuir os impactos ambientais negativos (utilizaram como categorias de impacto: carcinogênicos, orgânicos respiráveis, inorgânicos respiráveis, mudanças climáticas, radiação, camada de ozônio, ecotoxicidade, eutrofização, uso da terra, minerais e combustíveis fósseis) de baterias recarregáveis. Ao passo que incineração deveria ser evitada pelos formadores de políticas públicas.

Rocchetti e Beolchini (2014) analisaram os impactos ambientais do gerenciamento do fim de vida de tubos de raios catódicos (CRT). Demonstrando cenários de destinação como se segue:

- Cenário 0: envio de resíduos para aterro de resíduos perigosos;
- Cenário 1 (chamado de tecnologia de CRT): reciclagem dos CRT (tubo e painel de vidro, ferro) para fabricação de novos tubos e disposição de outras partes;
- Cenário 2 (chamado de tecnologia de tela plana): reciclagem de componentes de CRT para propósitos diferentes (reciclagem de ferro e do painel de vidro) e, por fim,
- Cenário 3 com a adicional reciclagem do tubo de vidro, recuperação de chumbo e vidro.

Os autores (ROCCHETTI; BEOLCHINI, 2014) concluíram que a reciclagem traz benefícios recuperando materiais e gerando matérias-primas secundárias. Assim como, a reciclagem de CRT é benéfica devido à separação de chumbo do tubo de vidro, da mesma forma que a reciclagem de vidro é preferível quando comparada ao envio de materiais para aterros de produtos perigosos. E que na reciclagem de componentes ou materiais (como ferro, vidro e chumbo) para outros fins (considerando que as qualidades dos materiais secundários são iguais

às da matéria prima), verifica-se benefícios no aquecimento global e evita-se a produção de materiais primários. Os autores informam que a destinação em aterro de materiais perigosos é a pior situação, por se ter apenas impactos negativos nas categorias de impacto depleção abiótica, acidificação, eutrofização, depleção da camada de ozônio, criação fotoquímica de ozônio e toxicidade humana. No sistema de reciclagem de CRT (cenário 1), as categorias eutrofização e depleção da camada de ozônio são os maiores benefícios e, por outro lado, os impactos negativos estão associados com o consumo de energia e disposição de algumas partes do fim de vida de CRT em aterros. Como um todo, a categoria de impacto mais significativa foi aquecimento global, tanto como impactante (no caso dos aterros), quanto nos cenários 1, 2 e 3, mas de forma benéfica, nesses casos.

Em Bruxelas, Gonda e Degrez (2018) realizaram a comparação ambiental de duas cadeias de tratamento de fim de vida de computadores: uma gerenciada por associação responsável pela coleta obrigatória em nome dos fabricantes e outra realizada por entidades de integração social que priorizam o reuso e profunda desmontagem manual. Essa segunda tem mais vantagens ambientais devido ao reuso de computadores e à maior taxa de recuperação de materiais, devido à extensa desmontagem manual. Os autores concluíram que as categorias de impacto toxicidade humana, aquecimento global, acidificação e eutrofização trouxeram benefícios devido aos créditos gerados de se evitar a produção de materiais recuperados e reuso de computadores.

Compagno *et al.* (2014) realizaram a LCA do processo de recuperação de chumbo de tubos de raios catódicos (CRT). Foram estudados dois sistemas de tratamento, o primeiro é o tratamento de CRT (desmontagem, separação pelo corte da tela com o tubo, incineração e aterro) e um outro sistema com extensão de tratamento (incluindo moagem, tratamento químico e tratamento eletrônico), objetivando recuperação de matéria-prima. Esse segundo foi considerado a melhor alternativa tecnológica para o tratamento de CRT e a melhor solução ecológica para produção de chumbo, uma vez que recuperação de chumbo e silicato de sódio. Mesmo tendo impactos ambientais negativos com o tratamento estendido, esse tratamento ainda é mais benéfico ambientalmente do que o envio para aterro. Os autores afirmam que a recuperação de chumbo e silicato de sódio, apesar de trazerem impactos negativos, ainda é a melhor alternativa que o seu envio para aterros sanitários. Isso porque evita-se a produção de matérias primas (primárias). Assim, a categoria de impacto mais significativa foi aquecimento global devido ao consumo de energia no processo de tratamento.

Boyden, Soo e Doolan (2016) verificaram os impactos ambientais de diferentes processos na reciclagem de baterias íon lítio portáteis (hidrometalurgia, pirometalurgia e

combinações). E verificaram que, quando comparado com o envio desses equipamentos para aterro sanitário, a reciclagem reduz o consumo de energia, reduz as emissões de gases do efeito estufa além de apresentar uma grande economia em recursos naturais. Assim, o estudo mostrou que as categorias que mais contribuíram para os impactos foram a geração de eletricidade, incineração de plásticos e resíduos enviados para o aterro. Como resultado, os autores verificaram que cobre, níquel e cobalto são os mais valiosos materiais recuperados da reciclagem e que, na média, hidrometalurgia é o processo que mais recupera materiais. A LCA mostrou que os maiores impactos da pirometalurgia, são aquecimento global, geração de energia, toxicidade humana e ecotoxicidade terrestre. Por outro lado, para o processo de hidrometalurgia as principais categorias impactadas foram o aquecimento global, ecotoxicidade terrestre e geração de energia. Assim, hidro metalurgia supera piro metalurgia no que se trata de impactos negativos, assim como, aterro sanitário com a categoria de impacto aquecimento global e toxicidade. Também se verificou que o transporte de baterias para tratamento mostrou-se mais significativo para o aquecimento global e toxicidade humana.

Dessa maneira, verifica-se que, com o uso da LCA, dentre os estudos selecionados, o tratamento por reciclagem evita o consumo de energia (BIGUM. *et al.*, 2017; BOYDEN; SOO; DOOLAN, 2016; FOELSTER *et al.*, 2016; HONG *et al.*, 2015; IKHLAYEL, 2017; NOON; LEE; COOPER, 2011; SONG, QINGBIN; WANG; LI; ZENG, 2013), ao passo que o tratamento de metais e materiais evita a produção de materiais primários (ALCÁNTARA-CONCEPCIÓN; GAVILÁN-GARCÍA; GAVILÁN-GARCÍA, 2016; BIAN *et al.*, 2016; BOYDEN; SOO; DOOLAN, 2016; COMPAGNO *et al.*, 2014; FIORE *et al.*, 2019; GONDA; DEGREGZ, 2018; IKHLAYEL, 2017; NOON; LEE; COOPER, 2011; ROCCHETTI *et al.*, 2013; ROCCHETTI; BEOLCHINI, 2014; SONG, QINGBIN *et al.*, 2015; SONG, QINGBIN; WANG; LI; ZENG, 2013; XU *et al.*, 2016). Por outro lado, alguns estudos concluem que o maior consumo de energia está relacionado ao processo de tratamento (SONG, QINGBIN; WANG; LI; ZENG, 2013; SONG, QINGBIN; WANG; LI, 2013).

Outros trabalhos demonstram que o reuso de equipamentos (ou partes deles) trazem benefícios nas categorias de impacto estudadas, em comparação aos processos de tratamento. (GONDA; DEGREGZ, 2018; LU, BIN *et al.*, 2017; SONG, QINGBIN; WANG; LI, 2013) e que isso deveria ser perseguido.

Verifica-se que alguns autores estudaram apenas o tipo de caracterização *endponit* com impactos positivos, no caso de: Song, Wang e Li (2013), ao passo que outros estudaram apenas gases do efeito estufa, com impactos negativos (UNGER *et al.*, 2017). Alguns estudaram as categorias de impacto e as elencaram apenas como o viés de benefícios (FOELSTER *et al.*,

2016; GONDA; DEGREZ, 2018; HONG *et al.*, 2015; NOON; LEE; COOPER, 2011; SONG, QINGBIN *et al.*, 2015), outros ressaltaram apenas os impactos negativos (BOYDEN; SOO; DOOLAN, 2016; COMPAGNO *et al.*, 2014; ROCCHETTI *et al.*, 2013; RUBIN *et al.*, 2014; WAGER; HISCHIER, 2015; XU *et al.*, 2016; ZINK *et al.*, 2014), assim como os que mostraram os dois lados (ALCÁNTARA-CONCEPCIÓN; GAVILÁN-GARCÍA; GAVILÁN-GARCÍA, 2016; AMATO; ROCCHETTI; BEOLCHINI, 2017; BIAN *et al.*, 2016; BIGUM, M. *et al.*, 2017; FIORE *et al.*, 2019; IKHLAYEL, 2017; LU, BIN *et al.*, 2017; ROCCHETTI; BEOLCHINI, 2014; SONG, QINGBIN; WANG; LI; ZENG, 2013).

