

# Análise bibliométrica e sistemática das tendências de pesquisas sobre o potencial da economia circular no gerenciamento de Resíduos Eletroeletrônicos (REEE) no período de 2008 a 2022



*Bibliometric and systematic analysis of research trends on the potential of the circular economy in the management of Electronic Waste (WEEE) from 2008 to 2022*




- **Data de entrada:**  
02/09/2023
- **Data de aprovação:**  
27/10/2023

Rayanne Maria Galdino Silva<sup>1\*</sup> | Claudia Coutinho Nóbrega<sup>1</sup> | Ana Cecília Novaes de Sá<sup>1</sup> |  
Lílian de Queiroz Firmino<sup>2</sup> | Gracielle Ferreira de Souza<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2024.055>

## ORCID ID

Silva RMG  <https://orcid.org/0000-0001-8288-0934>  
Nóbrega CC  <https://orcid.org/0000-0003-3459-185X>

Sá ACN  <https://orcid.org/0000-0002-4939-8844>  
Firmino LQ  <https://orcid.org/0000-0002-3919-4100>  
Souza GF  <https://orcid.org/0000-0001-6634-5018>

## Resumo

A reutilização e a reciclagem são as principais técnicas usadas para implementação da Economia Circular (EC) aos Resíduos Eletroeletrônicos (REEE). Assim, este estudo visa fornecer uma visão do estado da arte acerca dessas estratégias. Para isso, um conjunto de 27 artigos foram minuciosamente estudados de forma bibliométrica e sistemática. Foi utilizado o Microsoft Excel e o Mendeley para organização dos dados e o software VOSviewer para gerar uma rede de interação das palavras-chave. Identificou-se o Reino Unido e a Irlanda como os maiores emissários de artigos no tema, que ganhou enfoque a partir de 2017. O *Journal of Cleaner Production* e *Waste Management* foram os periódicos com maior número de publicações. A revisão sistemática revelou que os subtemas mais explorados foram o gerenciamento dos REEE, especialmente no que diz respeito às barreiras e facilitadores da EC, e o potencial de reutilização e de reciclagem com ênfase nas tecnologias utilizadas na mineração urbana.

**Palavras-chave:** Saneamento ambiental. Gestão de resíduos. Mineração urbana. Gerenciamento de REEE. Réuso. Fim de vida. Remanufatura.

## Abstract

*Reuse and recycling are the main techniques used to implement the Circular Economy (CE) to Electronic Waste (WEEE), so this study aims to provide a state-of-the-art view on these strategies. For this, a set of 27 articles were thoroughly trained in a bibliometric and systematic way. Microsoft Excel and Mendeley were used to organize the data and the VOSviewer Software to generate an interaction network of keywords. The United Kingdom and Ireland were identified as the largest emissaries of articles on the subject, which gained an approach from 2017. The Journal of Cleaner Production and Waste Management were the journals with the highest number of publications. The systematic review revealed that the most explored subtopics were WEEE management, especially with regard to EC barriers and facilitators, and the potential for reuse and recycling with an emphasis on technologies used in urban mining.*

**Keywords:** Environmental sanitation. Waste management. Urban mining. WEEE management. Reuse. End of life. Remanufacturing.

<sup>1</sup> Universidade Federal da Paraíba – João Pessoa – Paraíba – Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande – Paraíba – Brasil.

\*Autor correspondente: rayannemaria2014@gmail.com

## 1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos garantiram a disseminação de Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE) nos últimos tempos. Esse cenário, somado ao crescimento da globalização, urbanização, altos níveis de renda disponíveis e cultura consumista, resultou em uma ampla utilização de EEE, o que, por sua vez, gerou uma quantidade significativa de resíduos produzidos desses equipamentos no final de sua vida útil, os denominados Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos REEE ou WEEE, a sigla em inglês para Waste Electrical and Electronic Equipment (Shittu; Williams; Shaw, 2022).

De acordo com dados estimados, cerca de 54 milhões de toneladas de REEE foram produzidos em todo o mundo no ano de 2019, excluindo-se os painéis fotovoltaicos (Forti *et al.*, 2020; Shittu; Williams; Shaw, 2021). Estimando-se uma taxa de aumento de 2 milhões de toneladas ao ano, no ano de 2023 previa-se uma geração superior a 74 milhões de toneladas (Forti *et al.*, 2020).

Os REEE possuem uma composição variada, podendo conter substâncias perigosas, como cádmio, bário, mercúrio, bifenilos polibromados, bifenilos policlorados e retardadores de chama a base de brometo. Essa diversidade de componentes torna a gestão dos REEE desafiadora, especialmente quando se trata do ambiente doméstico (Neto *et al.*, 2023).

Apesar dos desafios apresentados, a reciclagem de REEE é uma atividade de interesse econômico devido à presença de metais valiosos, como ouro, prata, cobre, platina, paládio, entre outros, bem como são uma excelente fonte de matérias-primas críticas (Anandh *et al.*, 2021). Esses recursos podem ser recuperados durante o processo de reciclagem, proporcionando benefícios econômicos significativos (Cesaro *et al.*, 2018).

Uma parcela substancial de REEE não é devidamente coletada nem processada por meio de canais formais, gerado em seu descarte incorreto ou aterramento

(Forti *et al.*, 2020). Essa abordagem, conhecida como economia linear, tem levado à perda de materiais e ineficiência no uso dos recursos disponíveis (Shittu; Williams; Shaw, 2021).

O modelo econômico dominante é o modelo linear de “pegar, fabricar e dispor”, o qual necessita de enormes quantidades de energia e recursos, sendo, na realidade em que opera, cada vez mais inadequado (MacArthur, Waughray, 2016; Farias *et al.*, 2021). Além disso, aumentar a eficiência, reduzir o uso dos recursos e da energia fóssil apenas adia o inevitável, porém não tem capacidade para mudar a natureza finita dos estoques do planeta, tornando-se necessária uma alteração mais fundamental do sistema operacional, do modelo econômico linear para o modelo circular.

De acordo com Opris (2019), o setor eletrônico está baseado em uma visão errônea de recursos infinitos e desfrute de produtos de maneira insustentável. Somado a esse fato, os EEE são substituídos muito antes do seu tempo de vida útil acabar, tornando-se um fluxo de resíduos especial (Goosey; Goosey, 2020; Islam; Huda, 2020a).

Segundo Baldé *et al.* (2017), é necessário adotar os modelos de economia circular para incentivar o fechamento do ciclo de materiais através de melhor design de componentes, reutilização, reciclagem etc., mitigando a poluição ambiental.

Diante do contexto, torna-se notável a necessidade de adoção de práticas que vão ao encontro do que é proposto na Economia Circular (EC), isto é, que os resíduos sejam considerados recursos e resulte na diminuição de extração de matéria-prima virgem.

A economia circular é mais que um conceito. Ela é caracterizada como uma economia intencionalmente restauradora e regenerativa por design, com o intuito de conservar produtos, componentes e materiais no seu maior tempo de vida útil e valor, entendido como um ciclo de desenvolvimento

positivo e contínuo que aprimora e preserva os recursos naturais, otimiza o sistema de produção e reduz seus riscos, com foco na gestão de estoques finitos e fluxos renováveis (MacArthur; Waughray, 2016). Esse modelo de economia inclui a prolongação da vida útil dos produtos (reutilização, reforma e remanufatura), como também a utilização de recursos secundários por meio da recuperação material (reciclagem) (Stahel, 2016).

As técnicas de reuso e reciclagem oferecem benefícios ao meio ambiente, por evitar a poluição e a contaminação, à sociedade e à saúde de pessoas, além de servirem para o aprendizado e a inclusão social e digital. No que diz respeito ao reuso, de acordo com Sauv   *et al.* (2016), a EC prioriza o mesmo, assim como a remanufatura, em detrimento à reciclagem. Por outro lado, as técnicas de reciclagem são indispensáveis nos casos de não possibilidade de reuso dos produtos em fim de vida útil. De acordo com MacArthur *et al.* (2013) e MacArthur (2015), a EC mostra alta relevância para os REEE, entre outros resíduos.

Nesse sentido, a bibliometria    amplamente reconhecida como uma ferramenta crucial para a análise teórica do estado da arte em várias áreas de pesquisa. Conseqüentemente, essa ferramenta oferece uma compreensão mais aprofundada da evolu  o do conhecimento, permitindo identificar áreas de pesquisa emergente (Silva, 2021). Por meio da aplica  o de métodos quantitativos e estatísticos, a bibliometria permite a mensura  o e a análise de padrões de produ  o científica, tais como a quantidade de publica  es, a distribui  o de autores e a frequência de respostas em determinado campo de estudo (Tsai *et al.*, 2020).

O atual estudo visa    elabora  o de uma revisão bibliométrica e sistemática, buscando abranger as produ  es científicas em duas bases de pesquisas que contemplam as questões relativas ao potencial da reutiliza  o e de reciclagem dos REEE no contexto da economia circular, no período de 2008 a 2022.

