



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS CONTÁBEIS E ATUARIAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CONTÁBEIS  
DOUTORADO ACADÊMICO EM CIÊNCIAS CONTÁBEIS

WELLINGTON SILVA PORTO

**CiSS - CIRCULAR SUSTAINABILITY SCORECARD: DESAFIOS E  
PERSPECTIVAS DE UMA MÉTRICA INTEGRADA PARA A  
SUSTENTABILIDADE CIRCULAR**

Recife  
2021

WELLINGTON SILVA PORTO

**CiSS - CIRCULAR SUSTAINABILITY SCORECARD: DESAFIOS E  
PERSPECTIVAS DE UMA MÉTRICA INTEGRADA PARA A  
SUSTENTABILIDADE CIRCULAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Contábeis da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de doutor em Ciências Contábeis.

**Orientador:** Dr. Maurício Assuero Lima de Freitas

**Coorientador:** Dr. Alexandre Stamford da Silva

Recife  
2021

Catálogo na Fonte  
Bibliotecária Ângela de Fátima Correia Simões, CRB4-773

P853c

Porto, Wellington Silva

CiSS – Circular Sustainability Scorecard: desafios e perspectivas de uma métrica integrada para a sustentabilidade circular / Wellington Silva Porto. – 2021.

107 folhas: il. 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Assuero Lima de Freitas e Coorientador Prof. Dr. Alexandre Stamford da Silva

Tese (Doutorado em Ciências Contábeis) – Universidade Federal de Pernambuco, CCSA, 2021.

Inclui referências.

1. Lixo eletrônico Reaproveitamento. 2. Economia Social. 3. Sustentabilidade. I. Freitas, Maurício Assuero Lima de (Orientador). II. Silva, Alexandre Stamford da (Coorientador). III. Título.

657 CDD (22. ed.)

UFPE (CSA 2021 – 024)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS CONTÁBEIS E ATUARIAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CONTÁBEIS  
DOUTORADO ACADÊMICO EM CIÊNCIAS CONTÁBEIS

WELLINGTON SILVA PORTO

**CiSS - CIRCULAR SUSTAINABILITY SCORECARD: DESAFIOS E  
PERSPECTIVAS DE UMA MÉTRICA INTEGRADA PARA A  
SUSTENTABILIDADE CIRCULAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Contábeis da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de doutor em Ciências Contábeis.

Aprovado em 23/02/2021

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Maurício Assuero Lima de Freitas (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE/CCSA/PPGCC

---

Prof. Dr. Alexandre Stamford da Silva (Coorientador)  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE/CCSA/PPGCC

---

Prof. Dr. Vinícius Gomes Martins (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE/CCSA/PPGCC

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Lúcia Helena Xavier (Examinadora Externa)  
Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/RJ

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Monaliza de Oliveira Ferreira (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE/CAA/PPGEcon

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Carla Regina Pasa Gómez (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE/CCSA/PROPAD

*Dedico esta tese a você, minha esposa, Elisangela Pedrosa Porto,  
e a vocês, flechas da minha aljava, meus filhos, André, Gabriel, Letícia e Paulo.  
Esta vitória é nossa!*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Deus da minha vida, a Jesus de Nazaré, senhor e salvador da minha alma, e ao Espírito Santo de Deus, por seu cuidado e sua presença nos bons e maus momentos dessa desafiante e gratificante jornada. Sem essa Divina Trindade, nada faria sentido.

Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco, em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Contábeis pela acolhida e pelo inestimável aprendizado proporcionado, e a todo o corpo docente do PPGCC/UFPE e à secretária Tatiana, sempre predisposta a ajudar.

À CAPES pelo incentivo dado à qualificação, por meio da bolsa PRODUÇÃO.

Entre os docentes, não poderia deixar de agradecer especialmente ao professor Vinícius Gomes Martins, por suas primeiras orientações ao meu trabalho, por suas valiosas contribuições e questionamentos, sempre presentes desde a fase embrionária desta tese até este momento. Parabéns por sua didática e conhecimento! Quando crescer, quero ser como o senhor.

Agradeço imensamente ao professor Alexandre Stamford pela sua coorientação brilhante, certa e oportuna. Sinto-me privilegiado e honrado por tê-lo conhecido.

E aí vai o meu mais especial agradecimento entre os docentes do programa: Professor Maurício Assuero Lima de Freitas. O senhor foi muito mais que um excelente orientador. Foi um grande amigo, um conselheiro sábio, e um verdadeiro pai acadêmico nessa caminhada. Irrepreensível seria uma das palavras que o definiria nessa orientação. Minha eterna e mais sincera gratidão por tudo que o senhor fez por mim. Seu exemplo contagia e inspira a todos.

Aos meus grandes e maravilhosos amigos de turma: Lívia, Elyrouse, Juliana, Marco Túlio e Márcio. Foi uma honra lutar essa batalha ao lado de vocês. Vocês são incríveis e inesquecíveis. Amo vocês, meus amigos! Muito obrigado!

Minha eterna gratidão à minha esposa e testemunha da minha vida, Elisângela. Obrigado por simplesmente você existir! Obrigado por ser paciente com minha ausência, pelas suas orações e por cuidar de nossa família! Eu te amo! Vencemos, querida!

Ao meu grande amigo e companheiro de longas e proveitosas conversas, Francivaldo. Muito obrigado por suas dicas e orientações em momentos cruciais dos meus primeiros 2 anos!

Agradeço também ao meu amigo de longa data, José Arilson de Souza, por suas orações e apoio, sempre preocupado e generoso comigo e com minha família.

Agradeço ainda à dona Maria do Socorro, minha amada “mainha”, que tanto amo, e que suportou firmemente minha ausência. Mãe, consegui! Tô voltando pra cuidar da senhora!

Outro agradecimento especial vai para o meu filho André, por sua grande ajuda nas correções das traduções e por ser meu divã quando eu queria falar sobre a tese. Te amo!

Agradeço ao meu filho Gabriel por sua companhia no primeiro ano. Sua presença foi fundamental para minha adaptação e para manter minha sanidade naquele ano. Te amo! E aos meus filhos menores, Letícia e Paulo, minha gratidão, por entenderem minha ausência e pelas manifestações de amor em momentos essenciais para mim. Amo vocês!!

Ao meu amado irmão, Wagner, minha cunhada, Lidiane, e meu sobrinho, Felipe, pelas palavras de incentivo, orações e torcida. MUITÍSSIMO obrigado, queridos!!

Aos meus colegas de departamento da Universidade Federal de Rondônia.

À prima Mércia! Essa história, na verdade, começou por sua causa..rs. Obrigadíssimo!!

Por fim, a todos que contribuíram direta e indiretamente com esta tese. Obrigado!

“Você pode ignorar completamente todos os conceitos de economia circular, mas, se um dos seus concorrentes os adotar e for bem-sucedido, você então terá resolvido todos os seus problemas, pois a sua empresa desaparecerá. ”  
(STAHEL *apud* WEETMAN, 2019, p. 295)

## RESUMO

Há aproximadamente dois séculos ocorre a fabricação de bens de consumo em massa, produzidos segundo as diretrizes operacionais de um sistema industrial linear de concepção essencialmente degenerativa, onde ocorre a extração de materiais da natureza, com um intuito de gerar um produto, o qual, após consumido, é descartado, em função de uma estratégia consumista de obsolescência programada, perceptiva ou funcional. E embora esse modelo econômico, conhecido como Economia Linear, tenha proporcionado lucros satisfatórios para muitas empresas e desenvolvido diversas nações ao longo desse período, sua concepção é fundamentalmente uma via de mão única, e por isso, falha. As práticas de Economia Linear se distanciam dos parâmetros mínimos de sustentabilidade e não atendem aos interesses dos *stakeholders*. No caso da cadeia de suprimento de equipamentos eletroeletrônicos, esta é predominantemente linear, com crescimento exponencial dos e-resíduos e, apenas aproximadamente 20% desse tipo de resíduo tem tratamento e destinação adequados, sendo o restante descartado indevidamente ao final de sua vida útil. Para confrontar as práticas danosas da Economia Linear e identificar o posicionamento da empresa na construção de um paradigma regenerativo, baseado nos preceitos da Economia Circular, é preciso criar mecanismos de monitoramento capazes de informar o (des)equilíbrio entre as prioridades atendidas e as esperadas, tanto pelos acionistas quanto pelos *stakeholders*. Talvez assim, sinalizem o nível de discrepância entre a sustentabilidade alcançada e a desejada. Esta tese teve por objetivo propor um *scorecard* capaz de mensurar a performance corporativa das práticas sustentáveis baseadas no *Multiple Bottom Line* (MBL) e a aplicação dos princípios da Economia Circular, resultando, de forma integrada, em um *Circular Sustainability Scorecard* (CiSS). Este objetivo tem como campo de estudo o mercado industrial de produtos, subprodutos e resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (e-resíduos). A tese está dividida em três artigos. O primeiro aborda o comportamento dos e-resíduos ao longo do tempo e suas implicações para a sociedade, cujo resultado revelou uma mensagem preocupante, no sentido de que, não havendo medidas regulatórias mais rígidas, eficientes e eficazes, e não havendo uma mudança de paradigma no sistema produtivo, desde a extração até a destinação final, é possível que haja um colapso nos sistemas de escoamento, tratamento e disposição final de e-resíduos em escala global. O segundo traz uma reflexão sobre o mercado de e-resíduos, apresentando um cenário de oportunidades econômicas e sustentáveis, buscando apresentar o conceito de Economia Circular (EC) como fator-chave mitigador do crescimento do e-resíduo não coletado/tratado. A discussão mostrou que, considerando a concepção da sustentabilidade corporativa como fator-chave de sucesso no relacionamento com acionistas e demais partes interessadas, os parâmetros decisórios para a transição antecipada para a Economia Circular carecem da análise econômica, sem perder o foco das demais dimensões do *Multiple Bottom Line*. O terceiro busca construir o CiSS a partir de uma abordagem teórica que defende que a integração entre as abordagens do MBL e EC são fundamentais para um perfeito atendimento aos critérios de sustentabilidade corporativa. Tal integração resultou na abordagem teórica da sustentabilidade circular, mensurada a partir do CiSS. Os resultados mostraram que a concepção do CiSS supre a necessidade de mensuração e confronto do alinhamento da cadeia de valor definida pela empresa frente aos interesses de seus *stakeholders*. O CiSS se apresenta como uma métrica de sustentabilidade circular flexível, abrangente, de interface amigável, eficiente aos seus propósitos e comparável. Seu poder informacional reside prioritariamente na análise das discrepâncias de cada perspectiva analisada.

**Palavras-chave:** E-resíduo. Ponto de impaciência da sociedade. *Multiple Bottom Line*. Economia Circular. *Scorecard* de Sustentabilidade Circular.

## ABSTRACT

Mass consumer goods have been manufactured for approximately two centuries, produced according to the operational guidelines of a linear industrial system of essentially degenerative design, where the extraction of materials from nature takes place, with the aim of generating a product, which, after consumed, it is discarded due to a consumerist strategy of programmed, perceptual or functional obsolescence. And although this economic model, known as Linear Economy, has provided satisfactory profits for many companies and developed several nations during this period, its conception is fundamentally a one-way street, and therefore, it fails. Linear Economics practices distance themselves from the minimum sustainability parameters and do not meet the interests of stakeholders. In the case of the electronic equipment supply chain, this is predominantly linear, with exponential growth in e-waste, and only approximately 20% of this type of waste is properly treated and disposed of, the remainder being unduly discarded at the end of its useful life. . In order to confront the damaging practices of Linear Economics and identify the company's position in building a regenerative paradigm, based on the precepts of Circular Economy, it is necessary to create monitoring mechanisms capable of informing the (un) balance between the priorities served and those expected, both by shareholders and by stakeholders. Perhaps so, they signal the level of discrepancy between the sustainability achieved and the desired. This thesis aimed to propose a scorecard capable of measuring the corporate performance of sustainable practices based on the Multiple Bottom Line (MBL) and the application of the Circular Economy principles, resulting, in an integrated way, in a Circular Sustainability Scorecard (CiSS). This objective has as its field of study the industrial market for products, by-products and waste of electronic equipment (e-waste). The thesis is divided into three articles. The first addresses the behavior of e-waste over time and its implications for society, the result of which revealed a worrying message, in the sense that, with no more rigid, efficient and effective regulatory measures, and no paradigm shift in the production system, from extraction to final destination, it is possible that there will be a collapse in the flow, treatment and final disposal systems of e-waste on a global scale. The second brings a reflection on the e-waste market, presenting a scenario of economic and sustainable opportunities, seeking to present the concept of Circular Economy (EC) as a key mitigating factor for the growth of un-collected / treated e-waste. The discussion showed that, considering the concept of corporate sustainability as a key success factor in the relationship with shareholders and other interested parties, the decision parameters for the early transition to the Circular Economy lack economic analysis, without losing the focus of the other dimensions of the Multiple Bottom Line. The third seeks to build CiSS from a theoretical approach that argues that the integration between the MBL and EC approaches are fundamental for perfect compliance with the corporate sustainability criteria. Such integration resulted in the theoretical approach to circular sustainability, measured from CiSS. The results showed that the CiSS concept meets the need to measure and compare the value chain alignment defined by the company in the interests of its stakeholders. The CiSS presents itself as a flexible, comprehensive circular sustainability metric, with a friendly interface, efficient to its purposes and comparable. Its informational power lies primarily in the analysis of the discrepancies in each perspective analyzed.

**Keywords:** E-waste. Society's point of impatience. Multiple Bottom Line. Circular Economy. Circular Sustainability Scorecard.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b>	–	Resumo do relatório de geração de e-resíduo em 2016 no mundo.....	<b>21</b>
<b>Figura 2</b>	–	Lógica hipotético-dedutiva.....	<b>22</b>
<b>Figura 3</b>	–	Relação entre os artigos, objetivos e fases do método.....	<b>23</b>
<b>Figura 4</b>	–	Resumo do relatório de geração de e-resíduo em 2016 no mundo.....	<b>33</b>
<b>Figura 5</b>	–	E-resíduo global gerado e estimativas até 2021.....	<b>34</b>
<b>Figura 6</b>	–	Disposição e organização dos dados da Eurostat (2020).....	<b>36</b>
<b>Figura 7</b>	–	Coleta de e-resíduo na Holanda ao longo do tempo.....	<b>41</b>
<b>Figura 8</b>	–	Projeções de crescimento (tecnologia <i>versus</i> e-resíduo coletado) no tempo.....	<b>43</b>
<b>Figura 9</b>	–	Projeções de crescimento dos e-resíduos não coletados/tratados (W) em escala global no tempo.....	<b>44</b>
<b>Figura 10</b>	–	Comparação entre cenários de e-resíduo gerado e não coletado/tratado em escala global (2016 e o projetado em 2050).....	<b>45</b>
<b>Figura 11</b>	–	<i>Framework</i> do ensaio teórico para o mercado do e-resíduo.....	<b>50</b>
<b>Figura 12</b>	–	E-resíduo global gerado por ano.....	<b>51</b>
<b>Figura 13</b>	–	Analogia entre a estrutura do DNA e os critérios de sustentabilidade.....	<b>58</b>
<b>Figura 14</b>	–	Evolução das dimensões da sustentabilidade corporativa.....	<b>59</b>
<b>Figura 15</b>	–	Alinhamento das dimensões da sustentabilidade corporativa em direção ao ponto ótimo de ajuste de práticas e políticas, considerando a dimensão econômica como pedra angular e efeito do <i>Multiple Bottom Line</i> .....	<b>60</b>
<b>Figura 16</b>	–	Retângulo de recuperação.....	<b>62</b>
<b>Figura 17</b>	–	Valor estimado do fluxo de e-resíduos em 2014.....	<b>64</b>
<b>Figura 18</b>	–	Integração entre os princípios da Economia Circular e as dimensões do MBL.....	<b>72</b>
<b>Figura 19</b>	–	Curva de Lorenz.....	<b>74</b>
<b>Figura 20</b>	–	<i>Scorecard</i> de Sustentabilidade.....	<b>78</b>
<b>Figura 21</b>	–	<i>Scorecard</i> de Circularidade.....	<b>81</b>
<b>Figura 22</b>	–	Matriz de materialidade da Weg S/A em 2018.....	<b>83</b>
<b>Figura 23</b>	–	Matriz de materialidade da Weg S/A em 2019.....	<b>84</b>
<b>Figura 24</b>	–	Visão geral do menu de opções do <i>scorecard</i> , seus <i>inputs</i> e <i>outputs</i> .....	<b>86</b>
<b>Figura 25</b>	–	Resultados de pesquisa e suas conexões.....	<b>89</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b>	– Cenários decorrentes das possíveis relações entre os coeficientes $\alpha$ e $\beta$ ...	<b>35</b>
<b>Tabela 2</b>	– Composição amostral dos países da União Europeia.....	<b>37</b>
<b>Tabela 3</b>	– Correlação de Pearson.....	<b>38</b>
<b>Tabela 4</b>	– Parâmetros da regressão.....	<b>39</b>
<b>Tabela 5</b>	– Protocolo de análise de componentes principais para definição da dimensão econômica (2010 a 2019, com 4 indústrias do setor de EEE)....	<b>76</b>

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b>	– Fontes de exposição e impactos na saúde pública e meio ambiente.....	<b>53</b>
<b>Quadro 2</b>	– Classificação dos <i>loops</i> da EC.....	<b>62</b>
<b>Quadro 3</b>	– Indicadores para a dimensão econômica.....	<b>77</b>
<b>Quadro 4</b>	– Principais indicadores para o <i>Multiple Botton Line</i> (MBL).....	<b>80</b>
<b>Quadro 5</b>	– Principais indicadores de circularidade.....	<b>82</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>APGAR</b>	<i>Appearance, Pulse, Grimace, Activity, Respiration</i>
<b>CiSS</b>	<i>Circular Sustainability Scorecard</i>
<b>CPV</b>	Custo do Produto Vendido
<b>COBRAC</b>	Companhia Brasileira de Chumbo
<b>DNA</b>	Ácido Desoxirribonucleico
<b>EEE</b>	Equipamentos Eletroeletrônicos
<b>EC</b>	Economia Circular
<b>EGSEA</b>	Econômica, Governança, Social, Ética e Ambiental
<b>EPI</b>	Equipamento de Proteção Individual
<b>E-resíduo</b>	Resíduo de equipamento eletroeletrônico
<b>GCC</b>	<i>Gulf Cooperation Council</i>
<b>KMO</b>	Kaiser-Meyer-Olkin
<b>KPI</b>	<i>Key Performance Indicator</i>
<b>LCPRS</b>	Lei de Controle de Poluição de Resíduos Sólidos
<b>LPEC</b>	Lei de Promoção à Economia Circular
<b>LPPL</b>	Lei de Promoção da Produção Limpa
<b>MBL</b>	<i>Multiple Bottom Line</i>
<b>ONU</b>	Organização das Nações Unidas
<b>PCA</b>	<i>Principal Components Analysis</i>
<b>PCI</b>	Placas de Circuito Impresso
<b>PNRS</b>	Política Nacional de Resíduos Sólidos
<b>PPP</b>	<i>Purchasing Power Parity</i>
<b>REEE</b>	Resíduo de equipamento eletroeletrônico
<b>TBL</b>	<i>Triple Bottom Line</i>
<b>TIC</b>	Tecnologia de Informação e Comunicação
<b>UE</b>	União Europeia
<b>VM</b>	Valor de Mercado

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	15
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	18
1.2	Originalidade e contribuições da pesquisa	18
1.3	Estrutura do trabalho	20
<b>2</b>	<b>TEORIA DE BASE</b>	24
<b>3</b>	<b>DINÂMICA DO COMPORTAMENTO DO E-RESÍDUO GLOBALMENTE</b>	26
3.1	Introdução	27
3.2	Dimensão do problema dos e-resíduos	28
3.3	Material e método	34
3.4	Resultados e discussões	37
3.4.1	Resultados das regressões	38
3.4.2	Análise do volume de tecnologia na UE	39
3.4.3	A coleta de e-resíduo na Holanda	40
3.4.4	Análise do volume de e-resíduo coletado na UE	42
3.4.5	Projeções de e-resíduo não coletado/tratado	42
3.5	Conclusão	45
<b>4</b>	<b>BASTA! OU ELES, OU NÓS! UMA REFLEXÃO SOBRE O PONTO DE IMPACIÊNCIA DA SOCIEDADE NO MERCADO DO E-RESÍDUO SOB AS LENTES DO MULTIPLE BOTTOM LINE E DA ECONOMIA CIRCULAR</b>	48
4.1	Introdução	49
4.2	A dinâmica do e-resíduo como <i>driver</i> para uma metanoia disruptiva	50
4.2.1	O e-resíduo não coletado/tratado tende a explodir no tempo	51
4.2.2	O e-resíduo é uma questão social e de saúde pública	52
4.3	O ponto de impaciência da sociedade	54
4.4	A alternativa tem nome: antecipação	57
4.4.1	<i>Highlights</i> do marco teórico da sustentabilidade	57
4.4.2	A sustentabilidade e suas perspectivas em questão: qual a mais importante?	58
4.4.3	Sustentabilidade corporativa na prática: a Economia Circular é o caminho	60
4.4.3.1	O modelo de Economia Circular	61
4.4.3.2	Por que Economia Circular?	63
4.5	Conclusão	65
<b>5</b>	<b>SCORECARD DE SUSTENTABILIDADE CIRCULAR PARA O SETOR INDUSTRIAL DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS</b>	67
5.1	Introdução	68

5.2 A sustentabilidade circular e a integração de suas métricas .....	69
5.3 Material e método .....	73
5.4 Resultados obtidos.....	75
5.4.1 Componente principal para a dimensão econômica.....	75
5.4.3 <i>Scorecard</i> de circularidade.....	81
5.4.4 <i>Scorecard</i> de Sustentabilidade Circular .....	83
5.4.4.1 Matriz de materialidade .....	83
5.4.4.2 O CiSS e a Funcionalidade da planilha como um produto.....	84
5.5 Conclusão .....	86
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Crescimento exponencial da população mundial e do produto interno bruto, redução do preço médio dos recursos, aumento do comércio global, expansão e deslocamento das atividades fabris para economias em desenvolvimento, migração de população de áreas rurais para cidades industriais, expansão rápida e vertiginosa da classe média e do consumo, avanço sem precedentes da tecnologia nas mais diversas áreas e tipos. Estes são fatos que mostram um cenário permanente e evolutivo de oportunidades, crescimento, inovação, rentabilidade, desenvolvimento e prosperidade. E até seria, se não fosse o outro lado da moeda.