5.2 Categorias de impactos mais relevantes a partir dos estudos selecionados

Ao analisar os artigos selecionados, nota-se que há como se elencar as categorias de impactos mais estudadas pelos autores, assim como aquelas que os próprios trabalhos indicaram como as mais importantes para o processo de análise que foi realizado pelos autores estudados. Assim, abaixo mostra-se quais foram essas categorias de impacto que tiveram destaque (as mais estudadas e as mais significativas).

Para essas verificações, foram consideradas as categorias de impacto que apareceram em mais de 11 vezes, que é a média aproximada da contagem das categorias de impacto consideradas pelos autores.

A Figura 3 apresenta as categorias de impacto mais estudadas nos artigos selecionados. A contagem foi feita considerando as categorias que os autores consideraram tanto com impactos positivos quanto nos negativos.

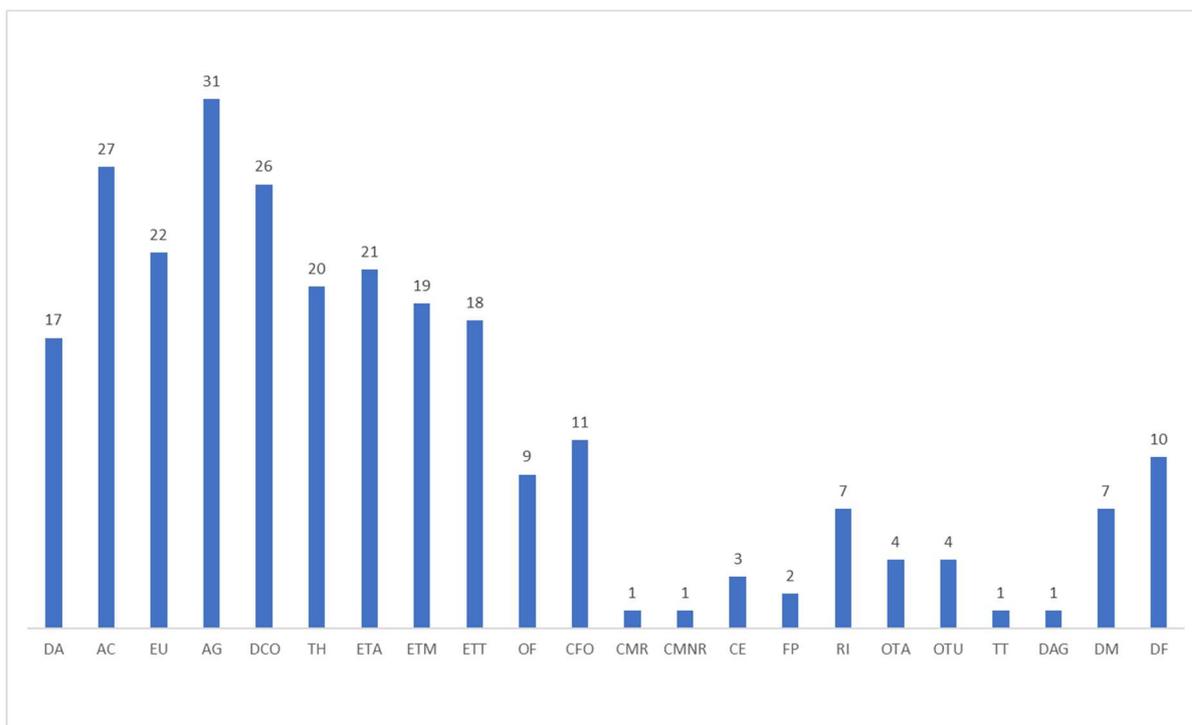


Figura 3 – Número de categorias de impacto mais estudadas dentre os 24 artigos avaliados.

Depleção Abiótica (DA), Acidificação (AC), Eutrofização (EU), Aquecimento Global (AG), Depleção da Camada de Ozônio (DCO), Toxicidade Humana (TH), Ecotoxicidade de Água doce (ETA), Ecotoxicidade Marinha (ETM), Ecotoxicidade Terrestre (ETT), Oxidação Fotoquímica (OF), Criação Fotoquímica de Ozônio (CFO), Consumo de Materiais Renováveis (CMR), Consumo de Materiais Não Renováveis (CMNR), Consumo de Energia (CE), Mudanças Climáticas (MC), Formação de Partícula (FP), Radiação Ionizante (RI), Ocupação da Terra para Agricultura (OTA), Ocupação da Terra Urbana (OTU), Transformação da Terra (TT)

Verifica-se que as categorias mais estudadas foram: depleção abiótica, acidificação, eutrofização, aquecimento global, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade marinha, e ecotoxicidade terrestre. Essas categorias, portanto, são consideradas, para fins do presente trabalho, as categorias mais estudadas nos artigos selecionados.

Se uma categoria de impacto (aquecimento global) aparecesse em todos os 24 artigos e em ambos os impactos (positivos e negativos) ela seria contada duas vezes por artigo e computada, no máximo, 48 vezes no total (24 vezes para benefícios positivos e 24 para impactos negativos), uma para cada artigo selecionado, totalizando 48 contagens), ou seja, esse é o número máximo possível para contagem de uma categoria de impacto. Isso acontece, por exemplo, com as categorias de impacto AC (acidificação) com 27 contagens, AG (aquecimento global) com 30 repetições, e DCO (depleção da camada de ozônio) com 26 aparições, isso ocorre porque essas categorias de impacto, por vezes, estão relacionadas a impactos negativos (devido aos processos de tratamento, por exemplo), em alguns casos, também aparecem relacionadas a benefícios (por evitarem o consumo de materiais, por exemplo) em outros casos.

No mesmo sentido, agora considerando as categorias de impacto em que os autores consideraram como mais relevantes dentro dos seus estudos tem-se as categorias mais importantes.

A Figura 4 mostra as categorias de impacto mais significativas, considerando as quatro categorias em que os autores indicaram como aquelas mais significativas (considerando como critério, as quatro categorias mais indicadas e acima da média de 11 contagens) seriam as categorias de impacto **aquecimento global, acidificação, toxicidade humana e eutrofização**. Em ordem da mais importante para a menos importante.

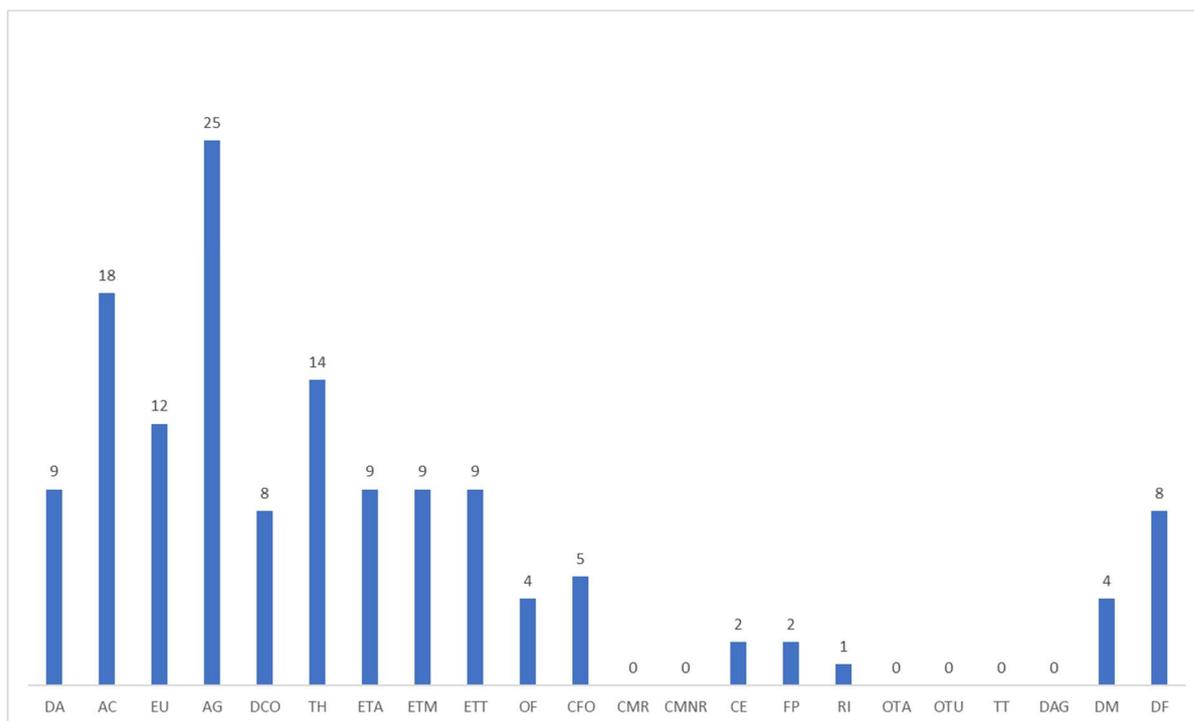


Figura 4 – Número de categorias de impacto mais significativas dentre os 24 artigos avaliados.