## 2 METODOLOGIA

Este estudo de revisão bibliométrica e sistemática foi realizado por meio da defini  o da cole  o de artigos, da avalia  o bibliométrica e da avalia  o sistemática.

### 2.1 Cole  o de artigos

Neste trabalho, buscou-se verificar a produ  o científica em periódicos indexados nas bases de dados *Scopus* e *Science Direct* acerca do potencial de reutiliza  o e reciclagem de REEE no contexto da economia circular, desenvolvidos e publicados entre os anos de 2008 e 2022. De acordo com Bramer *et al.* (2017) e Key (2020), um único banco de dados não    suficiente para reunir todas as referências necessárias para uma revisão de literatura sistemática, e isso pode resultar em uma tendência de escolha.

Foram utilizadas nos títulos, nos resumos e nas palavras-chave os seguintes indicadores de pesquisa e operadores booleanos (“WEEE” OR “WEE”) AND (“Reuse” OR “Recycling”) AND “Potential” AND “Circular Economy”.

Para aumentar a confiabilidade e qualidade da pesquisa, foram utilizados os seguintes critérios de inclusão: (i) artigo de pesquisa indexados; (ii) o período de publica  o entre 2008 e 2022; (iii) artigos publicados em qualquer país e nos idiomas português, inglês ou espanhol; e (iv) artigos com ou sem open access. Excluíram-se as publica  es: (i) que não eram artigos de pesquisa, ou seja, desconsiderou-se obras de congressos, livros, notícias, revisões bibliográficas, pesquisas documentais e outros; (ii) que se encontravam fora do limite de tempo definido na busca; e (iii) artigos que não tinham foco no tema abordado.

Dos artigos encontrados, apenas 61 atenderam aos critérios de inclusão, somando-se os artigos obtidos nas duas bases de busca, sendo 34 da *Scopus* e 27 da *Science Direct*. Para organizar e gerenciar os artigos para leitura, além da elimi-

nação de duplicatas, todos os documentos foram importados para o *Software Mendeley*, uma biblioteca digital desenvolvida para pesquisadores, cientistas e estudantes (Owan; Agurokpon, 2022), empregada como ferramenta de gerenciamento de referências (Ravikumar; Boruah; Ravikumar, 2022; Setiawan *et al.*, 2023).

Na seleção dos artigos, foi realizada a leitura do título e do resumo; posteriormente, os artigos pré-selecionados foram lidos completamente para avaliar se atendiam aos critérios de inclusão para o estudo. Por fim, 27 artigos foram identificados como resultado do processo de filtragem, já havendo feito a retirada de 14 duplicatas.

## 2.2 Revisão bibliométrica

O método bibliométrico é uma técnica quantitativa e estatística de medição de pesquisa documental (Araújo, 2006). Essa abordagem contribui para analisar a evolução dos estudos em uma disciplina científica, indicando tendências de desenvolvimento da arte (Li *et al.*, 2017). Essa análise envolve a coleta, a organização e a análise de dados bibliográficos e busca avaliar e medir o impacto, a produção e a disseminação do conhecimento em uma área específica, com base em indicadores bibliométricos.

Foi utilizado o programa Microsoft Excel para realizar o processamento e a análise das informações quantitativas levantadas. Também se fez uso do VOSviewer 1.6.19 para traçar o progresso científico, analisando a rede de interação entre as palavras-chave e fornecendo informações sobre os artigos científicos.

O VOSviewer é um software de mineração de texto que proporciona a criação de mapas de rede com o objetivo de explorar a bibliometria de maneira visual (Loch; Giglio; Campos, 2018; Van Eck; Waltman, 2010), pode ser utilizado para a construção de redes de publicações científicas, revistas científicas, investigadores, organizações de pesquisa, países, palavras-chave ou termos. Essas redes podem ser formadas por meio de

diferentes tipos de conexões, como coautoria, coocorrência, citação, acoplamento bibliográfico ou links de cocitação (Loch; Giglio; Campos, 2018).

## 2.3 Análise sistemática

Revisão sistemática é uma abordagem de pesquisa que busca sintetizar e resumir de forma sistemática e imparcial as evidências disponíveis em estudos primários relevantes sobre uma pergunta de pesquisa específica (Higgins *et al.*, 2022).

A análise sistemática fornece contexto e evidências sobre o tema, possibilitando a identificação dos principais pontos, metodologias usuais, resultados, bem como as perspectivas futuras, a partir da leitura dos artigos (Assis; Gonçalves, 2022).

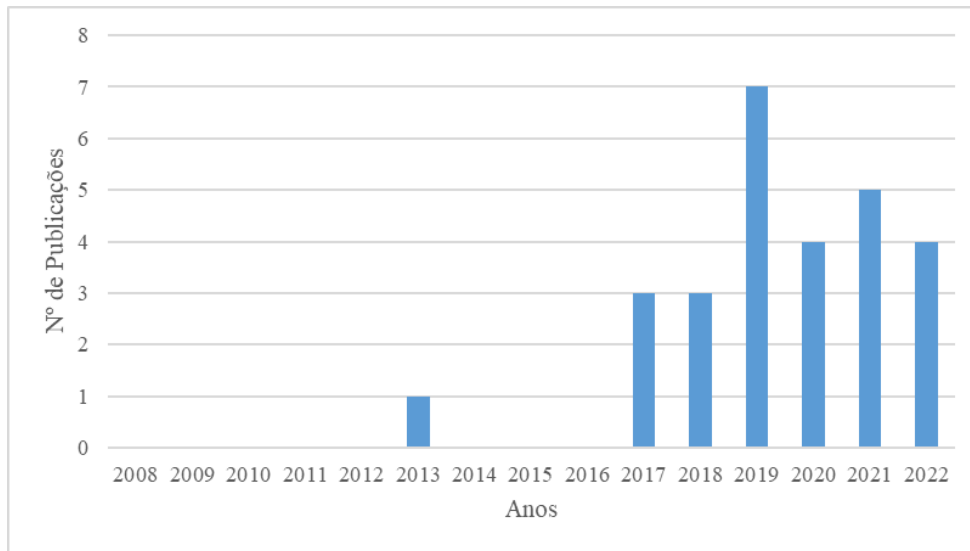
Essa fase foi executada por meio de uma leitura minuciosa dos artigos científicos completos, em que foram selecionados cuidadosamente os dados e informações pertinentes. O objetivo foi obter uma visão abrangente dos principais aspectos relacionados ao tema, incluindo as pesquisas já realizadas, as tendências futuras e as lacunas que ainda demandam estudos mais aprofundados.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos últimos tempos, tem havido um notável aumento nos interesses de pesquisa no tema da economia circular. Vários estudos investigaram diferentes formas de tentar implementar esse conceito aos EEE e seus consequentes resíduos, acoplando o gerenciamento à conscientização de não geração, às atividades de reutilização, às novas tecnologias de reciclagem dos materiais presentes nos REEE e da mineração urbana em Minas Urbanas Distintas (MUD).

### 3.1 Tendência do número de publicações ao longo dos anos

Foram identificados 27 artigos sobre o potencial de reutilização e reciclagem dos REEE no contexto da economia circular no intervalo temporal entre 2008 e 2022. A distribuição das publicações ao longo do período analisado é mostrada na Figura 1.



**Figura 1** – Tendência de publicações no período temporal de 2008 a 2022.

Percebe-se uma flutuação no número de publicações ao longo dos anos, sendo constatada a inexistência de artigos até 2012; apenas 1 artigo publicado no tema em 2013 (Ongondo *et al.*, 2013); e uma lacuna na produção científica de 2014 a 2016. O crescimento de publicações aconteceu no ano de 2017 e apresentou um pico no número de artigos publicados em 2019. De 2020 a 2022, o crescimento na quantidade de artigos vem mantendo uma relativa constância.

Observa-se que a aplicação da economia circular aos EEE é um tema que tem ganhado relevância nos últimos anos, e com tendências crescentes para o futuro. Tal fato mostra o interesse da comunidade científica sobre o tema, que se justifica pela notoriedade da problemática da gestão dos REEE, à sua crescente geração e à necessidade de implementação de técnicas de controle e monitoramento propostos pela economia circular. Também pode-se verificar que a aplicação da economia circular aos REEE trata-se de um tema relativamente novo, que ganhou maior notoriedade a partir de 2017.

### 3.2 Categoria dos periódicos

A avaliação dos periódicos nos quais as produções científicas são indexadas exerce uma influência sig-

nificativa no processo de identificação e seleção do local de publicação desejado (Larivière; Sugimoto, 2019). Nessa análise, são levadas em consideração tanto a prevalência quanto a relevância conferida pela revista a um determinado tema. Os pesquisadores consideram fatores como o renome do periódico, sua reputação no meio acadêmico, o alcance e a visibilidade da publicação, bem como a importância atribuída ao tema específico.