Talvez a frase que, segundo Weetman (2019, p. 165), é atribuída ao economista, cientista de sistemas e filósofo, Kenneth Boulding, ao discursar perante o Congresso dos Estados Unidos em 1973, seja uma das mais representativas desse outro lado da moeda, quando disse que “qualquer um que acredite que o crescimento exponencial pode durar para sempre num mundo finito é louco ou economista”. Um cenário assim impõe também grandes desafios, como a volatilidade dos custos dos recursos, cuja demanda tem superado a oferta, acarretando sua escassez e, portanto, agravamento da pobreza, fome e acesso a água potável e saneamento.

Certamente, foi por essa razão que Lewis e Maslin (2015) definiram a atual era geológica como o Antropoceno, pois a população mundial tem consumido atualmente mais de 1,5 planetas, minando cada vez mais a biocapacidade regenerativa da natureza, e comprometendo a sobrevivência da geração atual e a existência das futuras gerações.

São quase dois séculos de fabricação de bens de consumo em massa, produzidos segundo as diretrizes operacionais de um sistema industrial linear de concepção essencialmente degenerativa, onde ocorre a extração de materiais da natureza, com um intuito de gerar um produto, o qual, após consumido, é descartado, em função de uma estratégia consumista de obsolescência programada, perceptiva ou funcional. E embora esse modelo econômico, conhecido como Economia Linear, tenha proporcionado lucros satisfatórios para muitas empresas e desenvolvido diversas nações ao longo desse período, sua concepção é fundamentalmente uma via de mão única, e por isso, falha. Para Raworth (2019, p. 229), a Economia Linear “lembra uma lagarta industrial, que ingere alimentos numa extremidade, os mastiga e expele os resíduos na outra extremidade”. E é exatamente essa fase final do processo digestivo da “lagarta industrial” que representa o maior perigo para todos os atores envolvidos, pois não se vê esta etapa apenas como sendo o descarte de rejeitos em aterros, mas também resíduos despejados durante o processo produtivo, emissões de gases poluentes na atmosfera e contaminação do solo e água.

O fato é que, quanto mais se produz na Economia Linear, mais resíduos são gerados. E o avanço da tecnologia tem inserido produtos, outrora classificados em outras categorias, na categoria de equipamentos eletroeletrônicos (EEE), pois cada vez mais os produtos ganham uma roupagem tecnológica, assumindo uma funcionalidade automatizada ou informatizada, além das possibilidades de conectividade adicionadas. Essa evolução tecnológica provoca uma crescente demanda por EEE. Vislumbrando a oportunidade de lucros, a indústria provê o atendimento a essa demanda, colocando em risco parâmetros socioambientais. Os bens de consumo eletroeletrônicos passam a ser produzidos em larga escala, a preços acessíveis e com tecnologias que se renovam rapidamente, antes mesmo que os bens em uso alcancem o fim de sua vida útil. Todo esse processo gera mais produtos no mercado e, exponencialmente, mais resíduos. São os chamados resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, ou simplesmente, e-resíduos, os quais integram a classe de resíduos perigosos e cujo descarte inadequado provoca danos ambientais, à saúde humana e de outras espécies animais (Alabi et al., 2012; Bomfim, 2011; Forti, Baldé, Kuehr, & Bel, 2020).

Para confrontar essa realidade, as discussões sobre sustentabilidade emergiram e ganharam força ao longo das últimas décadas. Correntes e escolas de pensamento surgiram (Rome, 2020), pesquisadores e ativistas abraçaram a causa ambiental e se fizeram ouvir (Boulding, 1966; Carson, 1962), organizações, nações e universidades se uniram em torno de objetivos comuns e buscaram diagnosticar e monitorar o problema e as soluções propostas para combater o descarte inadequado do e-resíduo, dentre outras práticas nocivas ao meio ambiente e sociedade. Nascendo dessas iniciativas, importantes conceitos relacionados à sustentabilidade, como o *Triple Bottom Line* e o *Multiple Bottom Line* (Brockett & Rezaee, 2013; Elkington, 1997; EMF, 2019a; StEP, 2013).

O setor industrial, a partir daí, tem à frente o desafio de mudar os atuais paradigmas econômicos degenerativos e fazer com que a “lagarta industrial” seja envolta no casulo da metanoia disruptiva, para então, desabrochar como uma borboleta renovada e colorida por um novo paradigma, restaurativo, regenerativo e ciclicamente fechado. Surge o *framework* da Economia Circular, onde a atividade econômica constrói e reconstrói a saúde geral do sistema, representado pela EMF (2019a) por um diagrama que lembra uma “borboleta”.

As empresas, no entanto, preocupadas com sua continuidade operacional e a satisfação dos acionistas, demandam instrumentos informacionais que possam supri-las do esclarecimento sobre a viabilidade econômica de mudança de paradigma. O aspecto regulatório também passa a ser um forte argumento para reflexão, pois as políticas públicas iniciam uma caminhada que tende a convergir para um abandono da Economia Linear (Brasil, 2010b, 2020; Brayner, 2019;

Hu, He, & Poustie, 2018; Luz, 2017). Entretanto, para além do olhar sob a perspectiva econômica, as empresas têm o compromisso de atender aos interesses dos seus *stakeholders*. E este interesse está mais alinhado, prioritariamente, com as questões socioambientais e éticas do que com retornos econômicos esperados pelos acionistas.

O equilíbrio entre as prioridades operacionais, táticas e estratégicas das organizações passa a ser uma necessidade para os gestores. A mensuração, fundamental para o processo decisório (Ijiri, 1975), não pode se limitar às taxas de retorno financeiro. Métricas meramente monetárias não são suficientes para refletir a criação de valor de uma empresa. Tais medidas são uma “pequena fatia do que uma economia gera [...]. O monopólio da métrica monetária acabou: chegou o momento de adotar um conjunto de métricas vivas”(Raworth, 2019).

A proposição resultante do contexto até aqui apresentado aponta para o mercado industrial de equipamentos eletroeletrônicos e seus potenciais e-resíduos e consiste na hipótese de que, se as práticas de Economia Linear se distanciam dos parâmetros mínimos de sustentabilidade e não atendem aos interesses dos *stakeholders*, é preciso criar mecanismos de monitoramento capazes de informar o (des)equilíbrio entre as prioridades atendidas e as esperadas. Tais mecanismos devem incluir informações capazes de dotar o usuário interno de dados históricos e prospectivos com melhor grau de qualidade e utilidade. Talvez assim, sinalizem o nível de discrepância entre a sustentabilidade alcançada e a desejada.

Diante do exposto, esta tese propõe o seguinte questionamento: **Como mensurar a performance corporativa das práticas sustentáveis de uma organização do mercado de e-resíduos, em todas as suas dimensões, tendo como fundamento os preceitos da Economia Circular?**

## 1.1 Objetivos

Nesta subseção, alinhados com a contextualização e definição do problema de pesquisa, são apresentados os objetivos da pesquisa.

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo central desta pesquisa é propor um *scorecard* capaz de mensurar a performance corporativa das práticas sustentáveis baseadas no *Multiple Bottom Line* (MBL) e a aplicação dos princípios da Economia Circular, resultando, de forma integrada, em um *Circular Sustainability Scorecard* (CiSS). Este objetivo tem como campo de estudo o mercado industrial de produtos, subprodutos e resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (e-resíduos).

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para o alcance do objetivo geral é necessário realizar os seguintes objetivos específicos:

- a) Demonstrar as implicações do crescimento dos e-resíduos, dentro da concepção tradicional da Economia Linear, ao longo do tempo, e a potencial reação da sociedade, a qual resulta no seu ponto de impaciência;
- b) Discutir a Economia Circular como alternativa para a sustentabilidade corporativa do mercado de e-resíduos, sob a ótica do *Multiple Bottom Line*, em suas cinco dimensões, destacando a dimensão econômica como principal agente motivador para a análise da performance de modelos de negócios lineares e circulares.
- c) Definir perspectivas e indicadores para um *Scorecard* de Sustentabilidade Circular (*Circular Sustainability Scorecard – CiSS*), considerando sua aplicação para o setor industrial de equipamentos eletroeletrônicos.

## 1.2 Originalidade e contribuições da pesquisa

A ideia da tese está fundamentada em um modelo diferenciado de métrica integrada, e inovador, o qual está alinhado com a demanda atual por soluções que facilitem a avaliação da performance em modelos de negócios circulares, os quais têm impacto direto na geração e gestão de e-resíduos.

A tese tem como premissa inicial a análise do comportamento do e-resíduo nas fases onde este apresenta volume expressivo: pós-vendas e pós-consumo. Nestas fases, que correspondem ao final da cadeia produtiva e de consumo, o ciclo tem se revelado como um gargalo potencialmente prejudicial para o meio ambiente e a humanidade (Golev & Corder, 2017; Leite, 2017; Weetman, 2019). Isso porque, ao se tratar a maior parte do volume de e-resíduo como rejeito, sem a possibilidade de recuperação, seu descarte e disposição final proporcionam perda econômica de materiais e recursos com alto valor agregado, esgotamento e escassez de recursos naturais, contaminação do meio ambiente e da vida humana pela sua exposição aos elementos reconhecidamente de alta toxicidade. Esta tese pressupõe, portanto, que os danos causados pelo comportamento linear do processo de produção, impulsionado pelo consumismo provocado pelas estratégias de obsolescência programada, perceptiva e funcional, tendem a alcançar um volume máximo para cada tipo de recurso tratado como rejeito, o qual a sociedade está disposta a suportar, antes de atingir seu ponto de impaciência, que será objeto de modelagem matemática, e exigir do poder público e empresarial que estes rompam com o paradigma de tratar questões ambientais como externalidades e passem a adotar medidas regulatórias para inibir tal paradigma, substituindo-o por um paradigma sustentável. A

modelagem matemática do ponto de impaciência que fundamenta o pressuposto desta tese é um dos pontos de maior contribuição da pesquisa, ao modelar um conceito ainda não abordado nem deduzido matematicamente, embora tal conceito tenha como premissa teórica o crescimento populacional exponencial e a capacidade de suporte, ambos abordados por Verhulst (1838).

A mensuração do ponto de impaciência da sociedade e do comportamento do crescimento do e-resíduo, em sua contribuição prática, traz a possibilidade de aplicação em níveis micro, meso e macro organizacional, no sentido de monitorar a escassez e esgotamento de recursos naturais, ao mesmo tempo em que serve de suporte para ações estratégicas para antecipação às necessidades prementes de imposições regulatórias advindas do alcance do ponto de impaciência da sociedade. Embora a literatura aponte diversos instrumentos históricos e preditores para o comportamento do e-resíduo no mundo, e alerte frequentemente para os riscos decorrentes do seu crescimento exponencial, a abordagem desta tese procura ir além, oferecendo uma perspectiva cuja premissa está diretamente fundamentada no crescimento do e-resíduo como função baseada no comportamento da tecnologia. O entendimento desta premissa não esgota o assunto, porém, em muito contribui para a discussão de uma mudança de paradigma econômico, fundamentada no fechamento dos ciclos produtivos e seus benefícios.

Esta tese ainda aprofunda a questão da gestão de e-resíduos ao estabelecer um *link* com as correntes de pensamento que (re)definem dimensões e critérios para a sustentabilidade corporativa (Brockett & Rezaee, 2013; Elkington, 1997; Rezaee, 2017), ao mesmo tempo em que apresenta as reflexões necessárias para a introdução do tema Economia Circular como alternativa, disruptiva e inovadora, para o fechamento dos ciclos produtivos e o consequente alinhamento do crescimento econômico com a justiça social e a preservação ambiental. O auge desta discussão se dá pela concepção de que só pela integração entre as dimensões da sustentabilidade, baseadas no *Multiple Bottom Line*, e os princípios da Economia Circular é que a sustentabilidade corporativa pode ser consolidada como instrumento prático de redução das desigualdades e injustiças sociais, das práticas de corrupção, da desvalorização do ser humano e da pegada ecológica que define a era do antropoceno. Como contribuição desta abordagem, surge um importante *framework* teórico: a sustentabilidade circular, cuja necessidade de mensuração inspira a proposição de um *scorecard* customizado.

A proposição de um *scorecard* que integra os critérios de sustentabilidade com os princípios da Economia Circular, incluindo indicadores voltados para as práticas e oportunidades de negócios no mercado de e-resíduos, revela uma abordagem ainda não concebida. Seu diferencial inovador está na adaptação do coeficiente de Gini e da curva de Lorenz, normalmente utilizados no campo da Economia para mensuração de desigualdades de

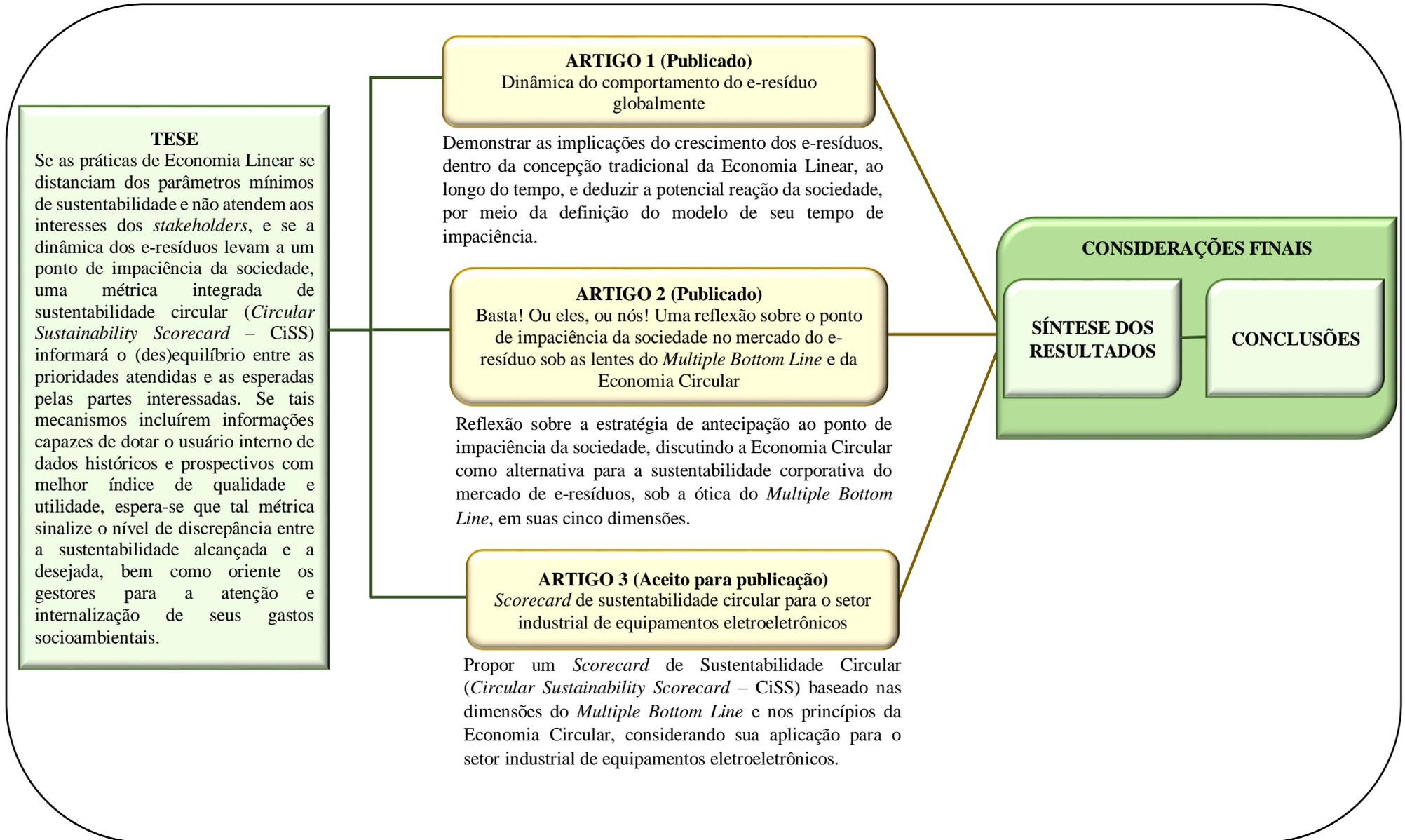
renda e construção do Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), para o campo de mensuração da sustentabilidade corporativa, integrando nesse contexto, a Economia Circular. Este tipo de mensuração contribui para o preenchimento de uma relevante lacuna de pesquisa, uma vez que, responde e supre a necessidade de mensuração e confronto do alinhamento da cadeia de valor definida pela empresa frente aos interesses de seus *stakeholders*. E como estes são partes interessadas que influenciam e são influenciadas em relação aos valores e prioridades da empresa, a métrica proposta neste estudo contribui como uma ferramenta para visualizar a discrepância do compromisso dos gestores com a internalização dos gastos socioambientais frente às expectativas dos investidores e demais *stakeholders*.

Em relação ao fechamento dos ciclos produtivos, como a gestão de resíduos da atividade produtiva e da fase pós-consumo, espera-se com esta pesquisa que o CiSS proporcione uma visão objetiva do índice de atenção dos investimentos feitos pelas indústrias sob a ótica da circularidade, em relação às demais perspectivas da cadeia de valor que levam à melhoria na sustentabilidade corporativa.

Por fim, esta tese contribui para o avanço do conhecimento científico, apresentando um modelo diferenciado, flexível e com potencial para diversos *insights* aplicáveis e extensivos a outros setores produtivos, considerando suas particularidades, que tenham impacto ambiental em seus processos. Além disso, o CiSS proposto nesta tese, servirá de subsídio para o aprimoramento e esverdeamento disruptivo das práticas contábeis e do processo decisório gerencial. Práticas estas necessárias para um mercado que já está começando a parar, ouvir e responder ao “Basta!” da sociedade, cujo clamor já deixou de ser um mero sussurro há tempos.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

Esta tese foi desenvolvida em diferentes estágios organizados como capítulos na forma de uma coletânea de artigos originais. Cada artigo corresponde a um capítulo da tese. São dois artigos publicados e um aceito para publicação, em eventos internacionais. Destes, um artigo foi aceito para publicação em periódico internacional e um artigo foi submetido e está em avaliação para publicação em periódico nacional. A Figura 1 mostra o delineamento da tese com a disposição sequencial dos artigos desenvolvidos.