Depleção Abiótica (DA), Acidificação (AC), Eutrofização (EU), Aquecimento Global (AG), Depleção da Camada de Ozônio (DCO), Toxicidade Humana (TH), Ecotoxicidade de Água doce (ETA), Ecotoxicidade Marinha (ETM), Ecotoxicidade Terrestre (ETT), Oxidação Fotoquímica (OF), Criação Fotoquímica de Ozônio (CFO), Consumo de Materiais Renováveis (CMR), Consumo de Materiais Não Renováveis (CMNR), Consumo de Energia (CE), Mudanças Climáticas (MC), Formação de Partícula (FP), Radiação Ionizante (RI), Ocupação da Terra para Agricultura (OTA), Ocupação da Terra Urbana (OTU), Transformação da Terra (TT)

Objetivando identificar em quais locais do globo o assunto de LCA de WEEE é mais estudado fez-se um levantamento por regiões. No presente trabalho, considerando os 24 artigos selecionados, 9 foram da Europa, 8 da Ásia, 4 da América do Norte, 2 na América do Sul e 1 na Oceania, como demonstrado na Figura 5. Xue e Xu (2017) salientam que os estudos de LCA são mais executados na Europa, seguido pela Ásia e, por fim, pela América do Norte, ratificando-se o resultado encontrado na presente dissertação.

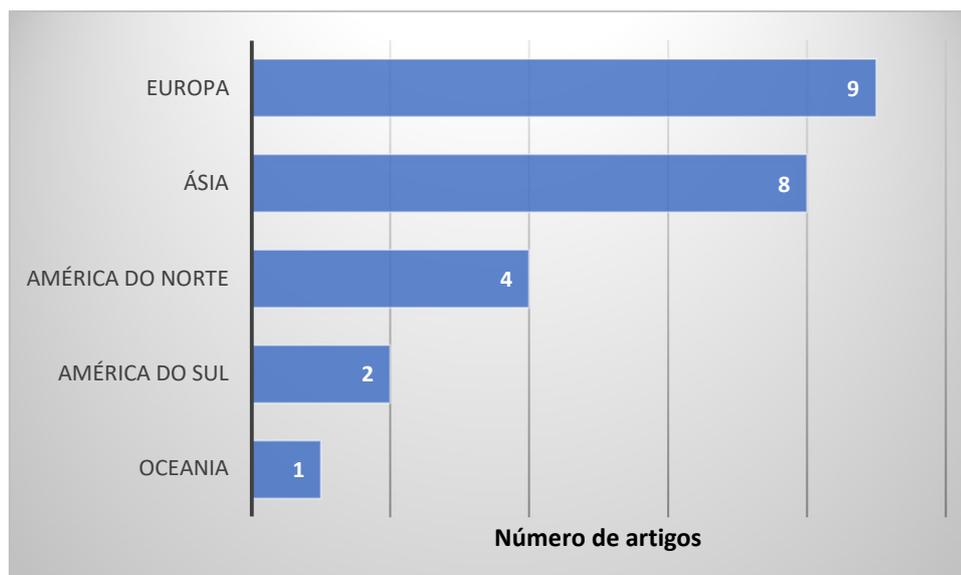


Figura 5 – Número de artigos de LCA sobre WEEE por região dentre os 24 artigos selecionados.

Apesar dos autores selecionados sempre indicarem em seus trabalhos quais foram as destinações estudadas (recuperação, reuso, reciclagem, reaproveitamento, aterro, incineração, entre outros) alguns não identificam claramente quais as categorias de impacto estão diretamente relacionadas a cada tipo de destinação, indicando as categorias de forma geral e quais eram as mais importantes para os seus processos de análise. Dessa forma, considerou-se que as categorias de impacto mais estudadas e mais significativas podem ser levadas em consideração como critérios de gerenciamento ambiental para a LCA de WEEE, provenientes dessas destinações estudadas.

A Tabela 3 mostra, por autor, entre os estudos selecionados, quais foram as destinações estudadas. Verifica-se que a reciclagem tem grande atenção por parte desses autores, seguida de incineração e aterro sanitário (nesse último caso inserem-se lixões como parte da análise). Em menor grau, seguem-se estudos relativos à recuperação de metais, reuso, recuperação do equipamento e conserto do equipamento.

Tabela 4 – Destinações dos WEEE estudadas nos 24 artigos seleccionados.

Destinação estudada Autor	Reciclagem	Recuperação de metais	Reuso	Incineração	Aterro sanitário	Recuperação do equipamento	Conserto do equipamento
(SONG, WANG, LI E ZENG, 2013)	x						
(ROCCHETTI, VEGLIÒ, KOPACEK E BEOLCHINI, 2013)		x					
(SONG, WANG E LI, 2013)	x		x	x			
(SONG, ZENG, LI E DUAN, 2015)	x						
(IKHLAYEL, 2017)	x			x	x		
(RUBIN, DE CASTRO, BRANDÃO, SCHALCH E OMETTO, 2014)		x					
(HONG, SHI, WANG, CHEN E LI, 2015)	x			x	x		
(ZINK, MAKER, GEYER AMIRTHARAHAH E AKELLA, 2014)						x	x

Destinação estudada Autor	Reciclagem	Recuperação de metais	Reuso	Incineração	Aterro sanitário	Recuperação do equipamento	Conserto do equipamento
(FIORE, IBANESCU, TEODOSIU E RONCO, 2019)	x			x	x		
(UNGER, BEIGL, HÖGGERL E SALHOFER, 2017)	X			X	X		
(LU, SONG, J. YANG E D. YANG 2017)	X		X				
(WAGER E HISCHIER 2015)	X			X			
(BIGUM, DAMGAARD, SCHEUTZ E CHRISTENSEN 2017)				X			
(XU, YU, KENDALL, HE, LI, E SHOENUNG, 2016)	X	x			X		
(ALCÁNTARA-CONCEPCIÓN, A. GAVILÁN-GARCÍA E C. GAVILÁN-GARCÍA 2016)	x						
(NOON, LEE E COOPER 2011)	x		x		x		

Destinação estudada Autor	Reciclagem	Recuperação de metais	Reuso	Incineração	Aterro sanitário	Recuperação do equipamento	Conserto do equipamento
(BIAN, BAI, LI, YIN E XU, 2016)	x						
(FOELSTER, ANDREW, KROEGER, BOHR, DETTMER, BOEHME, E HERRMANN, 2016)	x						
(AMATO, ROCCHETTI E BEOLCHINI, 2017)	x			x	x		
(YU, CHEN, HUANG, X. WANG E D. WANG, 2014)	x			x			
(ROCCHETTI E BEOLCHINI, 2014)	x						
(GONDA E DEGREGZ 2018)	x		x				
(COMPAGNO, INGRAO, LATORA E TRAPANI, 2014)	x				x		
(BOYDEN, SOO E DOOLAN 2016)	x				x		
N.º de vezes estudado	20	3	4	9	9	1	1

5.3 Metodologias de avaliação de impacto do ciclo de vida a partir dos estudos selecionados

Nos estudos de LCA, verifica-se que a etapa de análise de impacto do ciclo de vida é uma etapa importante, são vários os métodos disponíveis para isso.

Verifica-se que a seleção das categorias de impacto se encontra na fase de classificação das emissões. Assim, separam-se quais atividades/produtos/processos são os responsáveis por cada impacto negativo e/ou benefício ambiental, relacionados às categorias de impacto selecionada.

Não cabe, no presente trabalho, reproduzir quais são as formas de cálculo de cada indicador (categoria de impacto) uma vez que elas estão estabelecidas em cada metodologia, uma vez que cada método tem abrangência e categorias de impacto próprias (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015). Entretanto, de acordo com esses mesmos autores, tem-se disponíveis os seguintes métodos para se realizar a Avaliação de Impacto de Análise do Ciclo de Vida (*Life cycle impact assessment - LCIA*): CML, Eco-Indicator 99, Ecological Scarcity, EDIP, EPS 2000, Impact 2002+, LIME, LUCAS, MEEuP, ReCiPe, TRACI, USEtox, IMPACT World+.