A *Journal Impact Factor* (JFI) é uma métrica usada para avaliar periódicos científicos, sendo calculada com base em dados indexados na *Web of Science Core Collection*. É comumente compreendido como uma medida do número médio de citações recebidas pelos artigos publicados em um periódico específico em um período de tempo determinado, embora sua metodologia de cálculo não corresponda exatamente a essa interpretação (Larivière; Sugimoto, 2019).

É possível afirmar que os artigos escolhidos se encontram veiculados em 13 periódicos, evidenciando o crescente interesse das diversas revistas em abordar a aplicação da economia circular aos REEE (Tabela 1). No entanto, dentre esse conjunto, apenas 4 revistas apresen-

taram duas ou mais publicações sobre o tema, mostrando que o tema precisa ser mais trabalhado no meio acadêmico. O periódico *Journal of Cleaner Production* se destaca com o maior

número de trabalhos científicos publicados, e apresentou um total de 8 trabalhos científicos publicados, o que corresponde a aproximadamente 30% do total (Tabela 1).

**Tabela 1** – Periódicos que produziram artigos da área.

| Periódico   | Número de publicações | Journal Impact Factor (JFI) |
|---|-----------------------|-----------------------------|
| Detritus  | 2                     | 1,7                         |
| Environmental Science and Pollution Research                  | 1                     | 5,8                         |
| International Journal of Sustainable Development and Planning | 1                     | -                           |
| Journal of Cleaner Production                                 | 8                     | 11,1                        |
| Journal of Environmental Management                           | 1                     | 8,7                         |
| Journal of Industrial Ecology                                 | 1                     | 5,9                         |
| Procedia Manufacturing  | 1                     | -                           |
| Resources Policy  | 1                     | 10,2                        |
| Resources, Conservation and Recycling                         | 3                     | 13,2                        |
| Revista de Gestao   | 1                     | 1,2                         |
| Sustainability (Switzerland)                                  | 1                     | 3,9                         |
| Waste and Biomass Valorization                                | 1                     | 3,2                         |
| Waste Management  | 5                     | 8,1                         |

Ainda analisando a Tabela 1, observa-se que o periódico *Waste Management* se destaca com um número significativo de 5 publicações no tema. Já as revistas *Resources, Conservation and Recycling*, e *Detritus* apresentaram 3 e 2 publicações, respectivamente. As demais revistas apresentaram somente uma publicação no tema específico nos últimos 15 anos.

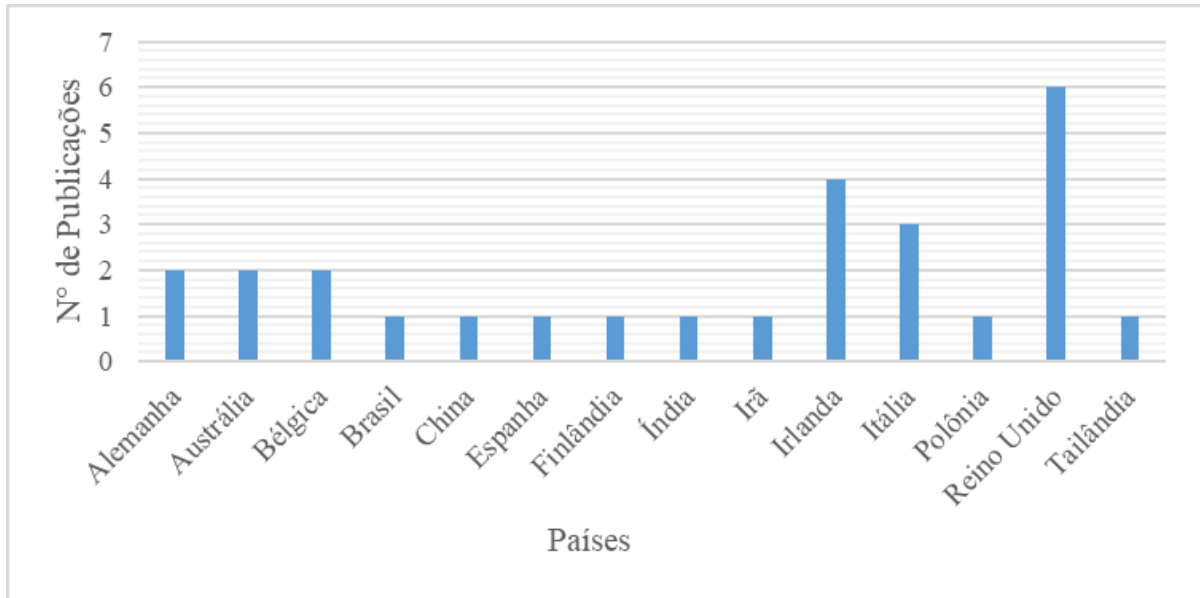
Os periódicos *Resources, Conservation and Recycling* e *Journal of Cleaner Production* se destacaram pelo Fator de Impacto (FI) mais alto, com valores de 13,2 e 11,1, respectivamente.

### 3.3 Distribuição geográfica das publicações

A avaliação da contribuição por países é extremamente crucial, uma vez que permite identificar as regiões com maior interesse no assunto, bem como as nações que promovem a realização de

estudos para apoio ao desenvolvimento científico e tecnológico em determinadas áreas de pesquisa (Polat *et al.*, 2022).

De acordo com os dados disponíveis, foram observadas as contribuições de 14 países, apresentando uma variedade de participação e envolvimento na produção científica (Figura 2). Os dados foram analisados de acordo com a nacionalidade dos autores. Foi observado que o interesse pelo potencial da economia circular na gestão de REEE foi concentrado em 6 nacionalidades diferentes, que apresentaram duas ou mais publicações, e foram responsáveis por 70% dos artigos. O Reino Unido, com uma contribuição de 22%, desponta como o país mais proeminente na área de estudo, seguido pela Irlanda (14%), Itália (11%), Alemanha (7%), Austrália (7%) e Bélgica (7%).



**Figura 2** – Quantidade de publicações científicas registradas por países no ScienceDirect e Scopus no tema abordado.

### 3.4 Análises de citações

A avaliação da performance acadêmica não se limita apenas à produção científica, mas também considera o número de citações recebidas por uma publicação específica (Farias *et al.*, 2021). De acordo com Zupic e Čater (2015), a quantidade de vezes em que um documento é citado indica sua influência no campo de pes-

quisa. Assim, a Tabela 2 apresenta o *ranking* dos 12 artigos mais citados.

Os trabalhos de Parajuly e Wenzel (2017a), Marra *et al.* (2018), Meester *et al.* (2019) e Islam e Huda (2019) foram os mais referenciados, destacando-se pela relevância de suas abordagens e indicando que essas pesquisas têm exercido uma influência significativa.

**Tabela 2** – Ranking dos artigos científicos com maior destaque em termos de citação.

| Ranking | Título   | Nº de citações | Autores                            |
|---------|--|----------------|------------------------------------|
| 1º      | Potential for circular economy in household WEEE management  | 163            | (PARAJULY; WENZEL, 2017a)          |
| 2º      | Bioleaching of metals from WEEE shredding dust   | 95             | (MARRA <i>et al.</i> , 2018)       |
| 3º      | Using material flow analysis and life cycle assessment in decision support: A case study on WEEE valorization in Belgium | 91             | (MEESTER <i>et al.</i> , 2019)     |
| 4º      | E-waste in Australia: Generation estimation and untapped material recovery and revenue potential                         | 63             | (ISLAM; HUDA, 2019)                |
| 5º      | ICT reuse in socio-economic enterprises  | 62             | (ONGONDO <i>et al.</i> , 2013)     |
| 6º      | Potentials and Barriers for Tantalum Recovery from Waste Electric and Electronic Equipment                               | 57             | (UEBERSCHAAR <i>et al.</i> , 2017) |
| 7º      | Investigating the reasons for storage of WEEE by residents – A potential for removal from households                     | 56             | (NOWAKOWSKI, 2019)                 |

| Ranking | Título  | Nº de citações | Autores                                |
|---------|---|----------------|--|
| 8º      | Repurposing end of life notebook computers from consumer WEEE as thin client computers – A hybrid end of life strategy for the Circular Economy in electronics                        | 51             | (COUGHLAN; FITZPATRICK; MCMAHON, 2018) |
| 9º      | Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE– evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes | 45             | (CHARLES <i>et al.</i> , 2020)         |
| 10º     | Towards a more circular economy for WEEE plastics – Part A: Development of innovative recycling strategies  | 40             | (WAGNER <i>et al.</i> , 2019)          |
| 11º     | An approach to favor industrial symbiosis: the case of waste electrical and electronic equipment  | 40             | (MARCONI <i>et al.</i> , 2018)         |
| 12º     | Product family approach in e-waste management: A conceptual framework for circular economy  | 39             | (PARAJULY; WENZEL, 2017b)              |

No que diz respeito ao conteúdo dos artigos mais citados, Parajuly e Wenzel (2017a) exploraram o potencial de reutilização e reciclagem dos REEE como as principais abordagens impulsionadas para promover a economia circular. Os REEE foram caracterizados em Odense, na Dinamarca, para investigar a sua funcionalidade restante e seu potencial de reutilização, e explorar o potencial de reciclagem através da desmontagem para determinação da composição material.