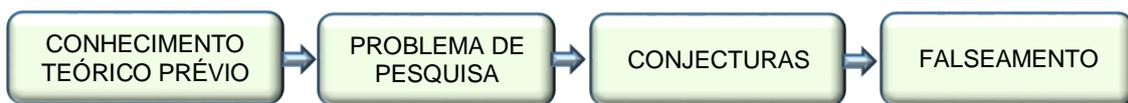
**Figura 1** – Delineamento da tese  
Fonte: Elaboração própria.

O primeiro artigo corresponde ao capítulo 3 da tese e aborda o comportamento dos e-resíduos ao longo do tempo e suas implicações para a sociedade. Este estudo usa uma abordagem lógico-matemática para tratar do e-resíduo e parte da premissa de que tais resíduos são decorrentes da evolução tecnológica, tendo como determinantes principais o tempo e o crescimento populacional. A modelagem se dá sob a abordagem das equações diferenciais de primeira ordem, considerando o tempo contínuo, e das equações de diferenças finitas, considerando o tempo discreto.

O segundo artigo corresponde ao capítulo 4 da tese e faz uma reflexão sobre o mercado de e-resíduos, apresentando um cenário de oportunidades econômicas e sustentáveis, buscando apresentar o conceito de Economia Circular (EC) como fator-chave mitigador do crescimento do e-resíduo não coletado/tratado. Ao mesmo tempo, sob a lente dos *drivers* de mudança, são discutidos argumentos de antecipação, ou não, ao ponto de impaciência da sociedade e às inevitáveis imposições regulatórias da EC.

O terceiro artigo corresponde ao capítulo 5 da tese e parte do *framework* teórico da sustentabilidade circular para propor um *Scorecard* de Sustentabilidade Circular (*Circular Sustainability Scorecard – CiSS*), considerando as dimensões do *Multiple Bottom Line* e os princípios da Economia Circular. O desenvolvimento do CiSS se adapta e customiza o coeficiente de Gini e a curva de Lorenz no intuito de ressignificar a matriz de materialidade das organizações frente aos *stakeholders*.

A Figura 2 mostra que a linha de raciocínio do estudo segue a lógica hipotético-dedutiva.



**Figura 2** – Lógica hipotético-dedutiva  
 Fonte: Adaptado de Marconi e Lakatos (2017, p. 66)

A etapa de “conhecimento teórico prévio” advém da Teoria dos *Stakeholders*, seguido das reflexões teóricas sobre a Economia Circular, sustentabilidade corporativa e o *Multiple Bottom Line*, seus precedentes e posteriores desdobramentos como alternativa para a permanência em uso ou reinserção do e-resíduo no processo produtivo. O “problema de pesquisa”, por sua vez, consiste em compreender como um conjunto de vetores informacionais, juntos, podem mensurar e apontar, o posicionamento da empresa em um cenário de sustentabilidade circular, considerando os interesses e prioridades dos *stakeholders*. Quanto às “conjecturas”, esta investigação busca modelar o comportamento do e-resíduo, e a partir de sua conclusão, conjecturar um *framework* de sustentabilidade circular, integrando as cinco

dimensões do *Multiple Bottom Line* e os três princípios da Economia Circular e propor um *scorecard* de sustentabilidade circular. Por fim, a etapa de “falseamento” do que se propõe na etapa das “conjecturas”, não corresponde ao escopo desta pesquisa, uma vez que a estrutura modelada é uma proposição da realidade original não passível de ser refutada ainda. Ao contrário, os argumentos teórico-empíricos resultantes do CiSS buscam provar sua utilidade.

A Figura 3 vincula os objetivos da tese e dos artigos com as fases do método e suas respectivas contribuições para a literatura.

Artigo	Objetivos do artigo	Objetivos da tese	Fase do método	Contribuição para a literatura
1	<p>Identificar os parâmetros do comportamento do e-resíduo e modelar o ponto de impaciência da sociedade;</p> <p>Modelar o comportamento do e-resíduo e tecnologia no longo prazo, ambos mensurados no tempo;</p> <p>Testar o modelo proposto, considerando a projeção no tempo discreto.</p>	<p>Demonstrar as implicações do crescimento dos e-resíduos, dentro da concepção tradicional da Economia Linear, ao longo do tempo, e a potencial reação da sociedade, que resulta no seu ponto de impaciência.</p>	<p>Revisão da literatura;</p> <p>Modelagem do comportamento do e-resíduo.</p>	<p>Modelagem para o ponto de impaciência da sociedade;</p> <p>Modelagem para o comportamento do e-resíduo.</p>
2	<p>Abordar a problemática do e-resíduo e seu mercado como um <i>driver</i> para uma mudança de paradigma;</p> <p>Discutir o reflexo do ponto de impaciência da sociedade (PIS) nos marcos regulatórios e no processo decisório corporativo;</p> <p>Refletir sobre a Economia Circular como alternativa ao PIS, baseado no <i>Multiple Bottom Line</i>.</p>	<p>Discutir a Economia Circular como alternativa ao PIS, baseado na sustentabilidade corporativa do mercado de e-resíduos, sob a ótica do <i>Multiple Bottom Line</i>, em suas cinco dimensões.</p>	<p>Revisão da literatura;</p> <p><i>Essay</i>.</p>	<p>Reflexão de pesquisa sobre o <i>Multiple Bottom Line</i> como avanço na definição da sustentabilidade corporativa;</p> <p>Justificativa ao modelo de Economia Circular como alternativa ao PIS.</p>
3	<p>Propor um <i>Scorecard</i> de Sustentabilidade Circular (<i>Circular Sustainability Scorecard</i> – CiSS) baseado nas dimensões do <i>Multiple Bottom Line</i> e nos princípios da Economia Circular, considerando sua aplicação para o setor industrial de equipamentos eletroeletrônicos.</p>	<p>Apresentar abordagem teórica da sustentabilidade circular;</p> <p>Definir o <i>Scorecard</i> de Sustentabilidade;</p> <p>Definir o <i>Scorecard</i> de Circularidade;</p> <p>Integrar as métricas e propor o CiSS.</p>	<p>Revisão da literatura;</p> <p><i>Principal Components Analysis</i> (PCA);</p> <p>Adaptação do coeficiente de Gini e Curva de Lorenz;</p> <p>Proposição do CiSS.</p>	<p>Sustentabilidade circular;</p> <p>Scorecard de sustentabilidade;</p> <p>Scorecard de circularidade;</p> <p>CiSS.</p>

**Figura 3** – Relação entre os artigos, objetivos e fases do método

Fonte: Elaboração própria.

## 2 TEORIA DE BASE

A questão que envolve a degradação ambiental e esgotamento de recursos naturais passou de externalidade econômica para uma preocupação crescente e urgente na formação de políticas públicas de mitigação deste problema, o qual abrange as dimensões políticas, sociais e econômicas da sociedade contemporânea. Significa que a responsabilidade pela solução para este dilema ambiental não se restringe a pequenos grupos, mas sim, a toda a sociedade em suas diversas formatações.

Dito isto, uma das principais abordagens na literatura sobre o contexto empresarial, e seu processo decisório, tem sido a busca pela explicação das motivações que levam às mudanças de paradigmas e estratégias empresariais em relação aos modelos de negócios existentes e aos novos. E, no que tange à questão ambiental, essa busca cria um *link* de discussão entre a performance da sustentabilidade Ambiental, Social, Ética e de Governança (ASEG), na maioria dos casos ligada a fatores não financeiros, e a performance da sustentabilidade econômica. E, embora sejam extensivos tais debates, ainda são inconclusivos (Rezaee, 2017). Portanto, um entendimento mais profundo da razão que leva uma empresa a mudar seu paradigma de produção e atuação no mercado passa, inevitavelmente, por uma base teórica que seja capaz de melhor explicar o comportamento decisório, decorrente dos conflitos de interesses existentes entre a Economia e a expectativa de atenção aos fatores não financeiros relacionados à sustentabilidade ASEG.

Do alinhamento da sustentabilidade ASEG com a sustentabilidade econômica surge a abordagem teórica da sustentabilidade corporativa, a qual direciona o crescimento das receitas e a melhoria da qualidade da performance financeira, por meio de iniciativas com foco na responsabilidade socioambiental corporativa, aliada às melhores práticas de governança e ética. A questão, nesse caso, é entender o porquê do interesse empresarial em imprimir esforços neste alinhamento. Em função de uma provável preocupação com a reputação e legitimidade de seus compromissos assumidos com as partes interessadas e suas ações efetivamente realizadas, a resposta pode estar na Teoria dos *Stakeholders*.

O valor construído pela interação entre os *stakeholders* e a empresa é recíproco e benéfico para ambas as partes, uma vez que a performance empresarial afeta o bem-estar dos *stakeholders*. O equilíbrio decorrente desta interação é objeto da Teoria dos *Stakeholders* (Freeman, 1984) que ao maximizar a riqueza dos acionistas simultaneamente ao atendimento dos objetivos das partes interessadas, tanto podem gerar conflitos como sinergias. De qualquer forma, a Teoria dos *Stakeholders* explica que, no longo prazo, a sustentabilidade corporativa,

em suas perspectivas socioambientais e econômicas, fundamentadas em melhores práticas de governança conduzidas eticamente, cria valor para a empresa.

No entanto, os esforços para se alcançar a sustentabilidade corporativa podem resultar em custos de alocação de recursos, que entrem em conflito com os objetivos de maximização de resultados a curto prazo (Rezaee, 2017). Sendo assim, é perceptível uma forte vertente gerencial neste processo decisório. Isto porque o interesse dos acionistas e dos *stakeholders* depende das sinergias dos processos e fatores relacionados ao modelo de negócios da organização, e estes são objeto de decisões internas que refletem na satisfação dos investidores e demais partes interessadas. E embora a gestão da empresa possa tomar decisões para priorizar o atendimento aos interesses de investidores, por exemplo, a expectativa dos *stakeholders*, em geral, é que a empresa atenda os objetivos do sistema social no qual a empresa está inserida, pois esta é vista por aqueles como parte integrante desse sistema e espera que a empresa aja em consonância com os interesses compartilhados por todos os integrantes do sistema.

A expectativa dos *stakeholders* exerce pressão na gestão da empresa, a qual entende que a criação de valor para o acionista passa pela proteção dos interesses dos *stakeholders*, e responde criando conexão entre todos os processos internos e canais de distribuição, integrando-os para alcançar alta performance, não apenas econômica, mas também nas demais dimensões que formam a sustentabilidade corporativa. Essa pressão pode ser constatada na medida em que as empresas, cujo foco está na maximização dos lucros, têm sido criticadas por sua atenção mínima dada às questões socioambientais (Porter & Kramer, 2011).

Desta concepção emerge a noção de criação de valor compartilhado, que faz parte de uma estratégia economicamente eficiente de gestão de longo prazo, onde são consideradas igualmente importantes todas as dimensões da sustentabilidade corporativa. Nesse sentido, a Teoria dos *Stakeholders* auxilia no entendimento da influência decisória e comportamental das partes interessadas, exercida sobre os processos e modelos de negócios em execução.

As empresas com foco na gestão de longo prazo apresentam fortes indícios de desempenho superior se comparadas às empresas semelhantes e focadas na gestão de curto prazo (Barton, Bailey, & Zoffer, 2016; Barton, Manyika, & Williamson, 2017; Barton, York, Manyika, & Francisco, 2017).

As estratégias de sustentabilidade, nessa linha de raciocínio, têm seu foco no longo prazo em muitos de seus aspectos. Portanto, para atender aos interesses dos *stakeholders*, as empresas que busquem a sustentabilidade corporativa, alinhando lucratividade, desempenho socioambiental satisfatório, governança e ética em níveis de excelência, tendem a estabelecer seus objetivos de gestão com o foco no longo prazo.

### 3 DINÂMICA DO COMPORTAMENTO DO E-RESÍDUO GLOBALMENTE

---

Este capítulo apresenta o primeiro artigo da tese publicado no XXII ENGEMA - Encontro Internacional de Gestão Empresarial e Meio Ambiente e aceito para publicação no *The Journal of Solid Waste Technology and Management* (Anexo A). Seus dados referenciais, para consulta, são:

Porto, W. S., Freitas, M. A. L. de, & Silva, A. S. (2020). Dinâmica do comportamento dos e-resíduos globalmente e o ponto de impaciência da sociedade. *XXII ENGEMA - Encontro Internacional de Gestão Empresarial e Meio Ambiente*, 1–16. Recuperado de <http://engemausp.submissao.com.br/22/anais/arquivos/138.pdf>.

Porto, W. S.; Freitas, M. A. L.; Silva, A. S. (2021). Dynamics of the e-waste behavior globally. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*. aug/2021.

### 3.1 Introdução

A prática do modelo econômico conhecido como Economia Linear (extração-produção-distribuição-consumo-descarte), aplicado ao mercado de equipamentos eletroeletrônicos, desde a Revolução Industrial, tem resultado no aumento do conhecido resíduo de equipamento eletroeletrônico (REEE)<sup>1</sup>, nesse estudo tratado como e-resíduo, o qual é um dos principais símbolos negativos do antropoceno (Brayner, 2019). Ao mesmo tempo, percebe-se que os e-resíduos, se constituem como um grande desafio entre os problemas ambientais prioritários abordados nas recentes políticas públicas e empresariais ao redor do mundo.

Pesquisas realizadas pela Universidade das Nações Unidas (Baldé, Forti, Gray, Kuehr, & Stegmann, 2017; Baldé, Wang, Kuehr, & Huisman, 2015; StEP, 2013) indicam que os impactos ambientais causados por produtos eletroeletrônicos se devem, sobretudo, à heterogeneidade dos materiais na sua composição e ao seu grande consumo energético. Tais impactos se iniciam com a extração de matérias-primas, passando pelo processo de fabricação e se estendem, geralmente, por todo o ciclo de vida destes bens até o descarte pós-consumo.

Sabe-se que a produção de equipamentos eletroeletrônicos se utiliza de diversos elementos químicos, alguns altamente poluentes, com notórios efeitos maléficos, tanto para a qualidade do meio ambiente, quanto para a saúde pública. Soma-se a isto o fato de que a vida útil desses equipamentos é, relativamente, curta, devido a constante inovação tecnológica, fato que contribui para o crescente volume de e-resíduos (Forti et al., 2020; Xavier & Lins, 2018).

Este estudo analisa o comportamento dos e-resíduos ao longo do tempo, globalmente, e algumas de suas implicações para a sociedade, considerando todas as categorias de e-resíduos classificadas pela União Europeia. Trata-se de uma abordagem lógico-matemática da questão que envolve os e-resíduos, a qual parte da premissa que tais resíduos são decorrentes da evolução tecnológica, tendo como determinantes principais o tempo e o crescimento populacional. A modelagem, nesse estudo, é discutida sob a abordagem das equações diferenciais de primeira ordem, considerando o tempo contínuo, e das equações de diferenças finitas, considerando o tempo discreto. Nesse contexto, busca-se modelar o ponto de impaciência da sociedade frente às expectativas do modelo *mainstream* de produção, consumo e geração de resíduos e rejeitos de equipamentos eletroeletrônicos no mundo.

Considerando a realidade crescente e preocupante da geração de e-resíduo, este estudo busca esclarecer o seguinte questionamento: quais as perspectivas de crescimento dos e-resíduos, ao longo do tempo, quando estimado o avanço tecnológico, e da reação da sociedade?

---

<sup>1</sup> Da mesma forma, em outras categorias.

Nesse sentido, a pesquisa objetiva demonstrar as implicações do crescimento dos e-resíduos, dentro da concepção tradicional da Economia Linear, ao longo do tempo, e a potencial reação da sociedade. Segmentando as etapas da pesquisa, procura-se identificar os parâmetros determinantes do comportamento do e-resíduo; modelar, considerando o tempo contínuo e o tempo discreto, o comportamento do e-resíduo e da tecnologia no longo prazo, ambos mensurados no tempo; e testar o modelo proposto, considerando a projeção no tempo discreto.

O artigo está dividido em mais quatro seções. A segunda seção dimensiona o problema dos e-resíduos, apresentando aspectos teóricos, estruturais e legais relacionados à inovação tecnológica, questão ambiental e aos e-resíduos propriamente ditos. A terceira seção descreve a metodologia da pesquisa. A quarta seção analisa os resultados da pesquisa. A quinta seção traz as considerações finais e as perspectivas para pesquisas futuras.

### **3.2 Dimensão do problema dos e-resíduos**

São crescentes as discussões e a preocupação com as questões ambientais nas últimas décadas, devido, em parte, à percepção não somente do impacto que a utilização pouco racional dos recursos naturais tem causado ao ambiente, mas também à consciência de que a continuidade da vida humana na Terra depende de uma gestão ecoeficiente de tais recursos.

Diante dessa dinâmica de produtividade e consumo, o e-resíduo cresce três vezes mais rápido que o resíduo urbano comum (Faro, Calia, & Pavan, 2013). No contexto brasileiro, de acordo com a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2013), estimou-se que a geração de e-resíduo em 2019 seria de 1,2 milhão de toneladas, contudo, na apuração de Forti et al. (2020) foram gerados 2,1 milhão de toneladas de e-resíduo, resultando numa média de 10,2 kg/hab., de modo que a previsão foi 75% menor do que o volume gerado. Com isso, o que se vê é o aumento descomedido na geração dos resíduos desses produtos ao final de sua vida útil (Cao et al., 2016; Flygansvær, Dahlstrom, & Nygaard, 2018; Lu, Liu, Yang, & Li, 2015; Xavier & Carvalho, 2014).

Intrinsecamente ligada a essa realidade, a tecnologia, como produto da ciência e da engenharia, tem feito cada vez mais parte do cotidiano das pessoas, operando em um ciclo de influência mútua, entre oferta e demanda, não necessariamente nessa mesma ordem. Em outras palavras, ao mesmo tempo em que as pessoas são agentes do desenvolvimento tecnológico, são também cada vez mais tecnologicamente dependentes.

A raiz dessa dependência tecnológica reside na estratégia de consumismo, proposta por Lebow (1955), para acelerar a oferta de produtos no mercado, dentre os quais, os equipamentos eletroeletrônicos. O aumento da produtividade, em função do consumo, resultou no

crescimento, ao longo das últimas décadas, da conhecida e constantemente monitorada “pegada ecológica”, que é um indicador de sustentabilidade ambiental usado para medir e gerenciar o uso de recursos através da economia (GFN, 2018; Luz & Echevengua, 2015).

Dessa forma, de um lado ocorre a pressão pelo consumo, em função da renovação tecnológica, e de outro lado, tem-se a dúvida se o nível de tecnologia (*Design for Environment*) é capaz de direcionar melhor o e-resíduo. Partindo-se da premissa de que, em qualquer instante do tempo, o volume de rejeitos<sup>2</sup>,  $W$ , é a diferença entre o volume de tecnologia,  $Q^3$ , e os e-resíduos<sup>4</sup>,  $R$ , ou seja,  $W = Q - R$ , pode-se escrever que a variação dos resíduos no tempo é

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dQ}{dt} - \frac{dR}{dt} \quad (1)$$

Destaca-se que o aporte tecnológico não é o único critério para que um resíduo seja classificado como rejeito. Outros fatores também são considerados nesse contexto, como potencial e viabilidade de reciclagem dos materiais, condições socioeconômicas dos atores da cadeia de logística reversa e os riscos potenciais para o tratamento dos materiais. No raciocínio analítico deste estudo, no entanto, o foco está direcionado para o impacto específico da tecnologia na definição dos resíduos e rejeitos.