Nos autores selecionados no presente trabalho nota-se a seguinte utilização desses métodos. A Figura 6 mostra que o método CML apareceu 11 (onze) vezes (ALCÁNTARA-CONCEPCIÓN; GAVILÁN-GARCÍA; GAVILÁN-GARCÍA, 2016; BIGUM, M. *et al.*, 2017; BOYDEN; SOO; DOOLAN, 2016; FIORE *et al.*, 2019; GONDA; DEGREGZ, 2018; IKHLAYEL, 2017; ROCCHETTI *et al.*, 2013; ROCCHETTI; BEOLCHINI, 2014; SONG, QINGBIN *et al.*, 2015; SONG, QINGBIN; WANG; LI; ZENG, 2013; XU *et al.*, 2016), sendo o mais utilizado dentre os estudos selecionados, Eco Indicator 99 foi utilizado 03 (três) vezes (BIAN *et al.*, 2016; LU, BIN *et al.*, 2017; YU *et al.*, 2014), seguido de ReCiPe, 02 (duas) (HONG *et al.*, 2015; WAGER; HISCHIER, 2015) e, por fim, com apenas uma aparição, os métodos EDIP (RUBIN *et al.*, 2014), IMPACT 2002+ (COMPAGNO *et al.*, 2014). Enquanto em 06 (seis) estudos (AMATO; ROCCHETTI; BEOLCHINI, 2017; FOELSTER *et al.*, 2016; NOON; LEE; COOPER, 2011; SONG, QINGBIN; WANG; LI, 2013; UNGER *et al.*, 2017; ZINK *et al.*, 2014), os autores não explicitaram em seu texto qual foi a metodologia da LCIA utilizada para chegarem às suas conclusões.

Nota-se que, Song, Qingbin, Wang e Li (2013) por usarem *endpoint*, não apresentaram no seu estudo a metodologia de impactos para a avaliação. Ao passo que outros autores não indicaram explicitamente, nos seus estudos, a respectiva metodologia para essa avaliação de

impactos (FOELSTER *et al.*, 2016; NOON; LEE; COOPER, 2011; UNGER *et al.*, 2017; ZINK *et al.*, 2014)

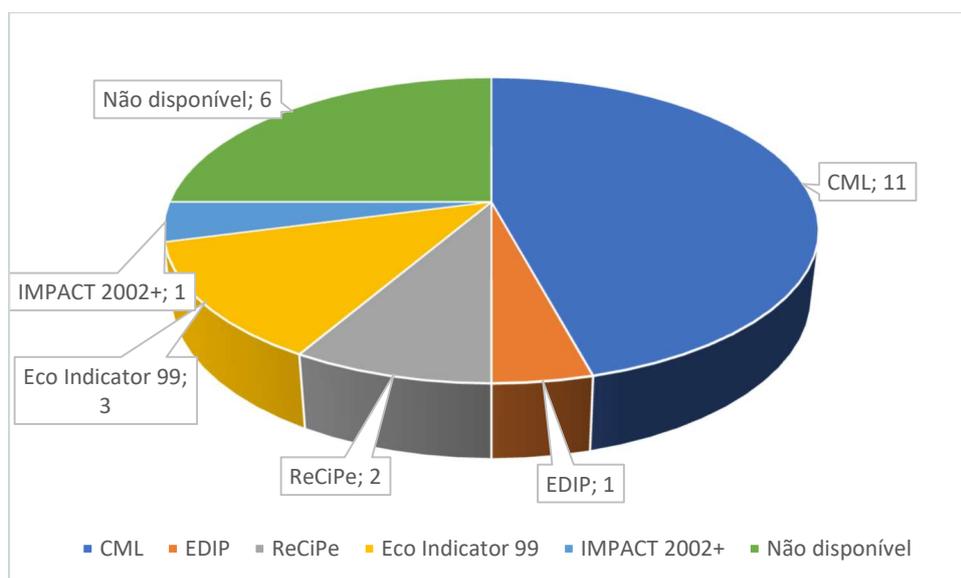


Figura 6- Número de artigos por metodologias de LCIA estudadas nos 24 artigos selecionados.

A normalização é uma etapa opcional na LCA e relaciona a uma referência comum as diferentes categorias de impacto analisadas, por exemplo, os impactos causados por uma pessoa durante um ano (referência comum) objetivando facilitar as comparações entre as categorias de impacto (EUROPEAN COMMISSION, 2010).

Dessa forma, foram normalizados 14 (quatorze) estudos selecionados (BIAN *et al.*, 2016; BIGUM, M. *et al.*, 2017; BOYDEN; SOO; DOOLAN, 2016; COMPAGNO *et al.*, 2014; FIORE *et al.*, 2019; HONG *et al.*, 2015; IKHLAYEL, 2017; ROCCHETTI *et al.*, 2013; ROCCHETTI; BEOLCHINI, 2014; RUBIN *et al.*, 2014; SONG, QINGBIN *et al.*, 2015; SONG, QINGBIN; WANG; LI; ZENG, 2013; SONG, QINGBIN; WANG; LI, 2013; WAGER; HISCHIER, 2015), enquanto que outros 10 (dez) não foram (ALCÁNTARA-CONCEPCIÓN; GAVILÁN-GARCÍA; GAVILÁN-GARCÍA, 2016; AMATO; ROCCHETTI; BEOLCHINI, 2017; FOELSTER *et al.*, 2016; GONDA; DEGREGZ, 2018; LU, BIN *et al.*, 2017; NOON; LEE; COOPER, 2011; UNGER *et al.*, 2017; XU *et al.*, 2016; YU *et al.*, 2014; ZINK *et al.*, 2014).

Os autores apresentam seus resultados (indicadores/categorias de impacto) em forma gráficos e tabelas, às vezes mostrando-os de forma resumida, não revelando a origem e/ou forma de cálculo desses indicadores, como acontece no estudo de Song, Qingbin, Wang, Li e Zeng (2013). Nesse caso, os autores listam os seus resultados, por exemplo, indicando quais foram os indicadores/categorias de impacto mais significativos no seu estudo.

6 Conclusões

Para avaliação do gerenciamento ambiental de WEEE com o uso da LCA, tomando como critérios as principais categorias de impacto, nota-se que não houve artigo anterior com essa preocupação. Verificou-se, entretanto, que alguns autores utilizam LCA para suas análises ambientais, entretanto, estão preocupados com o gerenciamento de forma mais ampla, levando, por vezes, critérios econômicos e/ou sociais em consideração.

Esta Dissertação teve como objetivo sugerir que a avaliação de gerenciamento ambiental de WEEE fosse feita com categorias de impacto mais significativas, com base em LCA. Dessa forma, conclui-se que, da busca feita em bases importantes de publicação (Capes, Scopus, *Web of Science*, por exemplo), não se verificou estudo anterior que teve esse mesmo objetivo. Indicando que essa seria uma oportunidade de estudo, o que foi realizado no presente trabalho.

Após rigorosa seleção (como demonstrado na metodologia) – que consistiu em verificar quais trabalhos realizaram a LCA de WEEE pela norma ABNT NBR ISO 14.040 (2014), se eram LCA de WEEE, estavam compreendidos no período entre 2009 e 2019, tratavam de produto completo ou partes de WEEE e que continham o fim de vida de WEEE em suas destinações, dos 749 artigos encontrados através de pesquisa bibliográfica, elencou-se, com base nesses critérios, 24 artigos para a seleção das categorias de impacto mais estudadas e mais significativas. A identificação dessas categorias levou em consideração tanto os impactos positivos quanto os negativos que os próprios autores revelaram relevantes em seus estudos. Conclui-se também que a maior parte dos estudos realizados foi na Europa e na Ásia. Com base nesses artigos também se verificou quais eram as destinações que foram estudadas por eles e nota-se que grande parte dos autores estudou a reciclagem, seguida da incineração e aterros, indicando que a reciclagem deve ser perseguida nos processos de tratamento de WEEE.

As categorias estudadas por esses autores foram: Depleção Abiótica (DA), Acidificação (AC), Eutrofização (EU), Aquecimento Global (AG), Depleção da Camada de Ozônio (DCO), Toxicidade Humana (TH), Ecotoxicidade de Água doce (ETA), Ecotoxicidade Marinha (ETM), Ecotoxicidade Terrestre (ETT), Oxidação Fotoquímica (OF), Criação Fotoquímica de Ozônio (CFO), Consumo de Materiais Renováveis (CMR), Consumo de Materiais Não Renováveis (CMNR), Consumo de Energia (CE), Formação de Partícula (FP), Radiação Ionizante (RI), Ocupação da Terra para Agricultura (OTA), Ocupação da Terra Urbana (OTU), Transformação da Terra (TT), Depleção da Água (DAG), Depleção de Metais (DP), Depleção fóssil (DF).

Dessas categorias de impacto, as mais estudadas foram depleção abiótica, acidificação, eutrofização, aquecimento global, depleção da camada de ozônio, toxicidade humana, ecotoxicidade de água doce, ecotoxicidade marinha, e ecotoxicidade terrestre, considerando

uma contagem média de 11 aparições nos estudos analisados e a consideração tanto para benefícios quanto para impactos. E, da mesma forma, as mais significativas foram **aquecimento global, acidificação, toxicidade humana e eutrofização**. Assim, sugere-se que essas quatro categorias de impacto possam ser utilizadas como critérios de avaliação para o gerenciamento ambiental de WEEE em futuros estudos de LCA.