Marra *et al.* (2018) trabalharam com o tema de mineração urbana, utilizando o método de biolixiviação (aplicação da biohidrometalurgia) para reciclar metais básicos, metais preciosos e elementos de terras raras do pó da trituração de REEE.

Em seu estudo, Meester *et al.* (2019) demonstraram como a aplicação da análise de fluxo de material e da avaliação do ciclo de vida pode ser utilizada para antecipar os fluxos de materiais e avaliar os potenciais benefícios ambientais da cadeia de reciclagem. Essas abordagens oferecem orientação valiosa tanto para os formuladores de políticas quanto para as indústrias, possibilitando uma tomada de

decisão eficaz. Além disso, realizaram um estudo de caso em Flandres, na Bélgica, onde explorou o potencial de aplicações de alto nível e aplicações de baixo custo (aterros sanitários ou incineração) dos materiais contidos nos REEE, como os materiais ferrosos e não ferrosos, metais preciosos e plásticos.

Islam e Huda (2019) forneceram uma estimativa do consumo de EEE colocados no mercado, a geração de REEE e o estoque de produtos EEE, na Austrália, no período de 2000 a 2047. O estudo considerou 7 categorias que abrangem 51 tipos diferentes de produtos. Para realizar os cálculos, foram aplicadas técnicas como a suavização exponencial dupla de Holt para estimar os produtos colocados no mercado no passado e no futuro, e o uso da função de distribuição Weibull para calcular a geração de REEE ao longo do tempo. Ademais, o estudo avaliou o material que pode ser potencialmente recuperado e o potencial de receita dos produtos regulamentados, como computadores, televisores e outros periféricos de TI, abrangidos pelo esquema de reciclagem de televisão e computador NTCRS, bem como os REEE gerados fora da cobertura atual desses produtos.



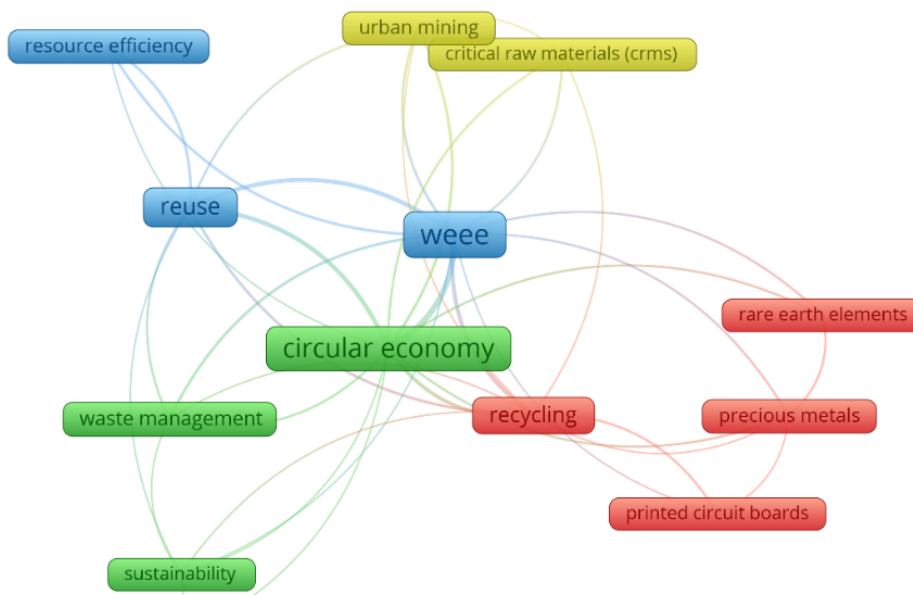
### 3.5 Análise de copalavras

Dentro do escopo das copalavras, foi realizada uma análise da coocorrência das palavras-chave com o objetivo de identificar os termos mais usados pelos pesquisadores e mapear a estrutura de conhecimento em um determinado campo científico (Anandh *et al.*, 2021; Hu *et al.*, 2023).

Para classificar os termos mais relevantes, foi definido um mínimo de duas ocorrências da mesma

palavra-chave, isto é, que apareceram pelo menos 2 vezes no conjunto de artigos selecionados. Como consequência, dentre as 92 palavras-chave, apenas 13 atenderam à condição.

No VOSviewer foi criado um mapa de relação de palavras-chave (Figura 3). Os resultados destacaram que as palavras-chave “circular economy” e “weee” são amplamente utilizadas em comparação com as outras.



**Figura 3** – Rede de coocorrência das palavras-chaves.

Foi conduzida uma análise dos *clusters* das palavras-chave presentes nos artigos. Observa-se que as palavras “economia circular” e “weee” ocupam uma posição central, estando relacionadas a todas as outras. Algumas palavras-chave ficam associadas a um grupo específico, e não a todas as demais (Loch; Giglio; Campos, 2018). Assim, dentre as 13 palavras-chave distintas nos artigos, o programa gerou 4 *clusters*.

O *cluster* verde está diretamente relacionado à gestão e ao gerenciamento dos REEE com apli-

cação dos conceitos da economia circular e da sustentabilidade. Já o *cluster* azul representa artigos ligados à reutilização dos REEE e à eficiência dos recursos empregados, tido como principal foco da economia circular, uma vez que estende o tempo de vida útil dos produtos.

O terceiro *cluster* a ser comentado é o vermelho. Este está relacionado a estratégias de reciclagem dos REEE e ao aproveitamento do material presente nesses resíduos, como os metais preciosos e os elementos de terra rara. Na mesma linha de

estudo está o *cluster* amarelo, que compreende artigos sobre o tema de mineração urbana e aproveitamento dos recursos naturais essenciais que estão presentes nos REEE, como os Critical Raw Materials (CRMs), que são materiais críticos e estratégicos para a economia e a indústria, que podem enfrentar desafios de provisão e risco de escassez. Dessa forma, constata-se que o tema reciclagem, acoplado à mineração urbana, tem recebido mais enfoque que a reutilização, fato também observado no artigo publicado por Anandh *et al.* (2021).

### 3.6 Revisão sistemática

Os artigos selecionados para a pesquisa passaram por uma revisão sistemática, revelando que esses estudos se concentram em aspectos da gestão e do gerenciamento dos REEE (9 artigos), mineração urbana (8 artigos) e potencial de reutilização e reciclagem (10 artigos).

#### 3.6.1 Gestão e gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos (REEE)

A correta gestão e o gerenciamento de REEE desempenham um papel crucial para se alcançar as metas da economia circular. Por meio do gerenciamento adequado, os REEE podem ser coletados, desmontados, separados e processados para recuperar metais, plásticos e outros materiais valiosos. Esses materiais podem então ser reintroduzidos na cadeia de suprimentos como novas matérias-primas, substituindo a necessidade de extrair recursos naturais virgens. Nesse contexto, várias pesquisas têm sido desenvolvidas na área.

Brito *et al.* (2022) analisaram a cadeia de remanufatura reversa de EEE e REEE e sua interação com a economia circular na Recicladora Urbana (Reurbi), em São Paulo, Brasil. A análise foi realizada por meio de métodos qualitativos com entrevistas que explanaram questões como motivos para trabalhar com EEE e REEE em fim de vida; volumes de materiais comercializados e situação do mercado.

Os referidos autores concluíram que o mercado de EEE remanufaturados em fim de vida é pequeno; os desmontadores doam EEE remanufaturados para uma organização não governamental (ONG) em troca do benefício indireto da dedução do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS); não existe um mercado consolidado para peças e componentes de EEE pós-consumo, e os desmontadores encaminham esses materiais para empresas de reciclagem. Brito *et al.* (2022) consideram que existe um grande potencial de mercado relacionado à logística reversa de REEE e EEE em fim de vida, como fonte de matéria-prima, e que ainda precisa ser explorado no Brasil, gerando novos empregos e renda.

Por sua vez, Kumar *et al.* (2022) consideraram a perspectiva de várias partes interessadas para identificar facilitadores da gestão sustentável de REEE em uma economia emergente, a Índia. O estudo utilizou o método Delphi para finalizar os capacitadores identificados a partir de uma revisão abrangente da literatura que resultou numa lista de 23 facilitadores, sendo os mais importantes: responsabilidade estendida do produtor, monitoramento de importação ilegal e despejo, regulamentos ambientais e políticas de REEE, e uso de tecnologias verdes ou mais limpas para reciclagem de resíduos. Kumar *et al.* (2022) afirmam que a conscientização da comunidade é o facilitador mais significativo para a gestão sustentável de REEE. Isso envolve a disseminação do conhecimento sobre reciclagem, o descarte adequado, a reutilização de produtos e a eliminação de tóxicos.