Natural esperar que a taxa de variação dos rejeitos seja uma fração dos resíduos, ou seja,  $\frac{dW}{dt} = \alpha R$ , de modo que a equação (1) pode ser reescrita na forma de uma equação diferencial de primeira ordem dada por

$$\frac{dR}{dt} + \alpha R = \frac{dQ}{dt} \quad (1.1)$$

A solução de (1.1) depende da forma como a tecnologia varia, e nesse sentido pode-se analisar alguns cenários mais elementares, a saber:

- I)  $\frac{dQ}{dt} = 0$ . Isso implica que  $Q$  é constante, ou seja, a tecnologia não muda ao longo do tempo. Em outras palavras, a produção fica estagnada, e à medida que o tempo passa, os aparelhos vão se acabando. Neste caso, a solução de (1.1) é dada por  $R(t) = R(0)e^{-\alpha t}$ . Obviamente, no longo prazo ( $t \rightarrow \infty$ ) o resíduo tenderá para zero. Esse resultado é esperado porque tem-se na tecnologia a fonte de origem dos resíduos.

<sup>2</sup> Resíduos que não têm condições de recuperação (reuso, acondicionamento ou reciclagem).

<sup>3</sup> Compreende-se  $Q$  como o aporte tecnológico colocado no mercado com potencial de utilização pós consumo.

<sup>4</sup> Resíduos que têm condições de recuperação (reuso, acondicionamento ou reciclagem).

II)  $\frac{dQ}{dt} = kt, k > 0$ , ou seja, a taxa de variação da tecnologia é proporcional ao tempo.

Nesse cenário, a solução da equação (1.1) é dada por  $R(t) = \frac{k}{\alpha}(t + 1) + ce^{\alpha t}$ , onde  $c$  é uma constante que pode ser determinada pelas condições iniciais. Observe-se que os resíduos, no longo prazo, tenderão ao infinito. Este cenário já induz medidas legais pelos efeitos que os rejeitos provocariam para a sociedade.

III)  $\frac{dQ}{dt} = kQ, k > 0$ , isto é, a taxa de variação da tecnologia proporcional à própria tecnologia.

Por conseguinte, em qualquer instante de tempo, o volume tecnológico é dado por  $Q(t) = Q(0)e^{kt}$ , que segue o modelo da teoria do crescimento populacional proposto por Malthus (1798), como citada em Ricklefs (2010), Tavoni e Oliveira (2013) e Almeida e Oliveira (2015). A solução da equação (1.1) neste cenário é dada por  $R(t) = \frac{Q(0)}{k+\alpha}e^{kt} + ce^{-\alpha t}$ , onde,  $c$  é uma constante determinada pelas condições iniciais, ou seja, definida no instante  $t = 0$ . Essa solução também se comporta de forma explosiva e é a que mais se aproxima da realidade, visto que ao longo de um ano, por exemplo, o crescimento da tecnologia já é expressivo.

O crescimento populacional relaciona-se diretamente com o conceito de capacidade de suporte do meio ambiente, no sentido de que, de acordo com Hogan (1995) há um nível de tolerância que um sistema ambiental ou ecossistema suporta, uma vez que os recursos naturais são limitados e limitantes. O modelo malthusiano causou controvérsias sobre a forma como a população cresceria. Nesse sentido Verhulst (1838) propôs a função logística

$$\frac{dN}{dt} = rN \left(1 - \frac{N}{K}\right) \quad (2)$$

onde representa o número de indivíduos no tempo  $t$ ,  $r$  a taxa de crescimento intrínseca e  $K$  é a capacidade de carga, ou número máximo de indivíduos que o ambiente suporta. Essa função, concebida como alternativa, pode ser adaptada a situação dos rejeitos aqui discutida. Faz sentido pensar que os rejeitos obedecem um modelo expresso por

$$\frac{dW}{dt} = \beta W \left(1 - \frac{W}{W_m}\right) \quad (3)$$

Com isso, fica evidenciado que a taxa de variação do volume de rejeitos segue o formato de uma parábola com concavidade voltada para baixo tendo como zeros os pontos  $W = 0$  e

$W = W_m$ , ou seja, estes são pontos de equilíbrio porque  $\frac{dW}{dt} = 0 \Rightarrow W = \text{constante}$ . A resolução do modelo, a partir da equação (3), é dada por:

$$W(t) = \frac{W_m}{\left[\left(\frac{W_m}{W_0} - 1\right)e^{-\beta t} + 1\right]} \quad (4)$$

Note que  $\lim_{t \rightarrow \infty} W(t) = W_m$ , ou seja, no longo prazo o volume de rejeitos tende para a quantidade máxima suportada pela sociedade, ou dito de outra forma, as políticas públicas poderiam funcionar para não permitir que este volume máximo de rejeitos não fosse ultrapassado. Dessa forma, a primeira indagação que pode surgir é em relação ao valor ótimo de  $W_m$ , principalmente, porque o resíduo eletroeletrônico depende de sua natureza e em alguns casos a tolerância da sociedade pode ser muito pequena<sup>5</sup> e exigem políticas com o fito de reduzir, gradualmente, este volume máximo. Então, uma questão que poderia ser verificada é a impaciência da sociedade. Pela equação (4) a taxa de variação dos rejeitos assume um ponto de máximo (por ser uma parábola invertida) dado por  $W = \frac{W_m}{2}$ . Então, a partir da equação (4), o tempo necessário para atingir este valor, será dado por  $t = \frac{1}{\beta} \ln \left| \frac{W_m - W_0}{W_0} \right|$ , que seria, então, o tempo de impaciência da sociedade.

A principal justificativa para que os rejeitos cresçam de acordo com uma função logística se respalda no comportamento da sociedade. Awasthi et al. (2018) afirma que o lixo eletrônico desempenha um papel relevante na economia global e sua taxa de crescimento depende do comportamento humano. No momento em que o meio ambiente possa ser agredido, a sociedade, talvez muito mais apoiada nas consequências econômicas do dano, vai reagir e exigir soluções.

O modelo logístico de Verhulst, nesse caso, mostra que o tempo depende de se conhecer o volume inicial de e-resíduo que, para efeitos de aplicação desse modelo, pode ser considerado o volume disponível em um determinado ano; a taxa de crescimento anual do volume de resíduos eletroeletrônicos e, finalmente, o volume máximo que a sociedade estaria disposta a tolerar. É importante destacar que essa tolerância está relacionada aos reflexos sociais, ambientais e econômicos decorrentes da exaustão de recursos naturais. A essência do problema é mais de comportamento do que de identificação de parâmetros,  $\alpha$  e  $\beta$ , e os valores determinados apresentam um crescimento mais tímido do que a realidade.

---

<sup>5</sup> O alto índice de toxicidade pode provocar medidas que limitem ou suspendam a produção de determinados produtos.

Por último, observa-se que o modelo logístico de Verhulst pode, alternativamente, determinar o tempo dessa tolerância  $t$ , conhecidas as duas outras variáveis  $W_0$  e  $\beta$ , ou, provavelmente, o que é mais interessante, determinar o volume máximo  $W_m$  tolerável pela sociedade, usando como referência de tempo as especificidades de cada resíduo. Por exemplo, um sistema produtivo que utilize chumbo poderia fazer a taxa de variação atingir seu ponto máximo num determinado período de tempo (que poderia ser o tempo de adoção de medidas corretivas) e com isso estaria determinado o volume máximo tolerável pela sociedade.

O avanço da tecnologia disponível sem adequada gestão do ciclo de vida de seus produtos origina problemas de natureza ambiental e de saúde pública porque gera resíduos, que geram rejeitos, e estes causam danos ao meio ambiente e à saúde da população (Decharat & Kiddee, 2020; Xu et al., 2020; Y. Zhang et al., 2018). O processo produtivo tradicional de produção-consumo-descarte, chamado de Economia Linear, criticado por Leonard (2020), se aproxima desse cenário III onde a escalabilidade e potencial de inovação crescem com uma velocidade cada vez maior e com praticamente o mesmo custo, confirmando as previsões de Moore (1965).

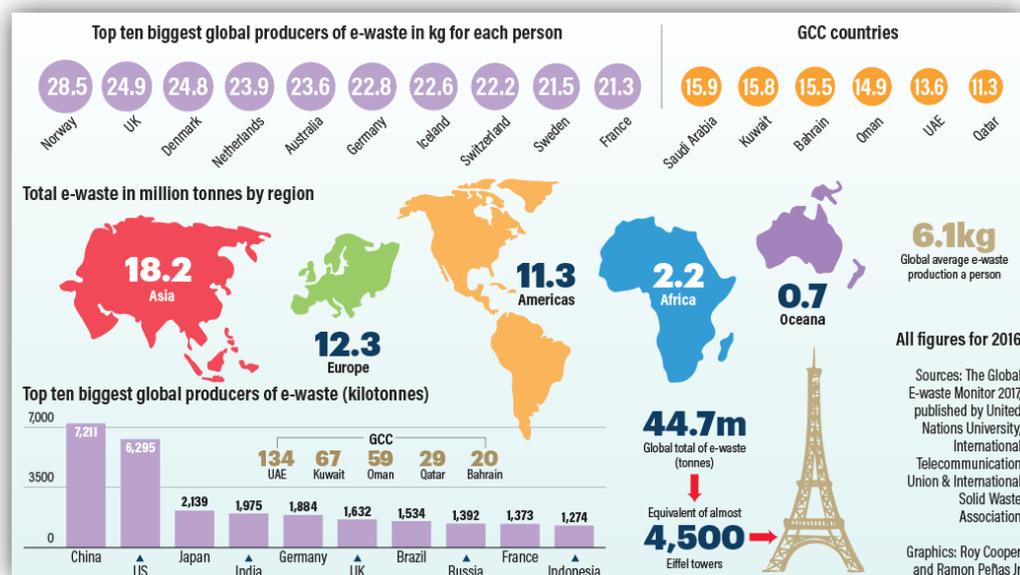
As argumentações teóricas sumarizadas até aqui, provocam uma reflexão no sentido de que, na Economia Linear, não há preocupação com a regeneração do capital natural; o fechamento dos ciclos de materiais biológicos e técnicos; e uma perspectiva sistêmica como elemento fundamental de interação e integração dos diversos atores e fatores envolvidos.

Essas três constatações apontam para uma negligência em relação aos “*outputs*” das partes de um sistema, os quais se interligam aos “*inputs*” das partes desse mesmo sistema. Tais *outputs* são tratados na Economia Linear (que considera o sistema aberto, sem fechar seu ciclo) erroneamente como rejeitos, cujo destino final é retornar ao meio ambiente como *input* prejudicial. Ocorre que na concepção dos rejeitos, estes teriam que seguir para disposição final. Entretanto, no caso dos resíduos eletroeletrônicos, a maior parte de sua composição caracteriza-se como resíduos, e não como rejeitos. Portanto, o resíduo que deveria ter sua vida útil prolongada ou reentrar no ciclo produtivo como recurso de mineração urbana, passa a ser tratado como rejeito e provocando danos ao meio ambiente e à saúde humana.

Nessa tônica, surgem os estudos em torno dos resíduos sólidos de forma abrangente, como as pesquisas de Powell e Chertow (2019) e Vieira, Silva, Pedro Filho, Madeira e Almeida (2018). Nosso estudo, no entanto, estreita o escopo de pesquisa para a classe dos e-resíduos, oriundos da Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC).

A TIC tem avançado rapidamente ao longo dos anos. Os estudos de Baldé et al. (2017) apontam que metade da população mundial em 2017, cerca de 3,6 bilhões de pessoas, usaram

a internet. Acompanhando esse avanço tecnológico, os e-resíduos têm tomado proporções preocupantes no contexto mundial. Em 2016 foram gerados 44,7 milhões de toneladas<sup>6</sup> de e-resíduos no mundo, de acordo com a Figura 4. Entre os continentes, a Ásia aparece como maior produtor de e-resíduo, sendo responsável por aproximadamente 41% de todo o e-resíduo gerado em todo o planeta, e tendo a China como país que lidera o ranking dos maiores geradores de e-resíduos. Nove países da Europa se destacam no top 10 de grandes produtores de e-resíduo *per capita*, sendo a Noruega o país que mais gera e-resíduo no mundo, com 28,5 kg por pessoa, número este que é 4,45 vezes superior à média mundial *per capita*. No Oriente Médio, todos os países que formam o Conselho de Cooperação do Golfo (*Gulf Cooperation Council – GCC*) apresentaram geração de e-resíduo per capita bem acima da média mundial. Percebe-se, com esses dados, que os maiores geradores de e-resíduo do planeta são os países desenvolvidos.

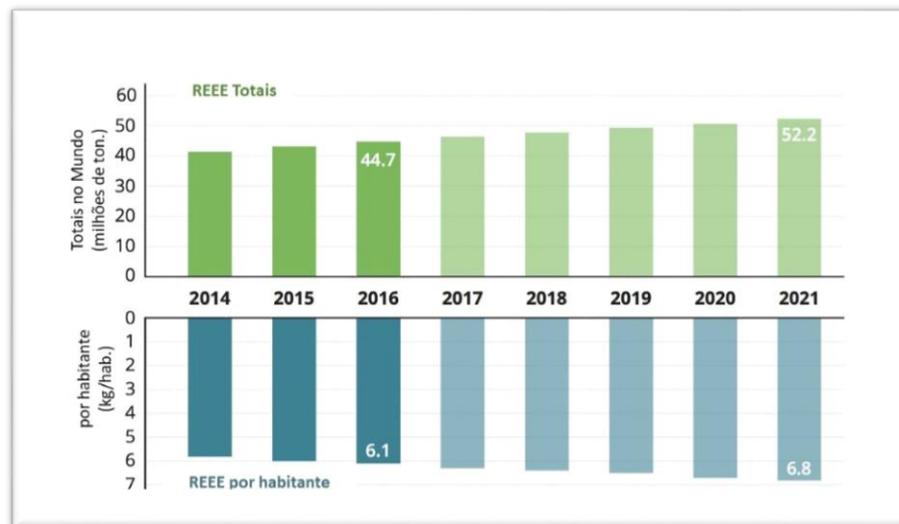


**Figura 4** – Resumo do relatório de geração de e-resíduo em 2016 no mundo.

Fonte: Baldé et al. (2017).

Destaca-se ainda, na Figura 5, que a estimativa para o crescimento da geração de e-resíduo até 2021 será de 3% a 4% a.a., com a expectativa de se alcançar 52,2 milhões de toneladas (Baldé et al., 2017; Forti, Baldé, & Kuehr, 2018; Persson, 2015; L. H. Xavier & Carvalho, 2014).

<sup>6</sup> Esse volume de e-resíduo corresponde ao equivalente, em peso, a 4.500 torres Eiffel.



**Figura 5** – e-resíduo global gerado e estimativas até 2021.  
Fonte: Baldé et al. (2017). Tradução livre.

A argumentação e modelagem nesta seção foi discutida sob a abordagem das equações diferenciais, seguindo o modelo logístico de Verhulst (1838), sendo tal abordagem apresentada para dar a dimensão do problema acerca dos e-resíduos, através de modelos que estabelecem a necessidade de imposições regulatórias que protejam o bem-estar da sociedade e se discuta com mais cuidado a questão ambiental. Com esse fortalecimento teórico-matemático, é possível, a partir da próxima seção, demonstrar o comportamento dos e-resíduos ao longo do tempo, em função dos avanços da tecnologia.

### 3.3 Material e método

Nesta seção, de forma alternativa, pela impossibilidade prática de se trabalhar com o tempo contínuo, como proposto no modelo analítico das equações diferenciais tratadas na seção anterior, e mais condizente com os dados disponíveis na base de dados da Eurostat<sup>7</sup> (2019), que contém dados de fluxo, coleta, tratamento e reciclagem de e-resíduo entre os anos de 2005 a 2017 nos países que formam a União Europeia (UE), considera-se o tempo discreto para o uso das equações de diferenças finitas. Portanto, de igual modo:

$$W_t = Q_t - R_t \quad (5)$$

Onde,  $W$  é o volume de rejeitos,  $Q$  é o volume de tecnologia produzida, e  $R$  é o volume de e-resíduo, todos mensurados no tempo  $t$ . A solução da equação (5) considera  $R_t = \alpha Q_t$ , ou

<sup>7</sup> Eurostat (<https://ec.europa.eu/eurostat>) é o serviço estatístico da União Europeia situado em Luxemburgo. Sua missão é fornecer estatísticas de alta qualidade para a Europa.

seja, o volume de resíduo destinado à recuperação é uma fração<sup>8</sup> do que é produzido em cada instante  $t$  e  $W_t = \beta Q_{t-1}$ , isto é, o rejeito de hoje é fração do que foi produzido ontem, a equação (5), após manipulações algébricas elementares, pode ser reescrita como

$$Q_t = \left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right) Q_{t-1} \quad (5.1)$$

cuja solução é dada por

$$Q_t = \left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right)^t Q_0 \quad (5.2)$$

onde  $Q_0$  é dado e representa o volume de tecnologia produzido no instante inicial. Com isso, determina-se que

$$W_{t+1} = \beta \left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right)^t Q_0 \quad (5.3)$$

Decorre da equação (5.3) que o comportamento do volume de rejeitos dependerá das relações entre os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$ , de acordo com os cenários propostos na Tabela 1.

**Tabela 1** – Cenários decorrentes das possíveis relações entre os coeficientes  $\alpha$  e  $\beta$

Hipótese	Relação entre $\alpha$ e $\beta$	Cenário
1	Se $\beta > 1 - \alpha$ , ou $\alpha + \beta > 1$	O volume de rejeitos explodirá no tempo.
2	Se $\alpha + \beta = 1$	Haverá estabilidade em torno do volume inicial.
3	Se $\alpha + \beta < 1$	O volume de rejeitos tenderia a zero, no longo prazo.

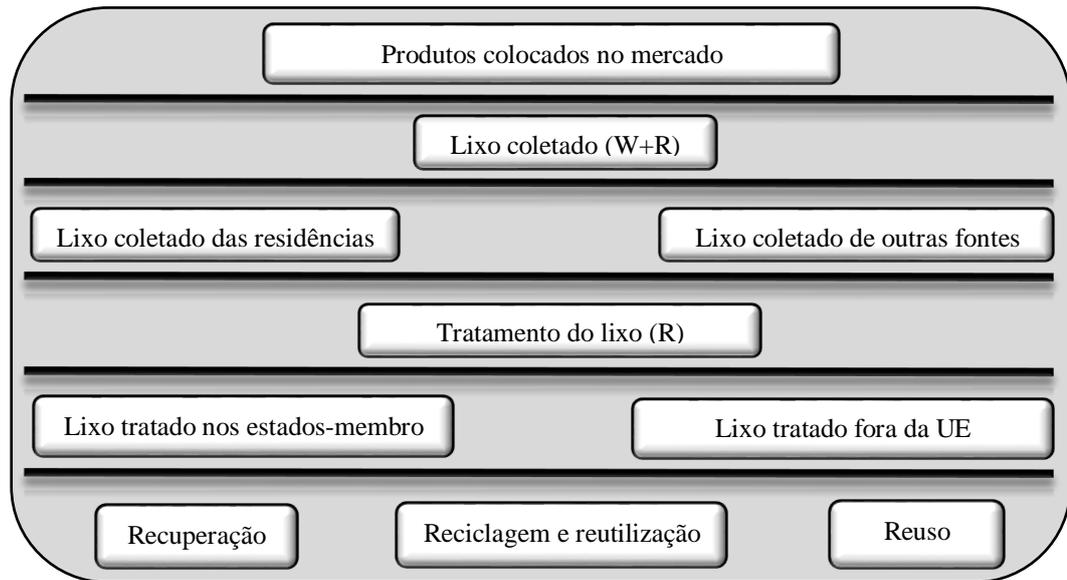
Fonte: Elaborado pelos autores.

O modelo (5.2) pode ser avaliado empiricamente, bastando para isso usar modelos de regressão log-linear, cujos resultados serão discutidos na seção 4, sendo escrito como:

$$\ln Q_t = \ln Q_0 + \ln \left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right) t = \beta_0 + \beta_1 t \quad (5.4)$$

Os resultados do uso do modelo empírico 5.4 decorrem da análise inferencial dos dados da Eurostat relacionados aos e-resíduos, os quais estão dispostos e organizados conforme a Figura 6, por país-membro da União Europeia e por ano.