Dos métodos utilizados para a avaliação do ciclo de vida, CML foi o que mais apareceu nos estudos selecionados, demonstrando que essa é uma metodologia que deve ser empregada para a avaliação do gerenciamento de LCA de WEEE.

Como são muitas categorias, sugere-se simplificar a análise de LCA para futuros estudos, verificando quais seriam as mais importantes para os processos com foco principal na reciclagem, tema tratado em quase todos os artigos.

Essas categorias de impacto estão alinhadas a algumas das conclusões que a LCA pode trazer ao considerar as alternativas disponíveis para a destinação de WEEE (reciclagem, incineração e aterro). Por exemplo, a recuperação de metais é benéfica uma vez que reduz o consumo de energia quando da sua produção e traz benefícios na categoria toxicidade humana e aquecimento global, quando deixa de ir para o aterro. Apesar do gasto de energia no processo de reciclagem e tratamento.

7 Sugestões

Sugere-se que a utilização dessas quatro categorias de impacto sejam utilizadas como indicadores do gerenciamento de WEEE nos próximos estudos de LCA de WEEE.

Quando se buscou artigo que correlaciona indicador com WEEE encontrou-se apenas um trabalho – o qual demonstra uma metodologia de cálculo de indicadores para a reciclagem – demonstrando a importância de se estudar esse assunto. Portanto, verificou-se que há apenas esse trabalho em que as palavras-chave “*indicator*” e “*weee*”, aparecem juntas em uma pesquisa. Assim sugere-se que a busca por indicadores pode ocorrer através de bibliografia e por consulta com especialistas da área em estudos futuros (que pode ser feita através de pesquisa Delphi, por exemplo).

Como a maioria dos estudos foram executados na Europa e na Ásia, sugere-se que se aumente o número de estudos nas regiões das Américas, África e Oceania.

O presente estudo, buscou, de forma geral, indicadores (categorias de impacto) para a avaliação do gerenciamento de WEEE, em fase de fim de vida. Outros futuros estudos podem trazer a avaliação independente para cada parte dos WEEE, tais como plásticos, vidro, metais, dentre outros, trazendo em cada variante, os próprios indicadores-chave próprios de cada material. Além disso, pode-se estudar também quais seriam as categorias de impacto para todo

o ciclo de vida dos WEEE, ou em partes selecionadas desse ciclo. Poder-se-ia estudar também, de forma similar, estudar quais seriam as categorias de impacto, mais significativas, por região do planeta.

Outra possibilidade de futuros estudos seria pesquisar e definir quais seriam as categorias de impacto relevantes para a realidade brasileira, de acordo com o Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida.

Um outro estudo possível pode ser a aplicação da metodologia utilizada no presente trabalho, utilizando objetivos semelhantes, de identificação de categorias de impacto mais significativas, do setor da cadeia do audiovisual, uma vez que a indústria lança mão de diversos tipos de equipamentos eletrônicos não convencionais e não usuais.

8 Referências

- ABELIOTIS, K *et al.* Environmental assessment of the recovery of printed circuit boards in Greece. *5th International Conference on Sustainable Solid Waste Management*, p. 1–5, 2017. Disponível em: <http://uest.ntua.gr/athens2017/proceedings/pdfs/Athens2017_Abeliotis_Lasaridi_Chroni_Potouridis.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- ABNT. ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 14040:2009. *Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura*, 2014.
- AHLUWALIA, Poonam Khanijo; NEMA, Arvind K. A life cycle based multi-objective optimization model for the management of computer waste. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 51, n. 4, p. 792–826, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.001>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- ALCÁNTARA-CONCEPCIÓN, Víctor; GAVILÁN-GARCÍA, Arturo; GAVILÁN-GARCÍA, Irma C. Environmental impacts at the end of life of computers and their management alternatives in México. *Journal of Cleaner Production*, v. 131, p. 615–628, 10 set. 2016. Disponível em: <[10.1016/j.jclepro.2016.04.125](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.125)>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- ALSTON, Sue M.; ARNOLD, J. Cris. Environmental impact of pyrolysis of mixed WEEE plastics part 2: Life cycle assessment. *Environmental Science and Technology*, v. 45, n. 21, p. 9386–9392, 2011. Disponível em: <<https://pubs-acsc-org.ez29.periodicos.capes.gov.br/doi/abs/10.1021/es2016654>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- AMATO, Alessia; ROCCHETTI, Laura; BEOLCHINI, Francesca. Environmental impact assessment of different end-of-life LCD management strategies. *Waste Management*, v. 59, p. 432–441, 1 jan. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.024>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- ANDRÆ, Anders S.G.; ANDERSSON, Dag R.; LIU, Johan. Significance of intermediate production processes in life cycle assessment of electronic products assessed using a generic compact model. *Journal of Cleaner Production*, v. 13, n. 13–14, p. 1269–1279, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.05.013>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- ANDREOLA, Fernanda *et al.* Recycling of EOL CRT glass into ceramic glaze formulations and its environmental impact by LCA approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 12, n. 6, p. 448–454, set. 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1065/lca2006.12.289>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- APISITPUVAKUL, Witoon *et al.* LCA of spent fluorescent lamps in Thailand at various rates of recycling. *Journal of Cleaner Production*, v. 16, n. 10, p. 1046–1061, jul. 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652607001564>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- ARDUIN, Rachel Horta *et al.* Life Cycle Assessment of End-of-Life Scenarios: Tablet Case Study. *16th International Waste Management and Landfill Symposium*, p. 10, 2017. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10985/12116>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

- AWASTHI, Abhishek Kumar; LI, Jinhui. Management of electrical and electronic waste: A comparative evaluation of China and India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 76, n. February, p. 434–447, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.067>>.
- BAKRI, Sitty Nur Syafa; SURIF, Salmijah; RAMASAMY, Rajeswari K. A case study of life cycle assessment (LCA) on ballast for fluorescent lamp in Malaysia. 2008, [S.l.: s.n.], 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/4349356_A_case_study_of_life_cycle_assessment_LCA_on_ballast_for_fluorescent_lamp_in_Malaysia>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- BALDE, C P *et al.* The Global E-Waste Monitor 2014. *United Nations University*, p. 1–80, 2015. Disponível em: <<http://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-2014-small.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- BARBA-GUTIÉRREZ, Y.; ADENSO-DÍAZ, B.; HOPP, M. An analysis of some environmental consequences of European electrical and electronic waste regulation. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, n. 3, p. 481–495, jan. 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.06.002>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- BARLETTA, Ilaria *et al.* Towards an assessment methodology to support decision making for sustainable electronic waste management systems: Automatic Sorting Technology. *Sustainability (Switzerland)*, v. 8, n. 1, p. 1–20, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su8010084>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- BELBOOM, S. *et al.* Electrical waste management effects on environment using life cycle assessment methodology: the fridge case study. *SETAC EUROPE 17th LCA Case Study Symposium Sustainable Lifestyles*, p. 1–2, 2011. Disponível em: <http://www.avnir.org/documentation/book/2011/LCAconf_belboom_2011_en.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- BIAN, Jinghong *et al.* Comparative environmental life cycle assessment of waste mobile phone recycling in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 131, p. 209–218, 10 set. 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616305029>>.
- BIENTINESI, M.; PETARCA, L. Comparative environmental analysis of waste brominated plastic thermal treatments. *Waste Management*, v. 29, n. 3, p. 1095–1102, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.004>>.
- BIGANZOLI, L. *et al.* Mass balance and life cycle assessment of the waste electrical and electronic equipment management system implemented in Lombardia Region (Italy). *Science of the Total Environment*, p. 361–375, 5 ago. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.041>>.
- BIGUM, M. *et al.* Environmental impacts and resource losses of incinerating misplaced household special wastes (WEEE, batteries, ink cartridges and cables). *Resources, Conservation and Recycling*, v. 122, p. 251–260, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.013>>.
- BIGUM, Marianne. *Life cycle assessment of the management of special waste types: WEEE and batteries*. 2014. 2014. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/306038814_Life_cycle_assessment_of_the_management_of_special_waste_types_WEEE_and_batteries>. Acesso em: 14 abr. 2019.

BIGUM, Marianne; BROGAARD, Line; CHRISTENSEN, Thomas H. Metal recovery from high-grade WEEE: A life cycle assessment. *Journal of Hazardous Materials*, p. 8–14, 15 mar. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.10.001>>.

BISWAS, Wahidul K *et al.* A comparison of repaired, remanufactured and new compressors used in Western Australian small- and medium-sized enterprises in terms of global warming. *Journal of Remanufacturing*, v. 3, n. 1, p. 4, 25 dez. 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1186/2210-4690-3-4>>.