No estudo desenvolvido por Aminoff e Sundqvist-Andberg (2021) foram investigados os fatores que levam a restrições e bloqueios para implementação da economia circular na gestão de REEE na Finlândia. O método consistiu em estudo de caso único e integrado com coleta de dados primários obtidos através de entrevistas semiestruturadas. As principais restrições levantadas foram categorizadas em: organizacional, cadeia

de suprimentos, econômica e de mercado, institucional e de infraestrutura e tecnológica, com destaque na interação entre essas restrições, que podem impedir a implementação de soluções avançadas de reciclagem e bloqueio no sistema de EC. Os autores concluíram que responsabilidade estendida do produtor, questões técnico-econômicas e tensões na cadeia de suprimentos são os principais bloqueios à implementação da economia circular e transformação no sistema de gestão de REEE.

Phoochinda e Kriyapak (2021) estudaram a situação do setor de reciclagem de REEE na Tailândia por meio da utilização do Balanced Scorecard, que considera indicadores de eficácia, gerenciamento de REEE, grupos-alvo e aprendizado e desenvolvimento. Em seguida, foi realizada uma avaliação da oportunidade de negócios no gerenciamento de REEE, fornecendo diretrizes para orientar o desenvolvimento do setor de reciclagem de REEE na Tailândia.

Os desafios no gerenciamento de REEE na Tailândia incluem falta de infraestrutura, ausência de um sistema eficiente de gerenciamento de resíduos sólidos, falta de diretrizes claras e conscientização limitada sobre o valor dos REEE. Isso resulta em descarte inadequado, com risco de poluição química. A coleta informal de resíduos de alto valor também apresenta preocupações de segurança e exposição a produtos químicos prejudiciais. Além disso, o estudo identificou um potencial de valor significativo, estimado em mais de 9 bilhões de bahts, na reciclagem de REEE no país, levando em conta o volume gerado e a presença de materiais valiosos. Esse potencial indica oportunidades de crescimento no mercado de reciclagem de REEE no país (Phoochinda; Kriyapak, 2021).

Ainda no sentido de melhorar o sistema de gerenciamento de REEE, Islam e Huda (2020b) empregaram uma abordagem combinada de processo Delphi-Analytic Hierarchy (AHP) para

identificar os EEE críticos em fim de vida que precisam ser considerados no futuro gerenciamento de REEE na Austrália. Após análise da composição do material de cada produto e aplicação do referido método, 22 produtos significativos foram identificados. A análise de sensibilidade revelou variações na classificação dos produtos, mas os pequenos equipamentos, painéis solares fotovoltaicos e máquinas de lavar mantiveram posições consistentes na lista.

Outro ponto relevante e documentado nos estudos é a decisão de gerenciamento REEE dos consumidores, isto é, estocagem, retenção, reutilização e descarte de REEE influenciam fortemente o potencial de exploração de uma Mina Urbana Distinta. Uma pesquisa realizada em Southampton, Reino Unido, por Wilkinson e Williams (2020) revelou altos níveis de propriedade de HE, com uma média de 12 itens por família. Essa acumulação ocorre especialmente com dispositivos menores ou mais antigos, devido ao valor residual percebido. Para incentivar a recuperação de HE no final de vida útil, é necessário estabelecer pontos de coleta de REEE convenientes, promover campanhas de sensibilização e oferecer incentivos.

Na mesma linha de pesquisa, Nowakowski (2019) buscou identificar as razões pelas quais as pessoas armazenam EEE em fim de vida na Polônia. Os resultados indicam que a escolaridade, a idade, o gênero e o tipo de residência influenciam os padrões comportamentais de descarte de equipamentos, e a principal motivação para o armazenamento é a possibilidade de uso futuro dos equipamentos. O autor também traz à tona a necessidade de campanhas de conscientização para reduzir o armazenamento desnecessário de EEE.

Marconi *et al.* (2018) estudaram a reutilização de plástico de cabos elétricos e demonstraram que a implementação de modelos de simbiose industrial no setor de REEE pode resultar em cenários benéficos para todas as partes interessadas. Os

autores concluíram que os componentes/materiais em fim de vida podem ser reutilizados em diversas aplicações, e a abordagem e a plataforma propostas são capazes de identificar possíveis oportunidades de colaboração entre as partes interessadas, criando ciclos de vida fechados por meio da simbiose industrial.

Parajuly e Wenzel (2017b) propuseram apresentar uma estrutura conceitual baseada na Abordagem de Família de Produtos (PFA) para abordar os desafios do gerenciamento de REEE e facilitar a implementação da economia circular à indústria eletrônica. Os resultados indicaram que uma melhor categorização de EEE tem o potencial de melhorar a recuperação de material em fim de vida e facilitar a reutilização, a reforma e a remanufatura. Além disso, um sistema de coleta aprimorado, uma plataforma de pré-classificação e teste e um processamento centrado na família de produtos são os principais pontos identificados para melhoria do gerenciamento de REEE.

### 3.6.2 Mineração urbana

A mineração urbana é uma abordagem inovadora que busca resolver o esgotamento dos recursos naturais e reduzir a pegada de carbono associada à recuperação de metais a partir de fontes primárias. Por meio da reciclagem e do reaproveitamento de metais contidos nos REEE, a mineração urbana promove uma economia circular, transformando os resíduos em uma valiosa fonte secundária de metais (Baniyadi *et al.*, 2021). Para alcançar esse objetivo, métodos tradicionalmente utilizados na indústria de mineração, como pirometalurgia, hidrometalurgia e biolixiviação, podem ser aplicados para extrair os metais preciosos e valiosos presentes nos REEE, como explanado nos estudos a seguir.

No estudo realizado por Dong *et al.* (2022), foi adotada uma abordagem de Análise de Fluxo de Material (AFM) e Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para modelar a dinâmica de estoque e fluxo do cobre. Os impactos ambientais da produção

secundária de cobre a partir de diferentes tipos de resíduos, como os REEE, foram explorados, investigando o potencial de redução da demanda primária de cobre e dos impactos ambientais associados na China. Foi constatado que, ao maximizar essas opções de “resíduo zero”, é possível obter um potencial de redução de 65% na demanda primária de cobre e aproximadamente 55% na redução potencial das emissões totais de gases de efeito estufa (GEE) e na demanda cumulativa total de energia até o ano de 2100.

Os autores supracitados também chegaram à conclusão de que a prevenção de resíduos deve ser a primeira prioridade; a reutilização é preferível à reciclagem, mas pode ser difícil de implementar em todas as indústrias da China, pois exige tecnologias adequadas para desmontar e remanufaturar de forma eficaz e eficiente e os altos custos das peças sobressalentes também tornam a remanufatura de certos produtos não lucrativa. A reciclagem é a principal opção para o aproveitamento de produtos de cobre no fim de vida, sendo que a reciclagem informal desempenha um papel significativo nos setores de REEE.

Na perspectiva do fluxo fechado do cobre, Baniyadi *et al.* (2021) avaliaram a recuperação do cobre, que representa 20% do peso das placas de circuito impresso (PCI) por biolixiviação por eletroextração. Seus resultados demonstraram que 75,8% do cobre disponível em PCI foram recuperados como uma folha de cobre de alta qualidade, com 99% de pureza.

De acordo com Charles *et al.* (2020), um conjunto de testes industriais mostraram que a desmontagem, a separação e a concentração de componentes de REEE podem ser eficazes na recuperação de Matérias Primas Críticas (MPC), mas o *design* e a falta de infraestrutura de recuperação adequada representam uma grande barreira para aumentar as taxas de reciclagem.

A recuperação pirometalúrgica tem limitações na recuperação de MPC, enquanto a recuperação de metais preciosos e do grupo da platina em placas de circuito impresso (PCBs) é mais viável. Para melhorar as perspectivas de eventual recuperação, o criocraqueamento é um método promissor para a desmontagem rápida de itens com invólucros de plástico, como telefones celulares; as guilhotinas podem ser usadas para abrir rapidamente caixas de LCD e cortar peças ricas em CRM ou de baixo valor de PCBs; e tratamento de banho de solda é útil para desmontagem de PCBs com peneiramento subsequente para segregar componentes desmontados simultaneamente de acordo com o potencial de reutilização e/ou conteúdo de CRM para recuperação de CRM a jusante. Cada um desses processos requer investimento de capital relativamente baixo e é potencialmente adequado para o mundo em desenvolvimento (Charles *et al.*, 2020).