<sup>8</sup> Define-se  $0 < \alpha < 1$  e  $0 < \beta < 1$



**Figura 6** – Disposição e organização dos dados da Eurostat (2020).  
Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dados da União Europeia, no período de 2005 a 2017, como pode ser observado na Tabela 2, são compostos por informações fornecidas por seus atuais 27 países-membros; pelo Reino Unido, que nesse período ainda não havia concluído o Brexit<sup>9</sup>; e, por mais 3 países da Europa que, embora não sejam participantes da união aduaneira, são participantes do mercado único. A amostra foi reduzida às informações de 11 países-membros que divulgaram informações nos 13 períodos disponíveis (2005 a 2017), resultando em uma amostra de 143 observações em cada conjunto de dados (coleta de e-resíduo e volume de tecnologia), que representa aproximadamente 35,5% dos países que compõem o banco de dados de e-resíduo da Eurostat. Uma limitação que justifica a redução da amostra dos dados é a falta de homogeneidade destes entre os países. Dito de outra forma, há situações nos quais a coleta de dados de um país foi registrada após 2005. Nesse caso, os países com dados faltantes foram excluídos da análise. A amostra final de 143 observação, então, foi somada ano a ano, suavizada com o uso do logaritmo dos valores originais dessa soma para resolução do modelo.

Como exemplo do volume de coleta de e-resíduo entre os países da UE, iniciamos a análise mostrando os dados da Holanda. Os dados foram tratados com o *software* IBM® SPSS® versão 22.

A concepção da geração de e-resíduo na UE, para fins das projeções apresentadas mais adiante na seção 4, parte do cruzamento dos dados da Eurostat relacionados à quantidade de e-

<sup>9</sup> Saída do Reino Unido da União Europeia, a qual foi apelidada de Brexit, originada na língua inglesa, resultante da junção das palavras *British* e *exit*.

resíduo coletado nos períodos pesquisados, com os dados mais atuais disponibilizados pela Organização das Nações Unidas (ONU), por meio do relatório de Baldé et al. (2017).

**Tabela 2** – Composição amostral dos países da União Europeia.

Composição da amostra com 28 países-membros da União Europeia (incluindo o Reino Unido antes do Brexit) e 3 países participantes do mercado único.	Número de observações			
	Países	Períodos	Coleta de e-resíduo	Volume de tecnologia
<b>Amostra inicial</b>	<b>31</b>	<b>13</b>	<b>365</b>	<b>365</b>
			<b>Total (1)</b>	<b>730</b>
(-) Países com dados incompletos no período pesquisado (2005 a 2017)	20	13	222	222
			<b>Total (2)</b>	<b>444</b>
<b>Amostra final</b>	<b>11</b>	<b>13</b>	<b>143</b>	<b>143</b>
			<b>Total (1-2)</b>	<b>286</b>

Fonte: Dados da pesquisa.

Na análise da modelagem empírica, e para análise do comportamento dos resíduos (em condições de recuperação) e rejeitos (resíduos sem condições de recuperação) ao longo do tempo, foi considerada a quantidade de produtos eletroeletrônicos colocados no mercado da UE como *proxy* para representar o volume de tecnologia, onde, a partir dessa premissa, ocorre a geração de resíduos (W+R), bem como seus desdobramentos registrados na base de dados da Eurostat. O uso dessa *proxy* parte da lógica de que o volume de produtos eletroeletrônicos colocados no mercado para venda, seja para atividade-fim (consumo direto, como um celular), seja para atividade-meio (prestação de serviço, como um tomógrafo computadorizado), impõem o uso da tecnologia disponível no instante de tempo em que são disponibilizados. Portanto, é plausível pensar, sob a ótica da utilidade, que este é o volume de tecnologia produzido em dado tempo.

Assim, a partir da análise dos dados da UE, relacionados aos produtos eletroeletrônicos colocados no mercado e seus respectivos e-resíduos gerados, é possível estimar os coeficientes da regressão 4.4 e analisar o comportamento da solução, de acordo com os cenários propostos.

### 3.4 Resultados e discussões

O modelo de regressão utilizado nesta seção tem o intuito de analisar, a partir dos parâmetros encontrados, qual dos cenários propostos na Tabela 1, sobre o comportamento dos e-resíduos no tempo, justificam o modelo teórico.

Os resultados desta seção estão organizados para mostrar primeiramente os resultados dos cálculos dos coeficientes de correlação, coeficientes de determinação e parâmetros das regressões, obtidos a partir da amostra dos 11 países que informaram dados do volume de tecnologia ao longo dos 13 períodos disponíveis no banco de dados da Eurostat, seguido da

posição da Holanda<sup>10</sup>, como um exemplo individual, em volume de coleta de e-resíduo, e logo após, os dados de volume de e-resíduo para a mesma amostra de 11 países da UE.

Dando continuidade, ocorre a discussão, separadamente, de cada um dos três cenários obtidos. E por fim, com base no modelo aplicado, são projetados alguns cenários, que mostram o comportamento do volume de tecnologia ao longo do tempo, bem como o crescimento do e-resíduo não coletado/tratado ao longo dos próximos 33 anos (2018 a 2050), a partir do último período disponibilizado pela Eurostat.

### 3.4.1 Resultados das regressões

Os resultados apresentados nesta subseção foram organizados com a finalidade de facilitar a comparação da aplicação do modelo econométrico 4.4 entre as variáveis dependentes utilizadas. A Tabela 3 apresenta a correlação paramétrica de Pearson que ocorre entre as variáveis observadas no modelo.

É possível perceber que há uma forte correlação entre cada uma das variáveis estudadas, em relação ao instante de tempo  $t = 1, 2, 3, \dots, n$ , orbitando entre 70,8% e 95,9%. Tais correlações justificam a análise do grau de influência dos respectivos preditores sobre cada variável dependente, permitindo que o modelo seja testado, sem problemas de especificação.

**Tabela 3 – Correlação de Pearson**

VARIÁVEIS		Tempo	e-resíduo coletado		Tecnologia (UE)
			Holanda	UE	
e-resíduo coletado	Tempo	1,000	0,959*	0,808*	0,808*
	UE	0,959*	1,000	0,802*	0,723*
	Holanda	0,808*	0,802*	1,000	0,708*
Tecnologia (UE)		0,808*	0,723*	0,708*	1,000

\* A correlação é significativa no nível 0,01.

Fonte: Dados da pesquisa.

<sup>10</sup> Optou-se por apresentar os dados individuais da Holanda devido a ser um dos poucos países que divulgaram dados completos para o período analisado, o que facilita a comparação com os dados gerais da UE.

A regressão log-linear revelou que o modelo é significativo no teste da estatística F. Os parâmetros obtidos na regressão, observados na Tabela 4, são significativos ao nível de 5% e, pelo coeficiente de determinação, observa-se que as variações ocorridas em cada uma das variáveis dependentes são explicadas pela variação do tempo, a níveis percentuais que vão de 65,24% a 91,94%. O modelo pode ser usado para fins preditivos, pela qualidade do ajuste e pela significância dos parâmetros. Resolvendo 4.4, estima-se 4.2.

**Tabela 4 – Parâmetros da regressão**

Tecnologia (UE)	Variável	Coefficientes	Erro padrão	Estatística t	p-valor
	<b>Constante</b>	14,18147	0,03678	385,5627	0,00000
<b>Tempo</b>	0,021056	0,00463	4,54389	0,00083	
<b>R<sup>2</sup> = 0,6524    F<sub>(1,11)</sub> = 20,64698**</b>					
e-resíduo (Holanda)	Variável	Coefficientes	Erro padrão	Estatística t	p-valor
	<b>Constante</b>	11,36684	0,034237	331,9999	0,00000
<b>Tempo</b>	0,048326	0,004314	11,2034	0,00000	
<b>R<sup>2</sup> = 0,9194    F<sub>(1,11)</sub> = 125,51627**</b>					
e-resíduo (UE)	Variável	Coefficientes	Erro padrão	Estatística t	p-valor
	<b>Constante</b>	13,15725	0,09206	142,9167	0,00000
<b>Tempo</b>	0,052819	0,01159	4,55384	0,00082	
<b>R<sup>2</sup> = 0,6534    F<sub>(1,11)</sub> = 20,73749**</b>					

\*\* Significativo a 1%.

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir da identificação dos coeficientes da equação 5.2 e 5.3, feitos a partir do modelo econométrico descrito na equação 5.4, é possível discutir a adequação de um dos cenários propostos na Tabela 1, e fazer projeções. Todavia, embora os resultados se mostrem promissores para o atingimento dos objetivos desse estudo, convém discuti-los caso a caso, antes de seguir para a realização de projeções futuras.

### 3.4.2 Análise do volume de tecnologia na UE

Nos parâmetros da amostra de países da UE, conforme a Tabela 4, o volume de tecnologia disponibilizada para a sociedade ao longo do tempo aponta para um crescimento a uma taxa de 2,1% a.a. na UE. Trata-se, nesse caso, de uma amostra com o somatório do volume agregado de 11 países no período de 13 anos. As dimensões demográficas de cada país da amostra, bem como a eficiência do processo de disponibilização de tecnologia podem influenciar na média do coeficiente encontrado. Tomando-se a Holanda como um exemplo, por meio do qual o modelo também foi testado, seus parâmetros indicaram uma taxa de crescimento exponencial a 5,5% a.a., o que representa um coeficiente superior à média amostral, porém, coerente com sua própria taxa de crescimento do e-resíduo coletado, a qual será vista na seção 4.3.

A taxa de crescimento encontrada para o volume de tecnologia disponível é corroborada e pode ter explicação na relação econômica entre produtos eletroeletrônicos vendidos e a paridade do poder de compra<sup>11</sup>, descrito nas metodologias de Baldé et al. (2017) e Forti et al. (2018) para extrapolação de séries temporais, que predizem vendas futuras até 2021, criando grupos de consumo, cujas tendências entre grupos e entre países foram comparadas. Na Itália, por exemplo, o ciclo de vida de um smartphone em 2015 era de 17,7 meses, o que não significa que eles param de funcionar e se tornam inúteis, mas sim que representa uma busca mais frequente por adequações tecnológicas (obsolescência funcional<sup>12</sup>). Em 2016 houve crescimento do consumo de equipamentos eletroeletrônicos em todos os países, especialmente em economias emergentes com paridade de poder de compra baixo, cujas taxas crescem mais rápido. Essa informação coaduna com os relatos de Brayner (2019), que afirma que na era do antropoceno, a população tende a ser cada vez mais urbana e consumista.

É de se pressupor, com a identificação dos parâmetros da regressão, que a tecnologia não tem estagnação de crescimento no tempo, e também que não cresce a uma taxa constante ao longo do tempo. Os coeficientes, antes concebidos teoricamente e agora conhecidos, supõem que o cenário mais próximo da realidade é que o volume de tecnologia disponível, sob a ótica da utilidade, tem em sua tendência o crescimento exponencial, o que proporcionará um avanço além do previsto por Moore (1965), embora tal avanço não se confunda com dimensionamento da nanotecnologia, que tem outros parâmetros, não abordados nesta pesquisa.

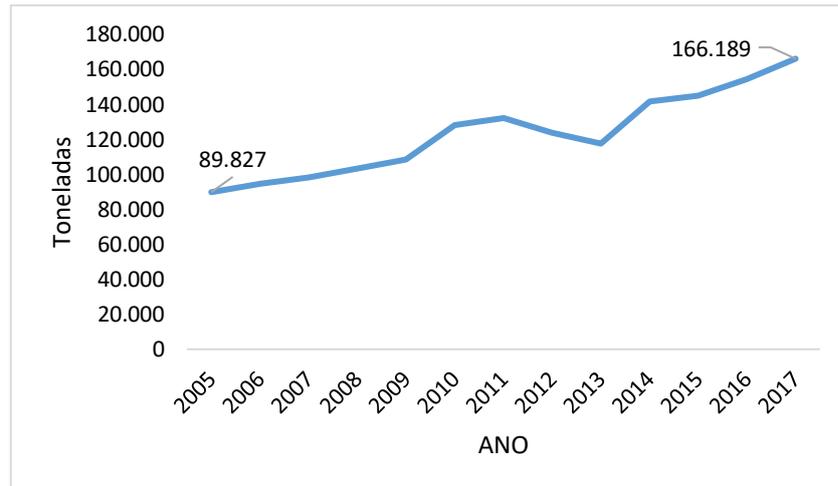
### **3.4.3 A coleta de e-resíduo na Holanda**

A Holanda é um dos países-membros da UE, que de acordo com o Statistics Netherlands (2020) possui, aproximadamente, uma população de 17,3 milhões de habitantes. Adotando esse país representativo da UE como exemplo, por se tratar de um país desenvolvido, com alto padrão de consumo de equipamentos eletroeletrônicos, é possível observar que seu volume de e-resíduo coletado tem crescido ao longo dos anos, chegando a alcançar uma taxa de crescimento na ordem de 85% entre os anos de 2005 e 2017, conforme pode ser visto na Figura 7.

---

<sup>11</sup> *Purchasing Power Parity* (PPP) são as taxas de conversão de moedas que equalizam o poder de compra de diferentes moedas pela eliminação das diferenças de níveis de preços entre países (Baldé et al., 2017).

<sup>12</sup> Substituição de um bem ainda funcional por outro, em decorrência de seu avanço tecnológico e de suas novas, necessárias e mais atraentes funcionalidades.



**Figura 7** – Coleta de e-resíduo na Holanda ao longo do tempo.  
Fonte: Eurostat (2020).

Os produtos eletroeletrônicos colocados no mercado holandês em 2005 somaram 46.974 toneladas; ao passo que, em 2017 alcançaram o volume de 417.362 toneladas. Um crescimento de aproximadamente 790%, em um país que tem como uma de suas características industriais, ser, essencialmente, um importador de matéria-prima. Portanto, nessa lógica de consumo, é esperado que o e-resíduo apresente um padrão de crescimento, em um ritmo próprio, em função das políticas empresariais e públicas quanto ao descarte e tratamento de seus resíduos.

O cenário de coleta de e-resíduo na Holanda aponta para um crescimento exponencial ao longo do tempo, a taxa de 4,8% a.a., corroborando a premissa do modelo teórico, para o cenário 1 da Tabela 1. É válido ressaltar que o volume apresentado na Figura 4 refere-se aos e-resíduos que são alcançados pelas alternativas de coleta naquele país, o que, segundo Baldé et al. (2017), corresponde a apenas 36,8% de todo o e-resíduo gerado em 2016. Portanto, quase 2/3 do e-resíduo gerado na Holanda tem destino desconhecido, ou é descartado incorretamente, ou até mesmo exportado para outros países, sem rastreabilidade adequada e controle de massa.

Associado ao raciocínio patente aos resultados até aqui apresentados, na subseção 3.4.4, será igualmente discutido o cenário de crescimento do volume de e-resíduo coletado na UE para a amostra de 11 países ao longo de 13 anos (2005 a 2017), com a finalidade de confirmar que os parâmetros identificados seguem a mesma lógica do cenário 1 da Tabela 1, que foi perceptível nesta subseção ora concluída.

#### 3.4.4 Análise do volume de e-resíduo coletado na UE

O cenário de coleta de e-resíduo na UE, de acordo com os coeficientes da regressão, apontam para a mesma lógica encontrada na análise do crescimento da curva do volume de tecnologia naquela região. No entanto, os coeficientes, apresentados na Tabela 5, alertam para um crescimento do e-resíduo coletado (5,3%) de maneira mais acelerada do que o crescimento da tecnologia (2,1%), porém, a uma taxa semelhante a encontrada na análise do cenário de e-resíduo coletado da Holanda (4,8%). Cabe destacar que a curva de crescimento da tecnologia segue a uma taxa menor que a do e-resíduo, em função de que, nesta análise, foi considerada apenas a influência da obsolescência funcional como fator gerador do e-resíduo, por meio da *proxy* de produtos colocados no mercado. Outros fatores, além da evolução tecnológica, podem influenciar o crescimento do e-resíduo, porém não fazem parte do escopo desta pesquisa, como é o caso da obsolescência programada, ou manuseio indevido, ou fatores exógenos. Considerando o escopo deste estudo, novamente, o modelo teórico se mostra válido para a construção de um cenário em que, se não houver redutores eficazes, o e-resíduo explodirá no tempo, levando a consequências graves para o meio ambiente, para a economia e para a sociedade.

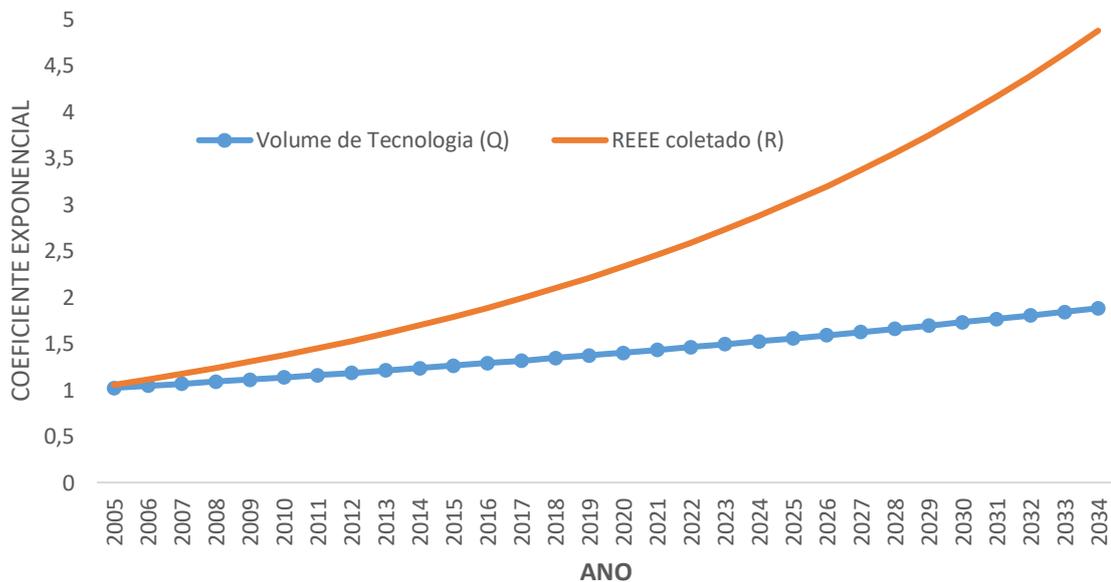
Com o teste empírico do modelo teórico para a amostra selecionada, é possível inferir que a lógica do cenário 1 da Tabela 1 permanece sendo demonstrada como sendo a mais sensata para as projeções futuras do e-resíduo gerado, e, da parcela de maior preocupação: o e-resíduo não coletado/tratado no mundo.

#### 3.4.5 Projeções de e-resíduo não coletado/tratado

No banco de dados da Eurostat (2020) os números disponibilizados tratam do montante de e-resíduo que foi coletado em um dos três caminhos: coleta pelo sistema formal; outros fluxos de reciclagem; ou, descartado em lixeiras normais.