BOYDEN, Anna; SOO, Vi Kie; DOOLAN, Matthew. The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries. *Procedia CIRP*, v. 48, p. 188–193, 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827116300701>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

BRASIL. Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.*, 2010. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 14 abr. 2019.

BRASIL.; MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. ACORDO SETORIAL PARA IMPLANTAÇÃO DE SISTEMA DE LOGÍSTICA REVERSA DE PRODUTOS ELETROELETRÔNICOS DE USO DOMÉSTICO E SEUS COMPONENTES. 31 out. 2019. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/acordo-20setorial-20-20eletroeletrnicos-pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

CHOI, Byung-Chul *et al.* Life Cycle Assessment of a Personal Computer and its Effective Recycling Rate (7 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 11, n. 2, p. 122–128, 21 mar. 2006. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1065/lca2004.12.196>>.

CHUNG, Sung-Woo; MURAKAMI-SUZUKI, Rie. A Comparative Study of E-waste Recycling Systems in Japan, South Korea and Taiwan from the EPR Perspective: Implications for Developing Countries. In: KOJIMA, MICHIKAZU (Org.). *Promoting 3Rs in Developing Countries: Lessons from the Japanese Experience*. Chiba: Michikazu Kojima ed., 2008. p. 125–145. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1586975/mod_resource/content/4/e-waste%20in%20japan%20korea%20and%20taiwan.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2019.

COMPAGNO, Lucio *et al.* Life cycle assessment of CRT lead recovery process. *International Journal of Product Lifecycle Management*, v. 7, n. 2/3, p. 201, 2014. Disponível em: <<http://www.inderscience.com/link.php?id=65865>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

CUCCHIELLA, Federica *et al.* Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 51, p. 263–272, 25 nov. 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115005808>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

CUI, Jirang; FORSSBERG, Eric. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 99, n. 3, p. 243–263, 30 maio 2003.

Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030438940300061X>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

DODBIBA, Gjergj *et al.* Leaching of indium from obsolete liquid crystal displays: Comparing grinding with electrical disintegration in context of LCA. *Waste Management*, v. 32, n. 10, p. 1937–1944, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.016>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

DODBIBA, Gjergj *et al.* The recycling of plastic wastes from discarded TV sets: comparing energy recovery with mechanical recycling in the context of life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 16, n. 4, p. 458–470, mar. 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652606003465>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

ELECTRONICS TAKE BACK COALITION. Facts and Figures on E-Waste and Recycling. v. 27, p. 255–267, 2014. Disponível em: <http://www.electronicstakeback.com/wp-content/uploads/Facts_and_Figures_on_EWaste_and_Recycling.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2019.

EUROPEAN COMMISSION. ILCD - International Reference Life Cycle Data System. *EUROPEAN COMMISSION*, 2010. Disponível em: <<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ilcd.html>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

FAIST EMMENEGGER, Mireille *et al.* Life Cycle Assessment of the Mobile Communication System UMTS: Towards Eco-efficient Systems (12 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 11, n. 4, p. 265–276, 13 jul. 2006. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1065/lca2004.12.193>>. Acesso em: 13 maio 2019.

FERREIRA, Jhony Fernandes; PACHECO, Elen Beatriz Acordi Vasques; SILVA, Ana Lúcia Nazareth. Uma proposta para identificação de indicadores de sustentabilidade para avaliação do gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos com foco na reciclagem. *Gestão & Gerenciamento*, v. 10, p. 22–29, 2018.

FINNVEDEN, Göran *et al.* Environmental and economic assessment methods for waste management decision-support: possibilities and limitations. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, v. 25, n. 3, p. 263–269, 2 jun. 2007. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X07079156>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

FIORE, Silvia *et al.* Improving waste electric and electronic equipment management at full-scale by using material flow analysis and life cycle assessment. *Science of the Total Environment*, v. 659, p. 928–939, 1 abr. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.417>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

FOELSTER, Anne Sophie *et al.* Electronics recycling as an energy efficiency measure - A Life Cycle Assessment (LCA) study on refrigerator recycling in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 129, p. 30–42, 15 ago. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.126>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

GAMBERINI, Rita *et al.* On the integration of planning and environmental impact assessment for a WEEE transportation network - A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 54, n. 11, p. 937–951, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.02.001>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

GOLEV, Artem *et al.* Where next on e-waste in Australia? *Waste Management*, v. 58, p. 348–358, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.025>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

GONDA, Louise; DEGREGZ, Marc. End-of-life Management of Computers in Brussels: Environmental Comparison of Two Treatment Chains. *Procedia CIRP*, v. 69, p. 968–973, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221282711730865X>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

HIBBERT, Kathleen; OGUNSEITAN, Oladele A. Risks of toxic ash from artisanal mining of discarded cellphones. *Journal of Hazardous Materials*, v. 278, p. 1–7, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.089>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

HISCHIER, R.; WÄGER, P.; GAUGLHOFER, J. Does WEEE recycling make sense from an environmental perspective? The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Environmental Impact Assessment Review*, v. 25, n. 5, p. 525–539, jul. 2005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S019592550500048X>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

HISCHIER, Roland; BAUDIN, Isabelle. LCA study of a plasma television device. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 15, n. 5, p. 428–438, 1 jun. 2010. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-010-0169-2>>.

HONG, Jinglan *et al.* Life cycle assessment of electronic waste treatment. *Waste Management*, v. 38, n. 1, p. 357–365, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.022>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

HORIE, Yuhta Alan. Life Cycle Optimization of Household Refrigerator-Freezer Replacement. *Center for Sustainable Systems*, 2004. Disponível em: <https://css.umich.edu/sites/default/files/css_doc/CSS04-13.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2019.

HORTA ARDUIN, Rachel *et al.* What are the environmental benefits of increasing the WEEE treatment in France? p. 1–4, 2016. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01609075>>.

HSIEH, Hsin-Neng; MEEGODA, Jay N. Sustainable Industrial Design and Waste Management - Cradle-to-Cradle for Sustainable Development. *Journal of Cleaner Production*, v. 17, n. 5, p. 570, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.07.003>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

HUIJBREGTS, Mark A. J. *et al.* ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 22, n. 2, p. 138–147, 12 fev. 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1246-y>>.

IANNICELLI-ZUBIANI, Elena Maria *et al.* Environmental impacts of a hydrometallurgical process for electronic waste treatment: A life cycle assessment case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 140, p. 1204–1216, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.040>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

IBANESCU, Dumitrita *et al.* Assessment of the waste electrical and electronic equipment management systems profile and sustainability in developed and developing European Union countries. *Waste Management*, v. 73, p. 39–53, 1 mar. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X17309674>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

IKHLAYEL, Mahdi. Environmental impacts and benefits of state-of-the-art technologies for E-waste management. *Waste Management*, v. 68, p. 458–474, 1 out. 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X17304798>>. Acesso em: 18 out. 2017.

ISMAIL, Haikal; HANAFIAH, Marlia M. An overview of LCA application in WEEE management: Current practices, progress and challenges. *Journal of Cleaner Production*, v. 232, p. 79–93, 20 set. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619318657>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

ISMAIL, Haikal; HANAFIAH, Marlia M. Management Of End-Of-Life Electrical And Electronic Products: The Challenges And The Potential Solutions For Management Enhancement In Developing Countries Context. *Acta Scientifica Malaysia*, v. 1, n. 2, p. 05–08, 25 out. 2017. Disponível em: <<https://actascientificamalaysia.com/download/521/>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

JOHANSSON, Jan G.; BJÖRKLUND, Anna E. Reducing Life Cycle Environmental Impacts of Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling. *Journal of Industrial Ecology*, v. 14, n. 2, p. 258–269, mar. 2010. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1530-9290.2009.00191.x>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

JUNBEUM KIM *et al.* Methodology for recycling potential evaluation criterion of waste home appliances considering environmental and economic factor. 2004, [S.l.]: IEEE, 2004. p. 68–73. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1299690/>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

KANG, Daniel Hsing Po; CHEN, Mengjun; OGUNSEITAN, Oladele A. Potential Environmental and Human Health Impacts of Rechargeable Lithium Batteries in Electronic Waste. *Environmental Science & Technology*, v. 47, n. 10, p. 5495–5503, 21 maio 2013. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es400614y>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

KHETRIWAL, Deepali Sinha; KRAEUCHI, Philipp; WIDMER, Rolf. Producer responsibility for e-waste management: Key issues for consideration – Learning from the Swiss experience. *Journal of Environmental Management*, v. 90, n. 1, p. 153–165, jan. 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030147970700312X>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

KIDDEE, Peeranart; NAIDU, Ravi; WONG, Ming H. Electronic waste management approaches: An overview. *Waste Management*, v. 33, n. 5, p. 1237–1250, maio 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.006>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