No estudo realizado por Oestreicher *et al.* (2020) os REEE foram utilizados como fonte de ouro para a produção de nanopartículas de ouro estáveis (AuNP). A metodologia envolveu etapas de separação física e química, adaptadas às características complexas do REEE selecionado e do produto final. Esse estudo de caso demonstra que o REEE pode ser uma alternativa bem-sucedida às matérias-primas na obtenção de nanomateriais valiosos e úteis.

Ainda no contexto de extração de materiais preciosos presentes nos REEE, Marra, Cesaro e Belgiorno (2019) analisaram o potencial de recuperação de metais estratégicos, como metais preciosos e elementos de terras raras (REEs), por meio de um processo de lixiviação em várias etapas. O foco foi no pó resultante do tratamento industrial de trituração de REEE. Alumínio, cádmio, níquel e zinco foram completamente dissolvidos na solução de ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio, enquanto cerca de 80% do cobre foi extraído; além disso,  $53 \pm 15\%$  de ouro

foi extraído em uma segunda etapa de lixiviação. O processo de lixiviação proposto demonstrou o potencial da hidrometalurgia na recuperação de metais valiosos e críticos presentes na poeira resultante da trituração de REEE, promovendo uma abordagem circular.

Marra *et al.* (2018) analisaram a biolixiviação em duas etapas para recuperar metais básicos, metais preciosos e elementos de terras raras de poeiras resultantes da trituração de REEE. Na primeira etapa, os metais básicos foram efetivamente lixiviados da poeira em 8 dias pelo *Acidithiobacillus thiooxidans* (DSM 9463), resultando em altas taxas de mobilização para cério, európio e neodímio (>99%), e rendimentos de extração de 80% para lantânio e ítrio. Na segunda etapa, a bactéria *Pseudomonas putida* WSC361 mobilizou 48% do ouro da poeira lixiviada pelo *A. thiooxidans* em apenas 3 horas. Os autores reafirmaram o potencial de aplicação da biohidrometalurgia para a recuperação de recursos a partir do pó de trituração de REEE.

Ueberschaar *et al.* (2017) identificaram barreiras na recuperação de tântalo, uma matéria-prima crítica, presentes nos REEE. Foram observadas grandes diferenças na aplicação de tântalo nos REEE, assim o potencial de tântalo de dispositivos colocados no mercado ou de REEE difere entre produtos e regiões. Em termos gerais, é possível a reciclagem de tântalo de REEE, no entanto a remoção dos tântalos visualmente identificáveis (VICs) não permite a separação completa do tântalo contido nos dispositivos. A taxa de separação é inferior a 60% para monitores de tela plana e HDDs, e ainda menor para *smartphones* e PCs de mesa. Além disso, a separação dos VICs resulta na remoção de até 50% da prata presente nos dispositivos, devido ao *design* dos VICs e ao uso de conectores prateados. Isso cria um desafio significativo para o processo de reciclagem.

Por fim, Wagner *et al.* (2019) apresentaram estratégias de reciclagem de plásticos de REEE. Foram apresentadas análises SWOT e estratégias de reciclagem, com ênfase na viabilidade técnica e econômica. Os resultados mostraram um alto potencial de recuperação de valor dos plásticos utilizados nas tampas traseiras de TVs LCD.

### 3.6.3 Potencial de reutilização e de reciclagem

As tendências de consumo de EEE estão crescendo nos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Dessa forma, torna-se fundamental, como ferramenta de gerenciamento, a estimativa de geração de EEE e REEE, o potencial de reutilização, remanufatura e reciclagem, e a identificação do potencial de receita líquida, possivelmente obtidos através da implementação dessas atividades, sugeridas pela economia circular. Foram esses fatores que os próximos autores dessa revisão investigaram em seus trabalhos. Além disso, esses estudos fornecem informações úteis sobre a composição dos REEE e sua importância nos processos de recuperação de materiais.

Panchal, Singh e Diwan (2021) realizaram um importante trabalho de avaliação do potencial econômico dos recursos secundários (matérias-primas comuns, preciosas e críticas) presentes nos REEE em função dos preços de mercado na Índia. O “Modelo de Oferta de Mercado” foi empregado para estimar a geração de REEE usando dados de EEE colocados no mercado juntamente com a estimativa de vida útil média do produto. A taxa de reciclagem de cada metal foi considerada para determinar a quantidade de metal que pode ser extraída após a reciclagem.

Foi constatado que o consumo de eletroeletrônicos está aumentando constantemente. Além do cobre, que apresenta a maior quantidade disponível para reciclagem (637,2 Kt), os principais materiais comuns disponíveis em quantidade são plásticos, vidro, estanho, aço/ferro e alumínio, que têm 484,2 Kt, 128 Kt, 14,1 Kt, 11,8 Kt

e 1,1 Kt embutidos na coleta estimada de REEE, e suas taxas de reciclagem são de 25%, 95%, 75%, 80% e 60%, respectivamente (Panchal; Singh; Diwan, 2021).

Os materiais disponíveis em menor quantidade seriam: cromo (0,076 ton), molibdênio (0,048 ton), titânio (2,78 ton) e tungstênio (2,78 ton). A taxa de reciclagem desses metais é de 87%, 30%, 91% e 25%, respectivamente. Os metais preciosos levados em consideração foram prata (395,6 toneladas), níquel (98,5 toneladas) e ouro (88,6 toneladas), com taxas de reciclagem de 58%, 63% e 40%, e podem fornecer cerca de 229,4 toneladas, 62,1 toneladas e 35,4 toneladas, respectivamente. A quantidade máxima de matérias-primas críticas está disponível em antimônio (669 toneladas em 2019-20), seguido de ítrio (103 toneladas em 2019-20), paládio (42,4 toneladas em 2019-2020) e európio (7,5 toneladas em 2019-2020) (Panchal; Singh; Diwan, 2021).

Através da aplicação da Análise de Fluxo de Material e da Avaliação do Ciclo de Vida, Meester *et al.* (2019) anteciparam os fluxos de materiais e avaliaram os potenciais benefícios ambientais da cadeia de reciclagem. A partir de um estudo de caso em Flandres, na Bélgica, constatou-se que apenas 32% dos materiais de REEE são atualmente reciclados para aplicações de alto nível, enquanto 68% são perdidos em aplicações de baixo custo, aterros sanitários ou incineração. Metais ferrosos, não ferrosos, preciosos e plásticos têm diferentes taxas de recuperação de materiais de alta qualidade. Além disso, o estudo enfatiza o comportamento do consumidor e o progresso tecnológico como os fatores mais promissores para melhorar a recuperação de materiais e obter benefícios ambientais significativos.

De acordo com Islam e Huda (2019), na Austrália, o crescimento médio anual da geração de REEE será de cerca de 3%, para o período projetado de 2018 a 2047. A quantidade de ferro recuperável e

de plástico foi estimada em 201 kt e 174 kt, respectivamente, em 2000, e espera-se que aumente para 1.315 kt e 1.051 kt até 2047. Os metais preciosos, como ouro (Au), platina (Pt) e paládio (Pd), mostraram uma tendência crescente ao longo do período de 2000 a 2047. Estima-se que aproximadamente 544 toneladas de prata (Ag) sejam recuperáveis até 2047. Em relação aos produtos não regulamentados no National Television and Computer Recycling Scheme (NCTCRS), o total de metais e plásticos recuperáveis foi de 546 kt em 2012, aumentando para 887 kt em 2017.

De forma geral, sugere-se que a reciclagem seja adotada apenas após esgotar as opções viáveis de reutilização, como uma abordagem prática para o gerenciamento sustentável desses equipamentos (Parajuly; Wenzel, 2017a; Shittu *et al.*, 2021). É sobre isso que versam os próximos artigos.

Além da eficiência de recursos, a reutilização de REEE é uma importante medida de prevenção de geração de resíduos, pois prolonga a vida útil do produto eletrônico (conservação de valor) (Ongondo *et al.*, 2013).

O mais citado estudo dessa revisão, realizado por Parajuly e Wenzel (2017), avaliou o potencial de reutilização e o potencial de reciclagem dos REEE domésticos coletados na Dinamarca. Para isso, um total de 4.704 kg de REEE dentro das frações de coleta de “pequenos aparelhos” e “monitores” foi coletado, depois foram estimadas as receitas potenciais de revenda, bem como de recuperação de material. Por fim, verificou-se que as frações de pequenos eletrodomésticos contêm 22% e monitores, 7% de produtos totalmente funcionais. Isso indica um potencial de revenda de até 247€ por gaiola de REEE domésticos coletados.

Shittu *et al.* (2021) por sua vez, avaliaram o potencial de reutilização de REEE provenientes de um alojamento de estudantes na Universidade de Southampton, no Reino Unido. Houve três períodos de pesquisa, junho, julho e setembro

de 2019. Os métodos empregados neste projeto foram baseados no estudo de caracterização de REEE realizado por Parajuly e Wenzel (2017). Os resultados revelaram que 97% itens inspecionados eram reutilizáveis, e foram doados a instituições de caridade. O estudo fornece evidências de que o sistema de recuperação de REEE baseado em reutilização promove um meio eficaz para prolongar o tempo de vida dos EEE. Além disso, os autores recomendaram fortemente a implementação de um sistema estrategicamente planejado e adaptado nas universidades para a recuperação e redistribuição de EEE.