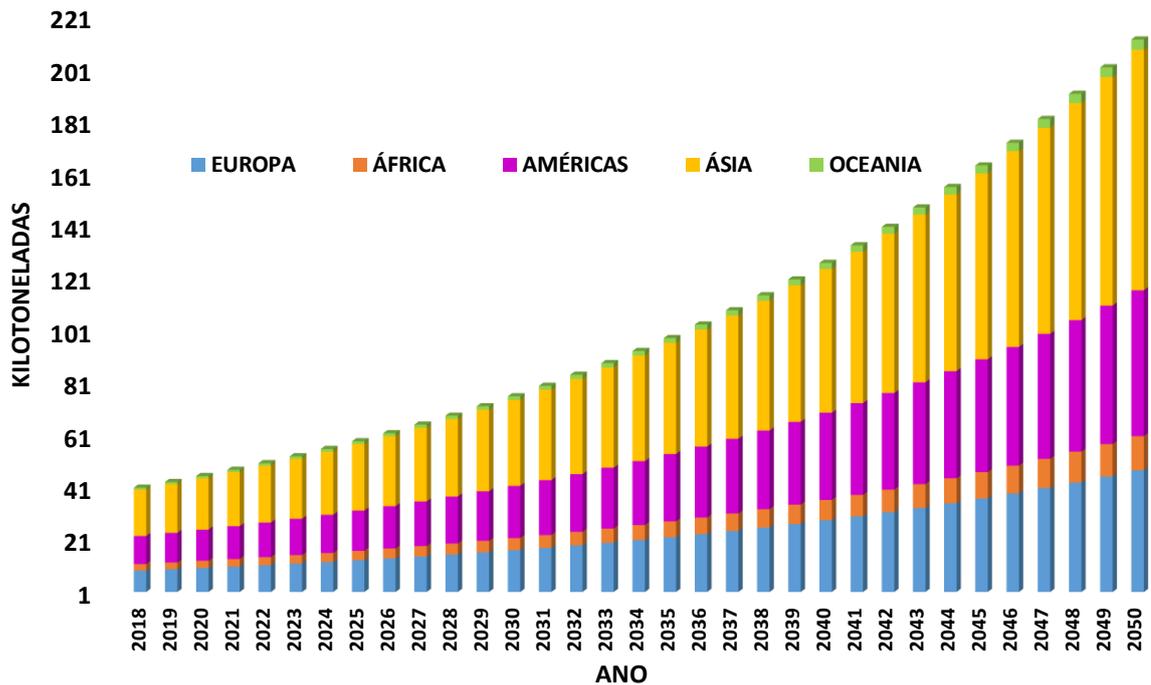
Nos relatórios da StEP (2013), Baldé et al. (2017) e Forti et al. (2018) o e-resíduo coletado/tratado nessas diversas alternativas ainda são pequenos, se comparados ao montante de e-resíduo não coletado, ou coletado, mas com tratamento desconhecido ou inadequado. Baldé et al. (2017) estima que 80% do e-resíduo gerado no mundo não é coletado ou tratado de forma adequada. Todavia, antes de discutir a projeção do e-resíduo não coletado/tratado, é mister entender, num quadrante unificado, as curvas de crescimento exponencial que os coeficientes encontrados apontam, no horizonte de 30 anos, contados a partir dos dados colhidos no primeiro instante de tempo, no caso, 2005 até 2034, como observado na Figura 8.

Em ambos os casos, com intensidades distintas, tanto o volume de tecnologia, quanto o volume de e-resíduo coletado, seguem uma tendência de crescimento exponencial ao longo do tempo, demonstrando a necessidade de mecanismos redutores e/ou de contenção da velocidade de crescimento da curva. Em especial, do volume de e-resíduo coletado, pois o mesmo tem relação direta com o volume de e-resíduo gerado no mundo, uma vez que, os relatórios de Baldé et al. (2015) e Baldé et al. (2017) mostram, por exemplo, que a taxa de coleta do e-resíduo em 2012, na EU, se manteve praticamente constante se comparada com a mesma taxa em 2016. Dito de outra forma, ao contrário da impressão que se possa ter, que, com o passar do tempo, os mecanismos de coleta tendem a se tornar mais eficientes, fazendo com que uma proporção maior de e-resíduo seja coletado num espaço de 4 anos, na realidade, o que se vê é que essa eficiência não se aprimorou, mas apenas se manteve no mesmo patamar.



**Figura 8** - Projeções de crescimento (tecnologia *versus* e-resíduo coletado) no tempo.  
Fonte: Dados da pesquisa.

Sendo assim, é plausível considerar as mesmas proporções para, a partir dos dados de coleta de e-resíduo, se fazer uma projeção de geração de e-resíduo em escala global, e, conseqüentemente, trazer o cenário de expectativa de volume de e-resíduo que será gerado, porém não será coletado, ou terá destino e tratamento desconhecidos e inadequados, respectivamente.



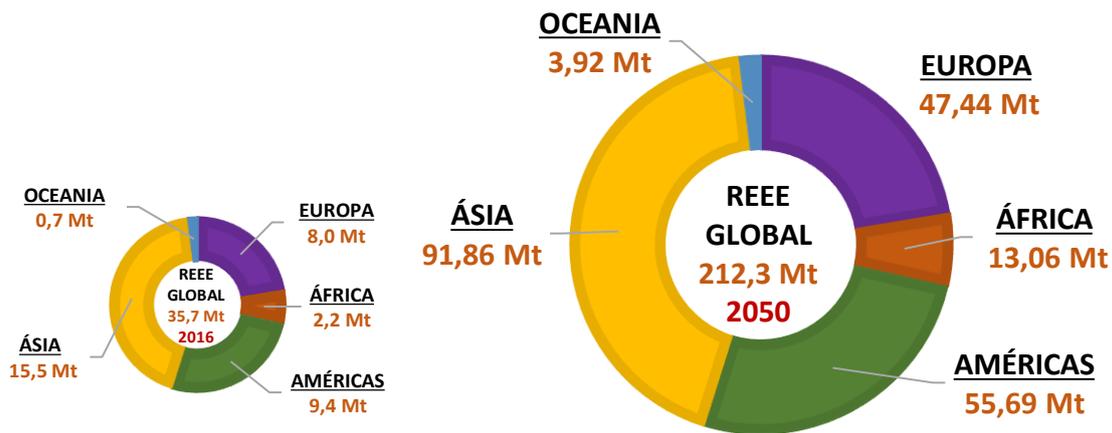
**Figura 9** - Projeções de crescimento dos e-resíduos não coletados/tratados (W) em escala global no tempo.

Fonte: Dados da pesquisa.

A projeção do comportamento de crescimento desse e-resíduo não coletado/tratado pode ser observada na Figura 9, ao longo dos próximos 33 anos (2018 a 2050), após o último ano em que os dados foram divulgados pela Eurostat.

Seguindo, então, o raciocínio empregado no modelo teórico, em todos os continentes da Terra, espera-se um crescimento exponencial do e-resíduo não coletado/tratado, empurrado pela evolução da tecnologia, que tenderá a impulsionar o consumo e as atividades-meio a modernizar cada vez mais seus equipamentos eletroeletrônicos. Se as previsões de crescimento do e-resíduo gerado no mundo eram de 3% a 4% a.a. até 2021 (Baldé et al., 2017; Forti et al., 2018; Persson, 2015; Xavier & Carvalho, 2014), os coeficientes encontrados em nosso estudo apontam para uma taxa de 5,3% a.a.

É possível, assim, comparar o volume de e-resíduo não coletado/tratado mundialmente, em 2016, com os dados projetados desses resíduos para o ano de 2050, e, dessa forma, perceber que, caso não haja melhoria da eficiência dos serviços de coleta e tratamento de e-resíduo e também, não haja ajuste ou implementação de medidas regulatórias nesse sentido, o cenário que se desenha para um futuro não muito distante é o que se apresenta na Figura 10.



**Figura 10** – Comparação entre cenários de e-resíduo gerado e não coletado/tratado em escala global (2016 e o projetado em 2050).

Nota: O cenário de 2016 foi obtido a partir dos dados divulgados por Baldé et al. (2017); e o cenário de 2050 foi projetado a partir do modelo de regressão log-linear.

Fonte: Dados da pesquisa.

Os e-resíduos são decorrentes de fatores como o crescimento populacional, a urbanização e a evolução tecnológica. No entanto, o que precisa ser pensado no cenário construído, é que o volume de resíduos desse tipo, prospectado com o modelo teórico discutido e testado empiricamente com o modelo de regressão log-linear, é o resultado da influência do tempo, da tecnologia e do comportamento de consumo da sociedade.

No teste empírico já é possível confirmar a lógica estabelecida pelo modelo teórico fundamentado nas equações de diferenças finitas, especificamente o cenário 1 da Tabela 1, que considera que o comportamento do e-resíduo segue um padrão de crescimento exponencial, com tendência a não tardar muito em levar seu volume ao ponto de impaciência da sociedade, o qual foi modelado analiticamente neste estudo para dados contínuos.

Em ambos os modelos teóricos expressos nesse estudo, convém notar que o comportamento do e-resíduo (crescimento ou redução de seu volume) é afetado pelo comportamento da sociedade e pelas políticas regulatórias impostas, bem como seu grau de eficiência na execução. E nas atuais circunstâncias, onde um sistema produtivo baseado na Economia Linear predomina, os instrumentos de mensuração e prospecção aqui discutidos se mostram úteis para refrear os impactos negativos da geração, tratamento e descarte de e-resíduo.

### 3.5 Conclusão

Visivelmente o processo produtivo baseado na Economia Linear, associado à aceleração tecnológica e ao comportamento consumista da sociedade, tem levado à geração de grandes volumes de e-resíduos a cada ano. Contudo, de acordo com os modelos aqui expostos, é possível

destacar dois aspectos desse crescimento: i) existe um ponto de impaciência da sociedade que pode ser mensurado, desde que sejam conhecidas as especificidades de cada tipo de e-resíduo; e, ii) tais volumes crescem exponencialmente ao longo do tempo, juntamente com a tecnologia, representada pelos produtos eletroeletrônicos colocados à disposição da sociedade, que é impulsionada ao consumo, entre outras motivações, pela obsolescência funcional.

Este estudo buscou, primeiramente, deduzir analiticamente, por meio das equações diferenciais de primeira ordem, o ponto de impaciência da sociedade quanto ao volume de e-resíduo tolerado, onde, a partir de tal instante e volume alcançado, a sociedade reagirá, exigirá medidas corretivas e políticas públicas no sentido de reduzir os impactos ambientais, sociais e econômicos causados pelo crescimento exponencial do e-resíduo. A proposta foi baseada num modelo logístico e exige que, para determinar o volume máximo tolerável pela sociedade no tempo, sejam, antes, conhecidos alguns parâmetros de especificação das classes e tipos de cada e-resíduo, os quais subsidiarão a aplicação empírica do modelo, dando um forte suporte decisório para a criação e aprimoramento da eficiência e eficácia de mecanismos regulatórios e processos produtivos redutores da curva exponencial do e-resíduo.

Num segundo momento, usando alternativamente as equações de diferenças finitas, em função de sua utilidade para os dados discretos disponíveis na base de dados da Eurostat, foi modelado o comportamento do e-resíduo ao longo do tempo, a partir da premissa de que a tecnologia de hoje, também mensurada no tempo, gera o e-resíduo de amanhã. E que a evolução da tecnologia se comporta de forma similar ao comportamento do crescimento do e-resíduo. Esta premissa foi testada, a partir de um modelo de regressão log-linear, onde três cenários eram possíveis de ocorrer: i) explosão; ii) estabilidade; e iii) redução a zero. Os resultados mostraram que o comportamento do e-resíduo, em relação a seu crescimento, não o fará desaparecer a longo prazo, nem tende a ser estabilizado no tempo, mas sim, que se comporta crescendo exponencialmente a cada ano, e que, mantidas as condições, políticas públicas e empresariais atuais, a tendência é que seu volume exploda ao longo do tempo, e, possivelmente, atinja, com brevidade de anos, o ponto de impaciência da sociedade.

Explorando os coeficientes do modelo de equações de diferenças finitas encontrados no modelo log-linear, optou-se por ilustrar, por meio de projeções, o cenário de explosão do crescimento do e-resíduo para um período de 33 anos (2018 a 2050), bem como comparar o cenário relatado por Baldé et al. (2017) do e-resíduo que foi gerado em 2016, com o cenário projetado para o ano de 2050. Em ambas as ilustrações, a mensagem é preocupante, no sentido de que, não havendo medidas regulatórias mais rígidas, eficientes e eficazes, e não havendo uma mudança de paradigma no sistema produtivo, desde a extração até a destinação final, é

possível que haja um colapso nos sistemas de escoamento, tratamento e disposição final de e-resíduos em escala global, e com consequências severas para os ecossistemas, sistemas de saúde, econômicos e sociais, aumentando sobremaneira a nossa pegada ecológica e ameaçando a manutenção da vida na Terra.

O estudo teve como principal limitação a escassez da base de dados para o e-resíduo em escala global e regional, onde só foi possível testar o modelo log-linear em uma amostra reduzida de países que possuíam dados completos, e no período de pouco mais de uma década (2005 a 2017). No entanto, é perceptível em outros estudos, que essa tem sido uma limitação comum, uma vez que a estruturação de uma base de dados sólida e confiável sobre os e-resíduos ainda é incipiente e relativamente nova.

Por fim, para fins de aprofundamento e continuidade das pesquisas nesse contexto, recomenda-se, a partir das conclusões aqui alcançadas, que possa ser construída uma escala de especificações de e-resíduos, a fim de mensurar o volume máximo de cada tipo de resíduo no qual a sociedade está disposta a suportar, antes de atingir seu ponto de impaciência. Poderiam, nesse caso, ser estudados os componentes residuais de um smartphone, cuja composição leva um elemento químico de alto valor, ao mesmo tempo, de alto risco se descartado no meio ambiente: a prata, considerando como especificações, o tempo de exaustão de suas reservas e sua taxa de reciclagem, por exemplo. Em uma linha mais ampla, também podem ser discutidos os caminhos para uma concepção alternativa de sistemas produtivos que possam funcionar como redutores do crescimento do e-resíduo, como é o caso dos modelos de negócios sustentáveis baseados no conceito da Economia Circular.

#### **4 BASTA! OU ELES, OU NÓS! UMA REFLEXÃO SOBRE O PONTO DE IMPACIÊNCIA DA SOCIEDADE NO MERCADO DO E-RESÍDUO SOB AS LENTES DO MULTIPLE BOTTOM LINE E DA ECONOMIA CIRCULAR**

---

Este capítulo apresenta o segundo artigo tese publicado no XXII ENGEMA - Encontro Internacional de Gestão Empresarial e Meio Ambiente e está atualmente em avaliação na Revista de Administração, Ciências Contábeis e Sustentabilidade – REUNIR (Anexo B). Seus dados referenciais, para consulta, são:

Porto, W. S., Freitas, M. A. L. de, & Silva, A. S. (2020). Basta! Ou eles, ou nós! Uma reflexão sobre o ponto de impaciência da sociedade no mercado do e-resíduo sob as lentes do Multiple Bottom Line e da Economia Circular. *XXII ENGEMA - Encontro Internacional de Gestão Empresarial e Meio Ambiente*, 1–19. Recuperado de <http://engemausp.submissao.com.br/22/anais/arquivos/139.pdf>.

#### 4.1 Introdução

O processo de extração, produção, consumo e descarte, conhecido como Economia Linear, tem predominado nos diversos setores de atividades econômicas mundiais, tornando cada vez mais escassos, tanto os recursos naturais, quanto as oportunidades de geração de valor (Weetman, 2019). Esse processo *mainstream* tem causado um impacto ambiental negativo de tal forma que os cientistas argumentam ser esta a Era do Antropoceno, geologicamente falando (Lewis & Maslin, 2015). Segundo essa abordagem, a humanidade, ao continuar com um sistema de produção e consumo baseado na Economia Linear, deixa um legado de insegurança no que tange à existência, sobrevivência e continuidade de gerações futuras. Isso se revela na questão que envolve a produção, consumo e descarte dos equipamentos eletroeletrônicos (EEE) e seus resíduos, aqui tratados como e-resíduos.

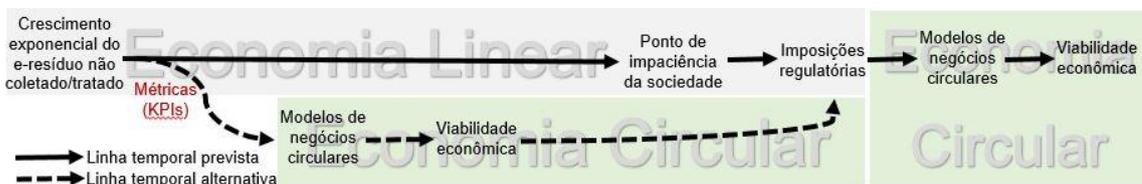
A cadeia de suprimento de EEE ainda é predominantemente linear, com crescimento exponencial dos e-resíduos e, apenas aproximadamente 20% desse tipo de resíduo tem tratamento e destinação adequados (Baldé et al., 2017, 2015), sendo o restante descartado indevidamente ao final de sua vida útil, expondo, conseqüentemente, seus componentes e suas respectivas toxinas ao meio ambiente, e afetando principalmente as populações socialmente vulneráveis (Souza, 2015).

O conflito gerado pela demanda humana por recursos do planeta, superado pela biocapacidade da natureza, exige uma mudança radical no posicionamento e participação de todos os atores envolvidos no processo. Weetman (2019, p. 34) alerta para uma reconsideração profunda e extrema das cadeias de suprimentos, com a “criação de redes simbióticas colaborativas, capazes de se interconectar dentro dos e entre os setores de atividades”. O alto grau de transparência exigido em relação aos fornecedores, materiais e negócios, nessa perspectiva, proporciona *loops* de retorno favoráveis à eficácia na geração de valor e na mudança de paradigmas comportamentais em toda a sociedade.

Nesse contexto, a sustentabilidade, em seu aspecto corporativo, dado a abordagem *Multiple Bottom Line* que dimensiona as práticas sustentáveis segundo os focos econômicos, de governança, éticos, sociais e ambientais (Brockett & Rezaee, 2013), proporciona como alternativa a visão do sistema de produção como uma cadeia cíclica, conhecida como Economia Circular, a qual busca dissociar o crescimento econômico do esgotamento de recursos naturais e degradação ambiental (Hofmann, 2019; Liu, Li, Zuo, Zhang, & Wang, 2009; Murray, Skene, & Haynes, 2016; Xue et al., 2010). Esse conceito holístico funciona como um guarda-chuva para açambarcar práticas cíclicas baseadas em pensamento sistêmico, inovação frugal, biomimética e química verde. Suas principais influências são a Economia de Desempenho,

Ecologia Industrial, *Cradle to Cradle*, Economia Azul e Capitalismo Natural (Weetman, 2019). A Economia Circular tem potencial para assumir posição de sistema *mainstream* nas cadeias de suprimentos, desde que sejam superadas suas limitações (Korhonen, Honkasalo, & Seppälä, 2018).

Dessa forma, dada a complexidade do contexto introdutório apresentado, este trabalho procura discutir a Economia Circular como alternativa para a sustentabilidade corporativa do mercado de e-resíduos, sob a ótica do *Multiple Bottom Line*, em suas cinco dimensões, destacando a dimensão econômica como principal agente motivador para a transição de modelos negócios lineares para modelos de negócios circulares. O objetivo é fundamentar uma reflexão sobre a estratégia de antecipação ao ponto de impaciência da sociedade, quanto aos marcos regulatórios, para justificar a transição viável, ou não, para uma Economia Circular, sob a ótica de uma dimensão econômica, ou seja, trazer uma reflexão sobre a performance do mercado de e-resíduos, discutindo um cenário de oportunidades econômicas e sustentáveis, embasado no conceito de Economia Circular como fator-chave mitigador do crescimento do e-resíduo não coletado/tratado (Figura 11).



**Figura 11** – Framework do ensaio teórico para o mercado do e-resíduo

Nota: KPIs (Key Performance Indicators)

O trabalho está dividido em mais quatro seções. A segunda seção aborda a problemática do e-resíduo, e o mercado oriundo deste, como um *driver* que impulsiona, inevitavelmente, para uma mudança de mentalidade nos tradicionais modelos de negócios lineares. A terceira seção trata de discutir o ponto de impaciência da sociedade, sua influência nos marcos regulatórios e no processo decisório corporativo. A quarta seção traz à discussão uma alternativa de antecipação ao ponto de impaciência da sociedade: a Economia Circular, fundamentada nas premissas da sustentabilidade corporativa e seus critérios, sob a lente da abordagem do *Multiple Bottom Line*. A quinta seção conclui.

#### 4.2 A dinâmica do e-resíduo como *driver* para uma metanoia disruptiva

As discussões em torno do e-resíduo tomaram proporções cada vez maiores, tanto nas esferas do poder público quanto na iniciativa privada, no terceiro setor e no meio acadêmico. Todavia, o problema do e-resíduo não pode ser resolvido sem uma mudança na postura mental

atual, sendo mister uma ruptura de paradigmas obsoletos para uma concepção de novos paradigmas que apontem para uma solução ótima. Assim, propõe-se uma metanoia disruptiva para o mercado do e-resíduo, onde os problemas possam ser enxergados sob novas lentes. Para tal, é preciso avaliar o que impulsiona e direciona os argumentos de uma mudança de mentalidade, ou seja, identificar *drivers* de mudança.