KIM, Seungdo; HWANG, Taeyeon; OVERCASH, Michael. Life cycle assessment study of color computer monitor. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 6, n. 1, p. 35–43, jan. 2001. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF02977594>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

- KUMAR, Amit; HOLUSZKO, Maria; ESPINOSA, Denise Croce Romano. E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 122, p. 32–42, 1 jul. 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344917300290>>. Acesso em: 9 mar. 2018.
- LEASE, Kelly. Asian countries jump on the EPR bandwagon. *ILSR Waste to Wealth Program*, v. 41, n. 202, 2002. Disponível em: <https://ilsr.org/wp-content/uploads/2012/02/ftao_41_Asia1.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2019.
- LÉBRE, Éléonore; CORDER, Glen. Integrating industrial ecology thinking into the management of mining waste. *Resources*, v. 4, n. 4, p. 765–786, 2015. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9276/4/4/765>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- LIM, Seong-Rin *et al.* Potential Environmental Impacts from the Metals in Incandescent, Compact Fluorescent Lamp (CFL), and Light-Emitting Diode (LED) Bulbs. *Environmental Science & Technology*, v. 47, n. 2, p. 1040–1047, 15 jan. 2013. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es302886m>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- LIM, Seong-Rin *et al.* Potential Environmental Impacts of Light-Emitting Diodes (LEDs): Metallic Resources, Toxicity, and Hazardous Waste Classification. *Environmental Science & Technology*, v. 45, n. 1, p. 320–327, 1 jan. 2011. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es101052q>>. Acesso em: 5 ago. 2019.
- LIU, Xianbing; TANAKA, Masaru; MATSUI, Yasuhiro. A Study on the Assessment of Management Frameworks for Waste Electronic Home Appliances. *Journal of the Faculty of Environmental Science and Technology*, v. 12, n. 1, p. 51–61, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/32187314_A_Study_on_the_Assessment_of_Management_Frameworks_for_Waste_Electronic_Home_Appliances>. Acesso em: 5 ago. 2019.
- LU, Bin *et al.* Comparison on End-of-Life strategies of WEEE in China based on LCA. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, v. 11, n. 5, p. 7, 30 out. 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11783-017-0994-7>>. Acesso em: 5 ago. 2019.
- LU, Bin *et al.* Reusability based on Life Cycle Sustainability Assessment: Case Study on WEEE. *Procedia CIRP*, v. 15, p. 473–478, 2014. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827114004697>>. Acesso em: 19 nov. 2019.
- LU, Bin *et al.* The environmental impact of technology innovation on WEEE management by Multi-Life Cycle Assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 89, p. 148–158, 15 fev. 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614011743>>. Acesso em: 19 nov. 2019.
- LU, Li-Teh *et al.* Balancing the life cycle impacts of notebook computers: Taiwan's experience. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 48, n. 1, p. 13–25, jul. 2006. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344905001825>>. Acesso em: 19 nov. 2019.
- MANOMAIVIBOOL, Panate. Extended producer responsibility in a non-OECD context: The management of waste electrical and electronic equipment in India. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 53, n. 3, p. 136–144, jan. 2009. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344908001821>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

MARINESCU, Corina; CICEA, Claudiu; CIOCOIU, Carman Nadia. The Development of a Performance Assessment Method for E-Waste Management in the European Union. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 25, n. 5 SPEC. ISS., p. 436–458, 2005.

MAYERS, C Kieren; FRANCE, Chris M; COWELL, Sarah J. *Extended Producer Responsibility for Waste Electronics An Example of Printer Recycling in the United Kingdom..* [S.l: s.n.], 2005.

MENDES CAMPOLINA, Juliana *et al.* A study on the environmental aspects of WEEE plastic recycling in a Brazilian company. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 22, n. 12, p. 1957–1968, 13 dez. 2017. Disponível em:

<<http://link.springer.com/10.1007/s11367-017-1282-2>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

MENDES, Natalia Crespo; BUENO, Cristiane; OMETTO, Aldo Roberto. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. *Production*, v. 26, n. 1, p. 160–175, 24 nov. 2015. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132016000100160&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 19 fev. 2019.

MENIKPURA, S. N.M.; SANTO, Atsushi; HOTTA, Yasuhiko. Assessing the climate co-benefits from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) recycling in Japan. *Journal of Cleaner Production*, v. 74, p. 183–190, 2014. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.040>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

MORAES, Daniela da Gama e Silva Volpe Moreira De; ROCHA, Tiago Barreto; EWALD, Marcia Regina. Life cycle assessment of cell phones in Brazil based on two reverse logistics scenarios. *Production*, v. 24, n. 4, p. 735–741, 21 mar. 2014. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132014000400002&lng=en&tlng=en>. Acesso em: 19 nov. 2019.

MOTTA, L. B.; BARRETO, R.C. Indicadores Para Análise Da Gestão De Resíduos Eletroeletrônicos Em Instituições Públicas E Privadas. *XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa*, 2019. Disponível em:

<<https://www.researchgate.net/publication/334327265>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

MUÑOZ, Ivan *et al.* LCA and ecodesign in the toy industry: case study of a teddy bear incorporating electric and electronic components. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 14, n. 1, p. 64–72, 4 jan. 2009. Disponível em:

<<http://link.springer.com/10.1007/s11367-008-0044-6>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

NAKAMURA, Shinichiro; KONDO, Yasushi. A waste input–output life-cycle cost analysis of the recycling of end-of-life electrical home appliances. *Ecological Economics*, v. 57, n. 3, p. 494–506, maio 2006. Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921800905002454>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

NAMIAS, Jennifer. THE FUTURE OF ELECTRONIC WASTE RECYCLING IN THE UNITED STATES: Obstacles and Domestic Solutions. *Columbia University*, jul. 2013. Disponível em: <http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/Namias_Thesis_07-08-13.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2019.

- NELEN, Dirk *et al.* A multidimensional indicator set to assess the benefits of WEEE material recycling. *Journal of Cleaner Production*, v. 83, n. 2014, p. 305–316, 15 nov. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.094>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- NIU, Ruxuan *et al.* LCA of Scrap CRT Display at Various Scenarios of Treatment. *Procedia Environmental Sciences*, v. 16, p. 576–584, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2012.10.079>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- NNOROM, I.C.; OSIBANJO, O. Overview of electronic waste (e-waste) management practices and legislations, and their poor applications in the developing countries. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 52, n. 6, p. 843–858, abr. 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344908000165>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- NOON, Michael S.; LEE, Seung-Jin; COOPER, Joyce S. A life cycle assessment of end-of-life computer monitor management in the Seattle metropolitan region. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 57, p. 22–29, dez. 2011. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344911001972>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- OECD. Extended Producer Responsibility A Guidance Manual for Governments. 20 mar. 2001. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/environment/extended-producer-responsibility_9789264189867-en>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- OGUSHI, Yasuhiko; KANDLIKAR, Milind. Assessing Extended Producer Responsibility Laws in Japan. *Environmental Science & Technology*, v. 41, n. 13, p. 4502–4508, 1 jul. 2007. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es072561x>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- PARK, Pil-Ju *et al.* Comparison of four methods for integrating environmental and economic aspects in the end-of-life stage of a washing machine. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 48, n. 1, p. 71–85, jul. 2006. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344906000024>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- POLLOCK, D.; COULON, R. Life cycle assessment: of an inkjet print cartridge. 1996, [S.l.]: IEEE, 1996. p. 154–160. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/501870/>>. Acesso em: 5 ago. 2019.
- PREK, Matjaz. Environmental impact and life cycle assessment of heating and air conditioning systems, a simplified case study. *Energy and Buildings*, v. 36, n. 10, p. 1021–1027, out. 2004. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778804001872>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- REDONDO, Johan Manuel *et al.* Assessment strategies for the integral management of waste electrical and electronic equipment-WEEE. *DYNA*, v. 85, n. 205, p. 319–327, 1 abr. 2018. Disponível em: <<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/62564>>. Acesso em: 14 abr. 2019.
- ROCCHETTI, Laura *et al.* Environmental Impact Assessment of Hydrometallurgical Processes for Metal Recovery from WEEE Residues Using a Portable Prototype Plant. *Environmental Science & Technology*, v. 47, n. 3, p. 130125102742005, 25 jan. 2013. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es302192t>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

ROCCHETTI, Laura; BEOLCHINI, Francesca. Environmental burdens in the management of end-of-life cathode ray tubes. *Waste Management*, v. 34, n. 2, p. 468–474, fev. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.10.031>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

ROLLER, Gerhard; FÜHR, Martin. Individual Producer Responsibility: A Remaining Challenge under the WEEE Directive. *RECIEL*, v. 17, n. 3, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1467-9388.2008.00606.x>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

RUBIN, Ricardo Soares *et al.* Utilization of Life Cycle Assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap. *Journal of Cleaner Production*, v. 64, p. 297–305, 1 fev. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.051>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