Messmann *et al.* (2019) desenvolveram uma metodologia para avaliar o quantitativo de resíduos potencialmente reutilizáveis no estado alemão da Baviera. Depois, a partir de dados primários obtidos de 61 pontos de coleta, quantifica um potencial teórico para a preparação para reutilização de 3.827 REEE, 1.132 móveis usados e 245 bens de lazer usados no estado alemão da Baviera. Como resultado, foi observado que 13% a 16% dos fluxos de resíduos podem ser imediatamente reutilizados, dependendo do tipo de resíduo. Além disso, um potencial adicional de 13% a 29% poderia ser aproveitado por meio de mudanças no processo de coleta, armazenamento e tratamento de resíduos nos pontos de coleta.

Em seu estudo, Shittu, Williams e Shaw (2022) visaram avaliar o potencial de reutilização de REEE e sua integração na economia circular por meio de pesquisa *online* em um grupo regional de universidades do Reino Unido. Os resultados revelaram prática frequente de estocagem e acumulação. Estimativas indicaram o acúmulo de cerca de 400.000 pequenos EEE na área pesquisada e mais de 17 milhões de dispositivos em todo o Reino Unido, com valores de reutilização estimados em mais de £13 milhões e £571 milhões, respectivamente.

Coughlan, Fitzpatrick, McMahon (2018) analisaram o potencial de reutilização de um total de 246 *notebooks*, usando uma metodologia desenvolvida para identificar, testar, analisar e desmontar dispositivos adequados para reaproveitamento. Os resultados indicaram 9% de *notebooks* adequados para reaproveitamento como computadores thin cliente. Além disso, uma ACV baseada na Demanda Cumulativa de Energia (CED) mostrou economias significativas ao estender a vida útil dos *notebooks*, compensando a produção de novos computadores thin client em várias situações.

No mesmo contexto, Ongondo *et al.* (2013) estudaram a atividade de reutilização de equipamentos de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) tratados pelas empresas socioeconômicas no Reino Unido, em 2010. Nesse mesmo ano, foram reutilizados cerca de 143.750,0 aparelhos. No entanto, não foi possível prever a quantidade de EEE colocados no mercado ou a quantidade de REEE gerados. Os autores observaram que as maiores barreiras à reutilização eram as dificuldades na comercialização dos produtos e as exigências legislativas numerosas.

De acordo com McMahon, Johnson e Fitzpatrick (2019), os fatores relatados em entrevistas como facilitadores ou inibidores do sucesso da preparação para a reutilização em estados-membros da União Europeia bem-sucedidos na atividade, como no Reino Unido, na Bélgica, na França, na Áustria e na Espanha, foram comparados com o sistema utilizado na Irlanda, que ainda não atingiu sucesso na preparação para a reutilização. Os resultados mostraram que os fatores-chave incluíram a participação de empresas sociais, a adoção de padrões de qualidade, o suporte de organizações de reutilização, o acesso aos materiais no ponto de entrega dos usuários finais e a promoção de relacionamentos positivos entre as organizações de preparação para reutilização e os produtores responsáveis pela gestão dos resí-

duos. No entanto, constatou-se que esses fatores estavam amplamente ausentes na Irlanda.

#### 4 CONCLUSÃO

Este artigo apresenta uma revisão bibliométrica e sistemática de 27 artigos selecionados especialmente para abordar o tema de avaliação do potencial da reutilização da reciclagem de REEE como vias de implementação da economia circular, no período de 2008 a 2022.

Na análise bibliométrica, foram avaliados alguns tópicos específicos: a distribuição geográfica das publicações, que identificou o Reino Unido e a Irlanda como os maiores promissores no tema trabalhado; a tendência do número de publicações ao longo dos anos, que mostrou o grande despertar a partir de 2017, com pico em 2019, e uma grande lacuna nos anos anteriores; os periódicos que mais publicaram no tema, no caso, o *Journal of Cleaner Production* e *Waste Management*; e o *ranking* dos artigos mais citados.

Por fim a esta avaliação quantitativa, foi realizada a análise das copalavras, por meio do *VOSviewer*. Os agrupamentos formados na rede de interação geraram 4 *cluster*, indicando a predominância de artigos com foco em gerenciamento dos REEE, reutilização, reciclagem e mineração urbana.

Na análise sistemática, comprovou-se os agrupamentos de subtemas apresentados na rede de interação. Predominou-se artigos nos temas de gerenciamento de REEE, enfatizado as barreiras e facilitadores, apontado como principal foco quando se pretende mudar de uma economia linear para circular no contexto dos REEE.

Os trabalhos selecionados têm foco, de forma bem numerosa, nas estratégias de recuperação das matérias-primas secundárias provenientes dos REEE, chamado de mineração urbana. Métodos de pirometalurgia, hidrometalurgia e biolixiviação podem ser aplicados para extrair os metais pre-



ciosos e valiosos presentes nos REEE, assim como aplicação tradicional nos processos de extração de minérios.

No que diz respeito à reutilização, a maior parte dos autores focaram em identificar, caracterizar e testar a funcionalidade, e condições visuais dos REEE para categorizar em reutilizáveis ou aptos apenas para reciclagem. A composição material, o potencial de reutilização e de reciclagem e os ganhos econômicos com estas atividades foram estimados em diferentes localidades, e para diferentes tipos de REEE.

## 5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

**Conceitualização:** Silva RMG; **Metodologia:** Silva RMG e Sá ACN; **Investigação:** Silva RMG; **Redação Primeira versão:** Silva RMG; **Redação Revisão & Edição:** Silva RMG, Nóbrega CC, Sá ACN, Firmino LQ e Souza GF; **Supervisão:** Nóbrega CC.

## 6 REFERÊNCIAS

AMINOFF, A.; SUNDQVIST-ANDBERG, H. Constraints leading to system-level lock-ins the case of electronic waste management in the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 322, p. 1-10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129029>

ANANDH, G. et al. Reuse assessment of WEEE: systematic review of emerging themes and research directions. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 287, nov. 2020, p. 112335, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112335>

ARAÚJO, C. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. **Em Questão**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 11-32, 2006.

ASSIS, T. I.; GONÇALVES, R. F. Valorization of food waste by anaerobic digestion: a bibliometric and systematic review focusing on optimization. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 320, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115763>

BALDÉ et al. **The Global e-waste Monitor**. Bonn, Geneva, Vienna: UNU, ITU, ISWA. 2017.

BANIASADI, M. et al. Closed-loop recycling of copper from waste printed circuit boards using bioleaching and electro-winning processes. **Waste and Biomass Valorization**, Berlin, v. 12, n. 6, p. 3125-3136, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01128-9>

BRAMER, W. M. et al. Optimal database combinations for literature searches in systematic reviews: A prospective exploratory study. **Systematic Reviews**, Berlin, v. 6, n. 1, p. 1-12, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13643-017-0644-y>

BRITO, J. L. R. et al. Reverse remanufacturing of electrical and electronic equipment and the circular economy. **Revista de Gestão**, São Paulo, v. 29, n. 4, p. 380-394, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1108/REG-02-2020-0011>

CESARO, A. et al. WEEE management in a circular economy perspective: An overview. **Global Nest Journal**, [S. l.], v. 20, n. 4, p. 743-750, 2018. DOI: <https://doi.org/10.30955/gnj.002623>

CHARLES, R. G. et al. Towards increased recovery of critical raw materials from WEEE – evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 161, p. 1-21, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104923>

COUGHLAN, D.; FITZPATRICK, C.; MCMAHON, M. Repurposing end of life notebook computers from consumer WEEE as thin client computers – A hybrid end of life strategy for the Circular Economy in electronics. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 192, p. 809-820, 2018.

DONG, D. et al. Assessing China's potential for reducing primary copper demand and associated environmental impacts in the context of energy transition and “Zero waste” policies. **Waste Management**, Amsterdam, v. 144, p. 454-467, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.006>

FARIAS, F. G. et al. Uma década de estudos sobre economia circular: tendências e reflexões através de Análise Bibliométrica Internacional. **Internext**, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 289-305, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18568/internext.v16i3.647>

FORTI, V. et al. **The Global E-waste Monitor 2020**: quantities, flows, and the circular economy potential. Geneva: UNU, 2020. Disponível em: [https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM\\_2020\\_def\\_july1\\_low.pdf](https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf). Acesso em: 27 ago. 2024.

GOOSEY, E.; GOOSEY, M. Introduction and Overview. In: EDULJEE, G. H.; HARISSON, R. M. (Eds.). **Electronic Waste Management**. London: Royal Society of Chemistry, 2020. p. 1-32.