#### 4.2.1 O e-resíduo não coletado/tratado tende a explodir no tempo

O primeiro *driver* para uma reformulação mental e comportamental no mercado do e-resíduo são os registros expostos pela literatura cinza e por pesquisadores que estudam e monitoram a geração, descarte, tratamento, destinação e disposição final do e-resíduo no mundo. Os resultados apontam, não apenas para um crescimento acelerado da geração de e-resíduo (Figura 12), mas também que a maioria do e-resíduo gerado, cerca de 82,6% (Forti et al., 2020), não será coletado nem tratado adequadamente, sendo descartado indevidamente no meio ambiente, causando problemas sociais, ambientais e de saúde pública em escala global. (ABDI, 2012; Awasthi et al., 2018; Balde et al., 2017, 2015; Eurostat, 2018; Forti, Baldé, & Kuehr, 2018; Forti et al., 2020; Ikhlayel, 2016; Lu et al., 2014; Magalini, Kuehr, & Baldé, 2015; Pickin & Randell, 2016).

Em 2019, foram geradas cerca de 53,6 Mt (milhões de toneladas) de e-resíduos no mundo. Todos os continentes registraram coletas formais e reciclagem de e-resíduos em quantidades bem menores do que as quantidades estimadas de geração desse tipo de resíduo naqueles continentes. A Ásia foi o continente com maior quantidade de e-resíduo gerado (24,9Mt) e a Europa tem a maior taxa per capita de e-resíduo (16,2 kg per capita).



**Figura 12** – E-resíduo global gerado por ano.

Fonte: (Forti et al., 2020)

Nota: As projeções futuras não levam em consideração efeitos econômicos referentes à crise do Covid19.

Além disso, o fluxo de exportação do e-resíduo, prática comum em países ricos, tem implicado na transferência do problema para outros países, aumentando a sustentabilidade em países desenvolvidos em detrimento da sustentabilidade de países em desenvolvimento, provocando um efeito bumerangue e expondo as limitações da gestão e governança do e-resíduo em escala global (Korhonen et al., 2018; Lepawsky & McNabb, 2010; Souza et al., 2016).

Já é percebido por empresas multinacionais, startups, governos, organizações não-governamentais e pesquisadores que o comportamento monitorado do e-resíduo, no mundo, revela o caráter de finitude dos recursos naturais. Boulding (1966) já alertava que “qualquer um que acredite que o crescimento exponencial pode durar para sempre num mundo finito é louco ou economista”. Essa percepção implica na necessidade da busca por uma alternativa sustentável de produtos, processos e modelos de negócios mitigadores das implicações negativas do e-resíduo para a saúde e o meio ambiente (Weetman, 2019).

#### 4.2.2 O e-resíduo é uma questão social e de saúde pública

Outro aspecto a considerar como *driver* de mudança, é a implicação do e-resíduo na saúde humana, alertado há 15 anos por Widmer, Oswald-Krapf, Sinha-Khetriwal, Schnellmann, e Böni (2005). Souza (2015) concluiu que, no ambiente de cooperativas de catadores no Brasil, foram encontrados, embora em níveis baixos devido ao volume recebido, metais tóxicos no ar e materiais particulados no solo, os quais lançam um alerta de monitoramento, pois entre eles estão metais como o Mercúrio, Arsênio, Bário e Chumbo, todos altamente nocivos, que quando absorvidos pelo organismo humano, geram problemas no sistema nervoso, respiratório e excretor. As emissões de carbono se encaixam nesse contexto tanto quanto os metais pesados presentes na indústria de baterias automotivas, os quais poluem o ar provocando danos graves à saúde da população, como o quadro patológico da intoxicação ocupacional por chumbo – plumbismo, saturnismo – identificado nos estudos em pacientes que trabalham com reciclagem de baterias (Fonte, Agosti, Scafa, & Candura, 2007). Já na Tailândia, esses mesmos tipos de trabalhadores, por manusearem e desmontarem e-resíduos sem os cuidados necessários, têm potencial para desenvolver câncer, por exposição ao Cádmio e Níquel, em níveis maiores do que os critérios aceitáveis (Puangprasert & Prueksasit, 2019). Na China, os trabalhadores envolvidos diretamente na fabricação e reciclagem de placas de circuito impresso (PCI) são expostos ao contato com metais pesados, como o Cromo, elemento altamente cancerígeno, e por isso estão sujeitos a efeitos adversos na saúde quando não estão usando equipamentos de proteção individual (EPIs) adequados (Xue, Yang, Ruan, & Xu, 2012; Zhou et al., 2014).

Essa exposição assume uma extensão que vai além das estruturas industriais. Prestadores de serviços de assistência técnica em equipamentos eletroeletrônicos se dizem despreparados para destinar os equipamentos inservíveis abandonados por clientes. Assim, partes desmontadas dos equipamentos acabam por expor elementos tóxicos no ar ou no solo do ambiente onde ocorre movimentação de pessoas que transitam sem EPIs (Appelt, Porto, Pedro Filho, Carneiro, & Costa, 2015; Porto, Souza, Campos, & Freitas, 2018).

Ampliando esse espectro de exposição de elementos tóxicos, domicílios também são alcançados por elementos tóxicos presentes nos e-resíduos (Quadro 1), como os relatados no entorno de Guiyu (área de tratamento informal de e-resíduos) na China. Nos domicílios, próximos daquela área, 237 mulheres grávidas apresentaram níveis preocupantes de Cádmiu na urina, resultando em um aumento no risco de resultados adversos nos partos, afetando peso, altura e circunferência da cabeça de bebês do sexo feminino, e os índices de APGAR (*Appearance, Pulse, Grimace, Activity, Respiration*) em bebês do sexo masculino (Zhang et al., 2018). Nesse sentido, percebe-se que há uma assimetria informacional por parte do poder público junto à população, referente a conscientização do problema de reter o e-resíduo e de descartá-lo incorretamente.

**Quadro 1** – Fontes de exposição e impactos na saúde pública e meio ambiente.

FORMAS DE EXPOSIÇÃO	FONTES DE EXPOSIÇÃO	IMPACTOS NA SAÚDE	LITERATURA
Exposição da comunidade	a) Alimentos, água, ar; e b) Oficinas em casa	a) Resultados adversos nos partos;	Alabi et al., 2012; Cong et al., 2018;
Exposição ocupacional	a) Vapores inalados da queima de fios e cozimento de placas de circuitos impressos; b) Mulheres grávidas que trabalham como recicladoras – exposição de fetos.	b) Neurodesenvolvimento alterado; c) Resultados adversos na aprendizagem; d) Danos ao DNA; e) Efeitos cardiovasculares adversos;	Davis & Garb, 2019; Decharat, 2018; Decharat & Kiddee, 2020; Huo, Dai, et al., 2019; Huo, Wu, et al., 2019; Landrigan & Goldman, 2011; Nti et al., 2020;
Exposição de crianças	a) Ingestão de poeira contaminada em superfícies; b) Crianças brincando com eletrônicos desmontados; c) Crianças e adolescentes trabalhando na coleta, desmontagem e reciclagem.	f) Efeitos respiratórios adversos; g) Efeitos adversos no sistema imunológico; h) Doenças de pele; i) Perda auditiva; j) Câncer.	Pronczuk-Garbino, 2005; Seith, Arain, Nambunmee, Adar, & Neitzel, 2019; Soetrisno & Delgado-Saborit, 2020; Xu et al., 2020; Zhang et al., 2018
Contaminação ambiental	a) Despejo de ácido nos rios, usado para remover ouro; b) Lixiviação de substâncias oriundas de aterros ou eletrônicos armazenados; c) Partículas e toxinas oriundas de desmantelamento de eletrônicos; d) Contaminantes que entram no sistema de água e no sistema alimentar através de gado, peixes e plantações.		

Fonte: Adaptado (Forti et al., 2020, p. 64)

Considerando que o e-resíduo domiciliar se enquadra como resíduo doméstico perigoso, este também pode exercer influência sobre outros fluxos de resíduos, alterando as condições redox<sup>13</sup> ou causando reações diretas com outros resíduos perigosos. A população, no entanto, revela grau de conscientização ambiental insuficiente para entender os malefícios dos elementos tóxicos presentes no e-resíduo (Inglezakis & Moustakas, 2015; Porto, Brasnieski, Souza, & Freitas, 2020). As principais fontes e impactos dessa exposição foram descritas por Forti et al. (2020), conforme resume o Quadro 1. Todos os estudos aqui relacionados alertam que os riscos presentes nos e-resíduos podem afetar não apenas trabalhadores informais que atuam diretamente com o manuseio de componentes perigosos, como também a comunidade e os biomas em torno das áreas de desmontagem e reciclagem de e-resíduos.

Além das implicações para a saúde humana, a exposição tóxica ao e-resíduo e seus componentes, e também a negligência no trato com o e-resíduo, refletem negativamente no aspecto social da comunidade e trabalhadores do entorno. Cita-se no Brasil, o caso da indústria COBRAC – Companhia Brasileira de Chumbo, que durante mais de três décadas descartou Chumbo e Cádmiio indevidamente em seu entorno, contaminando o meio ambiente e muitos dos residentes da cidade de Santo Amaro da Purificação na Bahia. Nesse caso, as consequências vão além das doenças provocadas nos habitantes da cidade. A negligência da empresa refletiu em seu fechamento, ocasionando o desemprego de todos os seus funcionários, além do desequilíbrio financeiro e psicológico dos ex-funcionários, pois estes foram alvo de rejeição e discriminação por outras empresas da região, pelo fato de serem um potencial risco de passivo trabalhista (Bomfim, 2011). O fato fragilizou não só os ex-funcionários, mas todas as famílias dependentes deles, impactando em um malefício social por muitos anos naquela região.

Dessa forma, a despeito de ambos os *drivers* apontados, houve um incremento, entre 2010 e 2020, de estudos sobre o comportamento do e-resíduo no mundo e os efeitos sociais, na saúde humana e no meio ambiente, de forma adversa, associados à exposição ao e-resíduo. Tais efeitos, mesmo impactando por tanto tempo, têm um limite para a sociedade.

### **4.3 O ponto de impaciência da sociedade**

A geração de e-resíduo tende para um volume máximo suportado pela sociedade, ou dito de outra forma, tende a um ponto no tempo, no qual a sociedade pressionará o poder público

---

<sup>13</sup> As reações de oxirredução, conhecidas como reação redox, são reações de transferências de elétrons que produzem, entre um conjunto de espécies químicas, um oxidante e um redutor. A ferrugem é um aspecto visual da ocorrência de uma reação de oxirredução (Houaiss & Villar, 2001).

e as empresas a adotarem políticas públicas para evitar que esse nível indesejado seja alcançado ou ultrapassado. E nesse sentido, o Estado tende a agir, impondo restrições e criando regulamentação para não permitir que a sociedade seja penalizada pelo descarte equivocado de tais resíduos. Isso ocorre porque ao longo da história da humanidade civilizada, os paradigmas sociais que direcionam uma sociedade são construídos sob demanda da própria sociedade.

É importante destacar que a caminhada rumo à conscientização ambiental da sociedade de forma plena, ainda é um desafio, porém, tem avançado aceleradamente. Por um lado, há indícios científicos que apontam que a sociedade não demonstra plena conscientização das implicações do comportamento do e-resíduo, no curto e no longo prazo, nem de políticas e iniciativas mitigatórias de seus impactos negativos na saúde humana e no meio ambiente (Kirchherr et al., 2018; Liu et al., 2009; Xue et al., 2010). Entretanto, por outro lado, outros estudos mostram que a implementação de modelos de consumos colaborativos têm revelado um alto grau de conscientização dos cidadãos em torno do consumo e da produção sustentáveis (Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2016).

Um exemplo da influência da sociedade conscientizada ambientalmente nas finanças corporativas é o caso da maior empresa gestora de ativos do mundo, a BlackRock, Inc., que externalizou sua preocupação com a sustentabilidade corporativa, afirmando que o dinheiro gerido por ela pertence a pessoas de diversos países, que buscam atingir objetivos de longo prazo, como aposentadoria. E que, embora as mudanças no mercado financeiro capazes de refletir os anseios da sociedade sejam lentas, a conscientização de investidores tem mudado muito rapidamente, devendo provocar mudanças estruturais nas finanças corporativas. O reflexo da influência dessa parcela da sociedade investidora é que a BlackRock alerta que votará contra administradores/gestores que não estiverem com suas práticas operacionais alinhadas progressivamente com a sustentabilidade (Fink, 2020).

No caso do mercado de equipamentos eletroeletrônicos (EEE), o esgotamento dos recursos extraídos para sua fabricação é iminente. Como agravante, alguns desses insumos, devido às falhas no processo de logística reversa, têm uma baixa taxa de reciclagem. Basta ver nos estudos sobre escassez dos elementos da Tabela Periódica, onde matérias-primas para componentes eletrônicos, tais como Ouro, Prata e Cádmiio possuem reservas remanescentes estimadas para se esgotarem nos próximos 50 anos. O Cádmiio, por exemplo, além de estar entrando em processo de escassez nesse período, sua taxa de reciclagem está entre 10% e 25% (EMF, 2013c, p. 28; Forti et al., 2020, p. 58). Sem substituto para tais elementos, e com o crescimento exponencial dos e-resíduos, a sociedade tende a se conscientizar de que, para sua sobrevivência, não está disposta a extrapolar um determinado volume máximo de Ouro, Prata

e Cádmio, entre outros, gerados como e-resíduos, porém, deixando de: a) ser coletados, b) tratados, e c) reentrar no processo produtivo para suprir novas demandas de EEE.

A resposta do Estado ao ponto de impaciência da sociedade, devido às exigências oriundas, inicialmente, do consumidor e cidadão conscientizado, vem na forma de imposições regulatórias, direta ou indiretamente relacionadas com o e-resíduo, como as que já estão em vigor em diversos países dos 5 continentes (Forti et al., 2020, pp. 105–116). Recentes propostas de políticas públicas, empresariais e societárias, têm inspirado o surgimento de diversos marcos regulatórios ao redor do mundo.

No entanto, leva tempo até o amadurecimento de uma imposição regulatória ser considerada eficaz. O país que mais avançou na legislação e implementação da Economia Circular foi a China, com a Lei de Promoção à Economia Circular (LPEC). Ainda assim, após os primeiros 10 anos de vigência, a LPEC ainda não apresentou eficácia significativa no que tange à promoção da Economia Circular no país, o que contrariou as expectativas anteriores. Nesse caso, a eficácia da LPEC na China foi mensurada estimando o grau de circularidade da economia chinesa, num estudo comparativo das mudanças de determinados indicadores-chaves nos períodos pré e pós adoção da LPEC. Esse é um dos dispositivos legais que guardam relação direta com a gestão dos e-resíduos na China. Outras duas legislações também se destacam por abranger a gestão de e-resíduos: Lei de Controle de Poluição de Resíduos Sólidos (LCPRS) e Lei de Promoção da Produção Limpa (LPPL). Todavia, nenhum dos normativos regulamenta a coleta de e-resíduo, o que dificulta a implementação de um sistema de logística reversa eficaz naquela região (Hu, He, & Poustie, 2018; Lu et al., 2014).

No Brasil, um dos princípios básicos para o exercício da atividade econômica é a defesa ao meio ambiente (Brasil, 2016), o que significa que sistemas produtivos que agridam ou comprometam a sustentabilidade do planeta Terra, em território brasileiro, podem, por meio de políticas públicas regulamentadas, ser combatidos, desestimulados, descontinuados ou sobretaxados. No caso dos e-resíduos, os principais marcos regulatórios são a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a partir da qual surgiram legislações estaduais e municipais correlatas, e o Acordo Setorial para implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes, o qual atualmente teve sua imposição regulatória reforçada pela sua transformação em um Decreto (Brasil, 2010b, 2010a, 2017, 2020; MMA, 2019). Tais regulações normativas buscam orientar um aumento da destinação ambientalmente adequada dos resíduos eletroeletrônicos na ordem de 17% do volume comercializado internamente no Brasil, no prazo de cinco anos, contados a partir de 2018.

#### 4.4 A alternativa tem nome: antecipação

Diante do exposto, cabe à empresa, como reflexão, decidir se produz até que a sociedade se inquiete e cobre medidas corretivas, ou, se vale a pena antecipar ações que evitem esse momento e que se revertam em benefícios diretos e indiretos para ela própria. Entretanto, a estratégia de antecipação passa pela discussão e esclarecimento dos critérios e dimensões da sustentabilidade, para a concepção de modelos de negócios alternativos capazes de dissociar a busca pela lucratividade do esgotamento dos recursos naturais e do aumento da poluição ambiental.

##### 4.4.1 *Highlights* do marco teórico da sustentabilidade

O marco histórico da consciência ambiental moderna e da abordagem pioneira sobre desenvolvimento sustentável é atribuído aos estudos de Carson (1962). No entanto, o destaque influenciador nas discussões sobre sustentabilidade empresarial tem sido, desde o final da década de 60, o conhecido Clube de Roma<sup>14</sup>. Atualmente, o Clube de Roma já tem em seu acervo, 47 relatórios, desde o primeiro, “The Limits to Growth” até o mais recentemente publicado em 2020, “*Bildung - Keep Growing*” (Rome, 2020). Com a publicação do seu primeiro relatório, o Clube de Roma despertou a discussão sobre a percepção conceitual da sustentabilidade. Este tem sido um conceito reconhecidamente dinâmico, o qual pode apresentar configurações e interpretações diversas, dependendo dos propósitos que forem alinhados (Brockett & Rezaee, 2013; Mebratu, 1998).

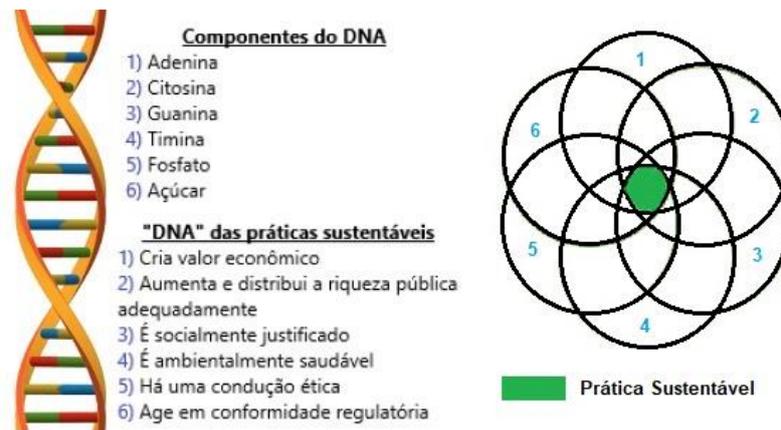
No entanto, o Relatório de Brundtland (WCED, 1987) definiu, pela primeira vez, o termo “sustentabilidade” e estabeleceu que as políticas públicas, estratégias empresariais e ações efetivas realizadas no presente, serão assim chamadas de sustentáveis, se estas não comprometerem a continuidade das gerações futuras no que tange ao atendimento de suas necessidades. Entretanto, é preciso ressaltar que tais práticas, para que sejam sustentáveis, devem atender a seis critérios (Brockett & Rezaee, 2013) que, juntos, formam um modelo descritivo de sustentabilidade, buscando se mostrar maior do que as somas de suas partes, dando um caráter positivamente sinérgico ao valor das organizações envolvidas (Ijiri, 1975; Kaplan & Norton, 2006).

Nesse contexto, é salutar tecer uma reflexão sobre a importância do atendimento conjunto e concomitante dos critérios de sustentabilidade. Isto pode ser feito por meio de uma

---

<sup>14</sup> Uma organização de pessoas, composta por profissionais de todo o mundo das áreas da diplomacia, indústria, academia e sociedade civil, que, inicialmente, se reuniu em Roma para discutir as suas preocupações relativas ao crescimento econômico e ao consumo dos recursos limitados.

analogia com a estrutura do Ácido Desoxirribonucleico (DNA), que possui, igualmente, seis componentes necessários ao seu modelo descritivo de dupla-hélice (Watson, 1968). Da mesma forma que o DNA só existe em função da sinergia entre seus seis componentes juntos, a sustentabilidade só é possível de ser vista em seu conceito pleno, em função da presença simultânea e sinérgica entre seus seis critérios, como pode ser visto na Figura 13.



**Figura 13** – Analogia entre a estrutura do DNA e os critérios de sustentabilidade  
Nota: DNA (Ácido Desoxirribonucleico).

Portanto, desse ponto de vista, uma prática é sustentável, ou, uma empresa é sustentável, se, e somente se, em seu “DNA” de práticas sustentáveis, todos os seus componentes se completam, como em um quebra-cabeça. Este conceito é resultado de variadas interpretações e discussões ao longo das últimas três décadas do século XX (Mebratu, 1998).