SACHS, Noah. Planning the funeral at the birth: Extended producer responsibility in the European Union and the United States. *Harvard Environmental Law Review*, v. 30, n. 1, p. 51–98, 2006. Disponível em: <<https://scholarship.richmond.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1495&context=law-faculty-publications>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

SANER, Dominik; WALSER, Tobias; VADENBO, Carl O. End-of-life and waste management in life cycle assessment—Zurich, 6 December 2011. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 17, n. 4, p. 504–510, 24 maio 2012. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-012-0390-2>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

SATAKE, K.; OISHI, S. LCA for electronic products. A case study for CD-ROM drives. 1998, [S.l.]: IEEE, 1998. p. 176–179. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/675053/>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

SCHARNHORST, Wolfram. Life Cycle Assessment of Mobile Telephone Networks, with Focus on the End-of-Life Phase. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 11, n. 4, p. 290–291, 20 jul. 2006. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1065/lca2006.05.247>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SCHARNHORST, Wolfram *et al.* The end of life treatment of second generation mobile phone networks: Strategies to reduce the environmental impact. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 25, n. 5, p. 540–566, jul. 2005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0195925505000508>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SOCOLOF, Maria Leet; OVERLY, Jonathan G.; GEIBIG, Jack R. Environmental life-cycle impacts of CRT and LCD desktop computer displays. *Journal of Cleaner Production*, v. 13, n. 13–14, p. 1281–1294, nov. 2005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652605001198>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

SOLÉ, Miquel *et al.* Proposal of a new model to improve the collection of small WEEE: a pilot project for the recovery and recycling of toys. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, v. 30, n. 11, p. 1208–1212, 27 nov. 2012. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X11434563>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

SONG, Qingbin *et al.* Environmental risk assessment of CRT and PCB workshops in a mobile e-waste recycling plant. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 22, n. 16,

p. 12366–12373, 23 ago. 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11356-015-4350-9>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SONG, Qingbin; WANG, Zhishi; LI, Jinhui; YUAN, Wenyi. Life cycle assessment of desktop PCs in Macau. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 18, n. 3, p. 553–566, 13 mar. 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-012-0515-7>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SONG, Qingbin; WANG, Zhishi; LI, Jinhui; ZENG, Xianlai. The life cycle assessment of an e-waste treatment enterprise in China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 15, n. 4, p. 469–475, 4 out. 2013. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10163-013-0152-7>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SONG, Qingbin; WANG, Zhishi; LI, Jinhui. Sustainability evaluation of e-waste treatment based on energy analysis and the LCA method: A case study of a trial project in Macau. *Ecological Indicators*, v. 30, p. 138–147, jul. 2013. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1470160X13000903>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SONG, Xiaolong *et al.* Life-cycle energy use and GHG emissions of waste television treatment system in China. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 128, p. 470–478, jan. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344916302373>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

SPIELMANN, M.; SHISCHKE, K. Environmental Assessment in Production of Electronic Components - Possibilities and Obstacles of LCA Methodology. *13th Discussion Forum Life Cycle Assessment*, p. 9–21, 2001. Disponível em: <http://www.lcaforum.ch/Portals/0/DF_Archive/DF13/df13b.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2019.

STREICHER-PORTE, Martin *et al.* One laptop per child, local refurbishment or overseas donations? Sustainability assessment of computer supply scenarios for schools in Colombia. *Journal of Environmental Management*, v. 90, n. 11, p. 3498–3511, ago. 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479709002023>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

TOJO, Naoko. Extended Producer Responsibility Legislation for Electrical and Electronic Equipment – Approaches in Asia and Europe. p. 2001, 2001. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/229002664_Extended_producer_responsibility_legislation_for_electrical_and_electronic_equipment_approaches_in_Asia_and_Europe>. Acesso em: 14 abr. 2019.

TRAN, Ha Phuong *et al.* Recycling portable alkaline/ZnC batteries for a circular economy: An assessment of natural resource consumption from a life cycle and criticality perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 135, n. August 2017, p. 265–278, ago. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921344917302665>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

UENO, Takayoshi; SHIINO, Toru; ONISHI, Hiroshi. Evaluation method for electronic components in life cycle assessment. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 1, n. 1, p. 25–32, 1999. Disponível em:

<<https://www.readcube.com/articles/10.1007%2Fs10163-999-0002-9>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

UNGER, N. *et al.* The greenhouse gas benefit of recycling waste electrical and electronic equipment above the legal minimum requirement: An Austrian LCA case study. *Journal of Cleaner Production*, v. 164, p. 1635–1644, 15 out. 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261731394X>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2002/96/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO. *Jornal Oficial da União Europeia*, p. 24–38, 2003. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ac89e64f-a4a5-4c13-8d96-1fd1d6bcaa49.0010.02/DOC_1&format=PDF>. Acesso em: 14 abr. 2019.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2008/98/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO. *Jornal Oficial da União Europeia*, p. 3–30, 2008. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=PT>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho. *Jornal Oficial da União Europeia*, p. 38–71, 2012. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=EN>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

VAN EYGEN, Emile *et al.* Resource savings by urban mining: The case of desktop and laptop computers in Belgium. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 107, p. 53–64, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.032>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

VAN MIER, G.P.M.; STERKE, C.J.L.M.; STEVELS, A.L.N. Life-cycle costs calculations and green design options. Computer monitors as example. 1996, [S.l.]: IEEE, 1996. p. 191–196. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/501876/>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

VASILENKO, Laura; GURASKIENĖ, Inga; VARŽINSKAS, Visvaldas. Efficiency Assessment of E-waste Management System in Lithuanian Public Sector. *Environmental Research, Engineering & Management*, v. 49, n. 3, p. 56–63, 2009. Disponível em: <<https://www.semanticscholar.org/paper/Efficiency-Assessment-of-E-waste-Management-System-Vasilenko-Guraskiene/89a65e9f369b8ea3edd574016f8475e5817b1169>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

VILLARES, Marco *et al.* Applying an ex-ante life cycle perspective to metal recovery from e-waste using bioleaching. *Journal of Cleaner Production*, v. 129, p. 315–328, ago. 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616303341>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

WÄGER, P. A.; HISCHIER, R.; EUGSTER, M. Environmental impacts of the Swiss collection and recovery systems for Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE): A follow-up. *Science of the Total Environment*, v. 409, n. 10, p. 1746–1756, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.01.050>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

WAGER, Patrik A.; HISCHIER, Roland. Life cycle assessment of post-consumer plastics production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant. *Science of the Total Environment*, v. 529, p. 158–

167, 1 out. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.043>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

WIDMER, Rolf *et al.* Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 25, n. 5, p. 436–458, jul. 2005. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0195925505000466>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

XIAO, Rufeng; ZHANG, You; YUAN, Zengwei. Environmental impacts of reclamation and recycling processes of refrigerators using life cycle assessment (LCA) methods. *Journal of Cleaner Production*, v. 131, p. 52–59, set. 2016. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652616305492>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

XU, Qingbo *et al.* Environmental and economic evaluation of cathode ray tube (CRT) funnel glass waste management options in the United States. *REWAS 2016*. Cham: Springer International Publishing, 2016. v. 78. p. 309–310. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-48768-7_48>. Acesso em: 5 ago. 2019.

XUE, Mianqiang *et al.* Waste Management of Printed Wiring Boards: A Life Cycle Assessment of the Metals Recycling Chain from Liberation through Refining. *Environmental Science & Technology*, v. 49, n. 2, p. 940–947, 20 jan. 2015. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es504750q>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

XUE, Mianqiang; XU, Zhenming. Application of Life Cycle Assessment on Electronic Waste Management: A Review. *Environmental Management*, v. 59, n. 4, p. 693–707, 31 abr. 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00267-016-0812-1>>. Acesso em: 19 nov. 2019.

YANAGITANI, Kazuta; KAWAHARA, Katsumi. LCA study of air conditioners with an alternative refrigerant. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 5, n. 5, p. 287–290, set. 2000. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF02977581>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

YAO, Liming *et al.* An integrated method of life-cycle assessment and system dynamics for waste mobile phone management and recycling in China. *Journal of Cleaner Production*, v. 187, p. 852–862, 20 jun. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618308667>>. Acesso em: 14 abr. 2019.

YU, Yajuan *et al.* Environmental Impact Assessment and End-of-Life Treatment Policy Analysis for Li-Ion Batteries and Ni-MH Batteries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 11, n. 3, p. 3185–3198, 18 mar. 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1660-4601/11/3/3185>>. Acesso em: 5 ago. 2019.

ZINK, Trevor *et al.* Comparative life cycle assessment of smartphone reuse: repurposing vs. refurbishment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 19, n. 5, p. 1099–1109, 25 maio 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-014-0720-7>>. Acesso em: 19 nov. 2019.