HIGGINS, J. P. T. et al. (Eds.). **Manual Cochrane para revisões sistemáticas de intervenções versão 6.3** (atualizado em fevereiro de 2022). Cochrane, 2022. Disponível em: <https://training.cochrane.org/handbook/current>

HU, X. et al. Mapping the research on desulfurization wastewater: Insights from a bibliometric review (1991-2021). **Chemosphere**, Amsterdam, v. 314, e137678, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137678>

- ISLAM, M. T.; HUDA, N. E-waste in Australia: Generation estimation and untapped material recovery and revenue potential. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 237, e117787, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117787>
- ISLAM, M. T.; HUDA, N. Assessing the recycling potential of “unregulated” e-waste in Australia. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 152, Amsterdam, e104526, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104526>
- ISLAM, M. T.; HUDA, N. Reshaping WEEE management in Australia: an investigation on the untapped WEEE products. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 250, e119496, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119496>
- KEY, J. How to undertake a literature search: Enhancing your search. **British Journal of Nursing**, London, v. 29, n. 8, p. 481-483, 2020. DOI: <https://doi.org/10.12968/bjon.2020.29.8.481>
- KUMAR, A. et al. Sustainable waste electrical and electronic equipment management guide in emerging economies context: a structural model approach. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 336, e130391, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130391>
- LARIVIÈRE, V.; SUGIMOTO, C. R. The journal impact factor: a brief history, critique, and discussion of adverse effects. In: GLANZEL, W. et al. (Eds.). **Springer Handbook of science and technology indicators**. Cham: Springer, 2019. p. 3-24.
- LI, Y. et al. Sources of atmospheric pollution: a bibliometric analysis. **Scientometrics**, Amsterdam, v. 112, n. 2, p. 1025-1045, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2421-z>
- LOCH, E. N.; GIGLIO, R. F.; CAMPOS, L. M. S. **Lean startup: revisão da literatura utilizando redes de co-ocorrência**. Engetec, p. 1-10, 2018. Disponível em: [https://www.fateczl.edu.br/engetec/engetec\\_2018/ENGETEC\\_2018\\_paper\\_27.pdf](https://www.fateczl.edu.br/engetec/engetec_2018/ENGETEC_2018_paper_27.pdf). Acesso em: 27 ago. 2024.
- MACARTHUR, E. **Potential for Denmark as a Circular Economy**: delivering the circular economy e a toolkit for policymakers. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2015.
- MACARTHUR, E. et al. Towards the circular economy. Economic and business rationale for a circular economy. **Journal of Industrial Ecology**, [S. l.], v. 1. n. 1, 2013.
- MACARTHUR, E.; WAUGHDRAY, D. **Intelligent Assets**: Unlocking the circular economy potential. Cowes: Ellen MacArthur Foundation, 2016.
- MARCONI, M. et al. An approach to favor industrial symbiosis: The case of waste electrical and electronic equipment. **Procedia Manufacturing**, Amsterdam, v. 21, p. 502-509, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.150>
- MARRA, A. et al. Bioleaching of metals from WEEE shredding dust. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 210, p. 180-190, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.066>
- MARRA, A.; CESARO, A.; BELGIORNO, V. Recovery opportunities of valuable and critical elements from WEEE treatment residues by hydrometallurgical processes. **Environmental Science and Pollution Research**, Amsterdam, v. 26, n. 19, p. 19897-19905, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05406-5>
- MCCMAHON, K.; JOHNSON, M.; FITZPATRICK, C. Enabling preparation for re-use of waste electrical and electronic equipment in Ireland: Lessons from other EU member states. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 232, p. 1005-1017, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.339>
- MEESTER, S. et al. Using material flow analysis and life cycle assessment in decision support: A case study on WEEE valorization in Belgium. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 142, p. 1-9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.015>
- MESSMANN, L. et al. Potentials of preparation for reuse: a case study at collection points in the German state of Bavaria. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 211, p. 1534-1546, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.264>
- NETO, J. F. O. et al. Waste of electrical and electronic equipment management from the perspective of a circular economy: A Review. **Waste Management and Research**, London, v. 41, n. 4, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X221135341>
- NOWAKOWSKI, P. Investigating the reasons for storage of WEEE by residents – A potential for removal from households. **Waste Management**, Amsterdam, v. 87, p. 192-203, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.008>
- OESTREICHER, V. et al. E-waste upcycling for the synthesis of plasmonic responsive gold nanoparticles. **Waste Management**, Amsterdam, v. 117, p. 9-17, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.037>
- ONGONDO, F. O. et al. ICT reuse in socio-economic enterprises. **Waste Management**, Amsterdam, v. 33, n. 12, p. 2600-2606, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.08.020>
- OPRIS, S. Electronics: A broken story about production and consumption. In: EDULJEE, G. H.; HARISSON, R. M. (Eds.). **Electronic Waste Management**. London: Royal Society of Chemistry, 2020. p. 213-245.
- OWAN, V. J.; AGUROKPON, D. C. **A digital library for researchers, scientists, and scholars**: Mendeley desktop application. Hershey: IGI Global, 2022.
- PANCHAL, R.; SINGH, A.; DIWAN, H. Economic potential of recycling e-waste in India and its impact on import of mate-

- rials. **Resources Policy**, Amsterdam, v. 74, e102264, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102264>
- PARAJULY, K.; WENZEL, H. Potential for circular economy in household WEEE management. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 151, p. 272-285, 2017a. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.045>
- PARAJULY, K.; WENZEL, H. Product family approach in e-waste management: a conceptual framework for circular economy. **Sustainability (Switzerland)**, Basel, v. 9, n. 5, p. 1-14, 2017b. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9050768>
- PHOOCHINDA, W.; KRIYAPAK, S. Electronic waste recycling business: solution, choice, survival. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, [S. l.], v. 16, n. 4, p. 693-700, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijstdp.160409>
- POLAT, Z. A. et al. Global scientific production on LADM-based research: A bibliometric analysis from 2012 to 2020. **Land Use Policy**, Amsterdam, v. 112, e105847, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105847>
- RAVIKUMAR, S.; BORUAH, B. B.; RAVIKUMAR, M. N. Correlation study between citation count and Mendeley readership of the articles of Sri Lankan authors. **Scientometrics**, Berlin, v. 127, n. 8, p. 4873-4885, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-022-04470-y>
- SAUVÉ, Sébastien; BERNARD, Sophie; SLOAN, Pamela. Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. **Environmental Development**, Amsterdam, v. 17, p. 48-56, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.09.002>
- SETIAWAN, A. M. et al. The user experience of Indonesian science teacher about Mendeley. INTERNATIONAL CONFERENCE ON CHEMISTRY AND SCIENCE EDUCATION, 2., Padang, 2021. **Proceedings [...]**. Melville, AIP Publishing, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0125145>
- SHITTU, O. S. et al. Demonstrating EEE recovery for reuse in a distinct urban mine: a case study. **Detritus**, Amsterdam, v. 15, p. 78-93, 2021. DOI: <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2021.15091>
- SHITTU, O. S.; WILLIAMS, I. D.; SHAW, P. J. Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges. **Waste Management**, Amsterdam, v. 120, p. 549-563, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.016>
- SHITTU, O. S.; WILLIAMS, I. D.; SHAW, P. J. Prospecting reusable small electrical and electronic equipment (EEE) in distinct anthropogenic spaces. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 176, e105908, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105908>
- SILVA, T. S. **Impacto da gestão socioambiental em rede colaborativa do Comitê Ecos de Pernambuco nos Planos de Logística Sustentável institucionais**. 2021. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2021.
- STAHEL, W. R. The circular economy. **Nature News**, London, v. 531, n. 7595, p. 435, 2016.
- TSAI, F. M., BUI, T., TSENG, M., LIM, M. K., HU, J. Municipal solid waste management in a circular economy: A data-driven bibliometric analysis. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 275, e124132, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124132>
- UEBERSCHAAR, M. et al. Potentials and Barriers for Tantalum Recovery from Waste Electric and Electronic Equipment. **Journal of Industrial Ecology**, Amsterdam, v. 21, n. 3, p. 700-714, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.12577>
- VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, Berlin, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- WAGNER, F. et al. Towards a more circular economy for WEEE plastics – Part A: Development of innovative recycling strategies. **Waste Management**, Amsterdam, v. 100, p. 269-277, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.09.026>
- WILKINSON, A.; WILLIAMS, I. Why do (W)eee hoard? the effect of consumer behaviour on the release of home entertainment products into the circular economy. **Detritus**, Padova, v. 12, p. 18-33, 2020. DOI: <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.14004>
- ZUPIC, I.; ČATER, T. Bibliometric Methods in Management and Organization. **Organizational Research Methods**, London, v. 18, n. 3, p. 429-472, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>