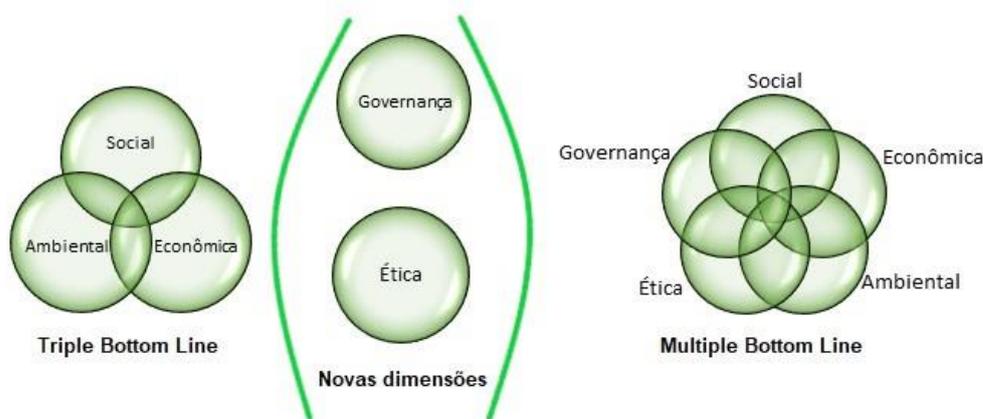
#### 4.4.2 A sustentabilidade e suas perspectivas em questão: qual a mais importante?

Antes da primeira metade do século XX já se acreditava no conceito de destruição criativa, no qual o capitalismo eliminaria empresas não criativas e não competitivas. Isso porque, no processo de acumulação de capital, as empresas são levadas à competição acirrada e a serem cada vez mais inovadoras em seus produtos, processos e tecnologias (Schumpeter, 1942). Ocorre, então, a abundância compartilhada de produtos no mercado, decorrente de sua crescente e diversificada oferta, aliada ao estímulo ao consumismo proposto como estratégia em meados da década de 1950 (Lebow, 1955). Com o aquecimento da economia, o padrão de vida dos consumidores aumenta, bem como sua busca por mais igualdade, traduzida pela oportunidade de possuir bens que antes eram restritos à classe alta da sociedade. O reflexo desse comportamento, nas empresas, é que a competição força a inovação, para manutenção e/ou aumento do seu *marketshare*. A tecnologia, por sua vez, como produto da ciência e da engenharia, alcança cada vez mais o cotidiano das pessoas, operando em um ciclo de influência

mútua, entre oferta e demanda, não necessariamente nessa ordem. Dito de outra forma, ao mesmo tempo em que as pessoas são agentes do desenvolvimento tecnológico, são também cada vez mais tecnologicamente dependentes. Essa situação torna proeminente, dentre outros problemas, a questão ambiental relacionada às consequências negativas do processo produtivo tradicional de produção-consumo-descarte criticado por Leonard (2020).

A sustentabilidade, abordada no subtópico anterior, no contexto corporativo, passa a ser discutida sob três perspectivas distintas, porém complementares e interdependentes: ambiental, social e econômica. Surgem, então, os princípios do *Triple Bottom Line*, trazendo implícita a noção de uma simbiose genuinamente social como fator-chave de sucesso das iniciativas de se construir um capitalismo sustentável para a economia do século XXI (Elkington, 1997).

Mais recentemente, essas perspectivas foram revisadas, e, um novo olhar, sob novos ângulos da sustentabilidade corporativa, foi incorporado em sua análise. Nesse novo contexto, as perspectivas de ética e governança assumiram um lugar nas abordagens estratégicas de sustentabilidade, e ampliaram o espectro de pesquisa, sendo tais perspectivas vistas como dimensões da sustentabilidade corporativa, as quais são conhecidas como *Multiple Bottom Line* (Brockett & Rezaee, 2013), visto na Figura 14.



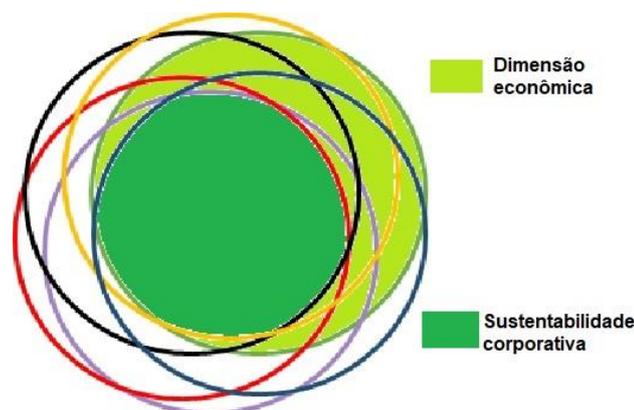
**Figura 14** – Evolução das dimensões da sustentabilidade corporativa.  
Fonte: Adaptado (Brockett & Rezaee, 2013; Elkington, 1997).

As cinco dimensões do *Multiple Bottom Line* estão estruturadas como métricas de sustentabilidade corporativa, avaliando a performance conjunta das áreas: econômica, governança, social, ética e ambiental (EGSEA). Brockett e Rezaee (2013, p.14) apontam a dimensão econômica como sendo a mais importante dentre as cinco citadas, classificando tal dimensão como pedra angular da sustentabilidade dos negócios. Os autores justificam que “as organizações podem sobreviver e produzir desempenho sustentável somente quando continuarem lucrativas, criando valor para os acionistas”. Sob a ótica desse argumento, as

empresas podem auferir lucros sustentáveis, desde que a performance econômica seja transparente (Brockett & Rezaee, 2013; Nilipour, Silva, & Li, 2020; Rezaee, 2017; Silva, 2015).

A questão, nesse ponto, é que o equilíbrio entre dimensões mensuráveis deve buscar a melhoria contínua, traduzida em estratégias e ações que se ajustem a um padrão ótimo, como ocorre, analogamente, com a lógica do ajustamento de uma linha de regressão aos dados de uma amostra, visto sob a perspectiva do diagrama de Venn (Gujarati & Porter, 2011, p. 95; Ruskey & Weston, 2011). Assim, a interseção das dimensões do *Multiple Bottom Line* (Figura 4), resultará na sustentabilidade corporativa. Porém, ponderando o pressuposto de que a dimensão econômica seja resultante das práticas e políticas adotadas nas demais dimensões, sendo aquela causada por estas, quanto maior essa interseção, maior será a consolidação da sustentabilidade corporativa na organização. Avaliando um cenário de oportunidades disruptivas, as quais buscam evitar externalidades – provavelmente penalizadas por imposições regulatórias – o alinhamento das dimensões do *Multiple Bottom Line*, aumenta sua interseção (Figura 15) e promove um ajuste ótimo de práticas e políticas circulares, as quais provém de toda a cadeia de suprimentos, que criam valor para todos os *stakeholders* da entidade.

Dessa forma, partindo do pressuposto que a sustentabilidade corporativa tem em suas dimensões as métricas necessárias para avaliar o desempenho das empresas sob vários ângulos, e assim, definir suas práticas como sustentáveis, é crível que tais métricas se traduzam em indicadores de performance nas dimensões do *Multiple Bottom Line*.



**Figura 15** – Alinhamento das dimensões da sustentabilidade corporativa em direção ao ponto ótimo de ajuste de práticas e políticas, considerando a dimensão econômica como pedra angular e efeito do *Multiple Bottom Line*.

#### 4.4.3 Sustentabilidade corporativa na prática: a Economia Circular é o caminho

A preocupação com a escassez de recursos naturais e os impactos negativos provocados pela ação do homem no meio ambiente, tem levantado estudos e debates em diversas frentes

relacionadas ao desenvolvimento sustentável. Uma dessas frentes aborda a Economia Circular, em oposição ao modelo de Economia Linear.

As discussões sobre Economia Circular vêm ganhando força em todo o mundo (Geissdoerfer, Morioka, & Carvalho, 2018; Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Hultink, 2017) e iniciaram a partir dos estudos de Boulding, (1966), que, em seus argumentos, trata a Terra como um sistema fechado, com recursos finitos, e que por essa razão, a economia designada por ele como “*spaceman economy*” deveria ser encarada como um astronauta em uma nave espacial, na qual o homem deve encontrar o seu lugar num sistema ecológico cíclico. Uma década depois, Stahel e Reday-Mulvey (1977) cunharam pela primeira vez o termo Economia Circular. Mais adiante, a definição de Economia Circular surgiu, de forma precursora, nos estudos de Pearce e Turner (1990). Desde então, as literaturas científica e cinzenta têm publicado variantes do conceito de Economia Circular, como apresentado nos estudos de Kirchherr, Reike, e Hekkert (2017), onde foram revisadas 114 definições de Economia Circular (EC), codificadas em 17 dimensões. Na concepção da ideia restaurativa e regenerativa, a EC, popularmente difundida por EMF (2019b) “cria resiliência de longo prazo, gera oportunidades comerciais e econômicas e proporciona benefícios ambientais e sociais”.

#### 4.4.3.1 O modelo de Economia Circular

O modelo de EC, baseado em ciclos biológicos e técnicos, propõe um fluxo, composto por *loops*, onde, o sistema industrial é restaurador por *design* e intenção, a reciclagem é o último recurso para evitar a disposição final dos recursos biológicos ou técnicos, e as emissões, energia e disposição final são reduzidas (EMF, 2019b).

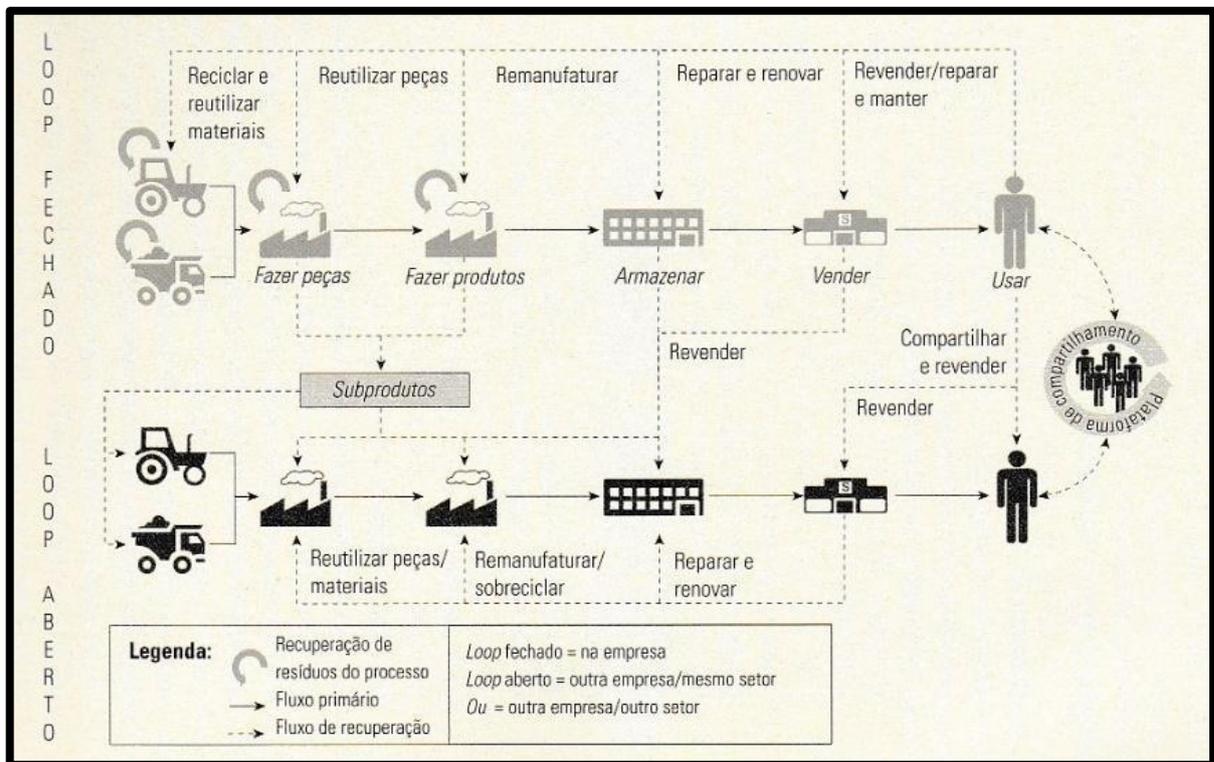
Os *loops*, tanto do lado dos ciclos biológicos, quanto dos ciclos técnicos, correspondem a uma lógica de uso de energia e efetividade da circularidade, como o *loop* “Manutenção”, mais interno, que é menor entre os *loops* do lado dos ciclos técnicos por exigir menos energia do que o *loop* “Reciclagem”, que é o *loop* que demanda maior energia entre todos para sua realização, o que justifica seu uso em último caso. Sendo assim, o coração da EC é a ideia do ciclo (EMF, 2019a). Nessa perspectiva, em vez de exigirem repetidas extrações de recursos naturais e de gerarem resíduos, a produção e o consumo devem ocorrer, tanto quanto possível, em ciclos fechados. Num ciclo econômico (tendencialmente) fechado, o desperdício e o descarte não existem. Os bens são reparados e reutilizados em vez de descartados, as matérias-primas provêm da reciclagem, em vez da extração, e assim por diante (Portugal, 2018). Quanto ao fluxo da EC, sob a perspectiva da EMF (2019b), os *loops* classificam-se de acordo com o exposto no Quadro 2.

**Quadro 2** – Classificação dos *loops* da EC.

Fechados	Quando os produtos ou materiais são retidos ou recuperados com o objetivo de serem reutilizados pela mesma empresa.
Abertos, mesmo setor	No caso de refluxo de materiais ou produtos entre empresas do mesmo setor, seja na forma de revenda, reciclagem ou remanufatura.
Abertos, transestoriais, ou entre setores	Quando o refluxo dos materiais ou produtos ocorre entre uma ou mais empresas de setores diferentes.

Fonte: Adaptado (Weetman, 2019).

Na Figura 16, é possível compreender melhor os fluxos circulares do *loop* aberto e fechado. Nesse processo de circularidade e fluxos reversos, a EC abrange múltiplos atores, com diferentes papéis na estruturação de uma rede para a logística reversa, prospectando um cenário de inovações disruptivas.

**Figura 16** – Retângulo de recuperação

Fonte: (Weetman, 2019, p. 75)

Arquétipos recentes, nesse sentido, são a Economia do Desempenho focada na venda de serviços no lugar de bens, internalizando todos os custos (Stahel, 2016), a ecoeficácia proposta pela concepção *Cradle to Cradle* (McDonough & Braungart, 2013), a inexistência de resíduos, em função da premissa de que qualquer subproduto pode ser fonte de um novo produto (Pauli, 2019), a mineração urbana como alternativa de obtenção de recursos, aproveitando,

economicamente, matéria-prima secundária (Xavier & Lins, 2018; Zhang et al., 2019), e o mercado de créditos da logística reversa descrito por (Caiado, Guarnieri, Xavier, & Chaves, 2017). Todos os exemplos citados representam uma forte influência para uma abordagem holística da EC no contexto de seus fluxos circulares, o que instiga a refletir sobre o porquê de modelos circulares serem a alternativa ao ponto de impaciência da sociedade quanto ao problema causado pelos e-resíduos.

#### 4.4.3.2 Por que Economia Circular?

Uma última reflexão oportuna nesse estudo é discutir a motivação para a escolha da Economia Circular com estratégia antecipatória ao ponto de impaciência da sociedade no que tange a questão do e-resíduo.

Entre diversos temas estudados como alternativas para o incentivo ao pragmatismo sustentável corporativo, bem como à mitigação da agressão ao meio ambiente, a Economia Circular, em pesquisas acadêmicas internacionais, tem crescido de forma muito rápida nos últimos anos (82,12% dos artigos publicados desde 2004 até abr/2017 sobre o tema se concentram entre 2013 e abr/2017), originadas predominantemente na Ásia e Europa, e é considerado o tema emergente mais publicado entre os periódicos mais produtores<sup>15</sup> em publicações de questões ambientais. (Merli, Preziosi, & Acampora, 2018). Nessa mesma linha argumentativa, as pesquisas em Economia Circular tiveram como objetos de estudo, as indústrias de equipamentos eletroeletrônicos, resíduos sólidos e e-resíduos, somando quase 1/3 das publicações no período, razão pela qual a questão do e-resíduo e seus subprodutos tem espaço e respaldo para estudo no contexto da Economia Circular, onde as soluções encontram um esverdeamento inovador e capaz de atender aos critérios de sustentabilidade.

Outro argumento válido é a alternativa que tem sido imposta até o momento. As imposições regulatórias aprovadas e vigentes têm em seu bojo a característica da circularidade dos processos produtivos, tendo como objetivos principais a redução de emissões e de extrações, o que coaduna com os princípios da EC, e mostra uma tendência em direção a legislações e aprimoramentos que abordem aspectos cíclicos (Bansal, Pratima; Roth, 2000; Hu et al., 2018; C. Lu et al., 2014; Widmer et al., 2005). Antecipar-se ao ponto de impaciência da sociedade com a EC, nesse caso, significa antecipar-se a imposições regulatórias que caminharão na mesma direção, no que tange à solução.

---

<sup>15</sup> Journal of Cleaner Production; Resources, Conservation and Recycling; Sustainability (Switzerland); Waste Management; e Journal of Industrial Ecology (Merli et al., 2018, p. 708).

Sob o argumento econômico, há dois fatores a se considerar. O primeiro diz respeito ao potencial do mercado de e-resíduo diante das opções de adoção de modelos de negócios circulares. A United Nations University/Step Initiative divulgou (Figura 17) o valor potencial de negociação do e-resíduo gerado em 2014 e o que foi perdido deste valor, em decorrência da não coleta e do descarte incorreto. São mais de US\$ 40 bilhões perdidos, o que representa uma perda de oportunidade econômica considerável.



**Figura 17** – Valor estimado do fluxo de e-resíduos em 2014

Fonte: (Per Döfnäs & Kuehr, 2017)

Em 2019, o valor dos e-resíduos gerados cresceu e foi estimado em US\$ 57 bilhões. Sob a ótica microeconômica do bem-estar, os custos e benefícios sociais carecem de métodos de valoração econômica do meio ambiente<sup>16</sup> que avaliem quando as decisões de investimentos públicos impactam no consumo da população (A. M. Freeman, 1979; Motta, 2006). Os estudos de (Otoni, Dias, & Xavier, 2020; Xavier & Lins, 2018) apontam que, dentre os vários materiais que compõem os produtos eletroeletrônicos, há recicláveis de grande valor agregado, como os metais preciosos, materiais de difícil reciclagem, como alguns tipos de plásticos, outros que não possuem valor de mercado, como a sílica, além de substâncias perigosas de potencial altamente tóxico, como os metais pesados. O ganho econômico gerado com a compra de matéria-prima reciclada pode variar entre 20% e 25%, com reflexos no estoque e no custo do produto vendido (CPV) das organizações. Golev e Corder (2017) mostraram uma visão geral das barreiras e oportunidades em torno da retenção da “riqueza” do REEE com uma análise ao longo da cadeia de valor australiana dos metais pós-consumo.

O segundo fator diz respeito ao alinhamento dos modelos de negócios com as tendências regulatórias. Como já foi dito, é iminente a regulação da mudança de padrões produtivos, de consumo e descarte, na direção da EC. Portanto, atuar antecipadamente às imposições regulatórias migrando para modelos circulares não somente acompanha uma tendência, como também evita custos de remodelagem de negócios igualmente disruptivos, porém, sem a vertente circular. Dito de outra forma, não parece ser uma estratégia economicamente viável

<sup>16</sup> Consiste em determinar quanto melhor ou pior estará o bem-estar das pessoas devido a mudanças na quantidade de bens e serviços ambientais, seja na apropriação por uso ou não (Motta, 2006, p. 13).

antecipar-se ao ponto de impaciência da sociedade efetuando a transição para modelos de negócios que não aborem os princípios da EC, sob pena de ter custo dobrado de mudança (ou de retrabalho), diante de imposições regulatórias futuras, que tendenciam a impor modelos de negócios circulares.

Nesses casos, o estudo de métricas de performance econômica para modelos de negócios circulares (*Key Performance Indicators – KPIs*) poderia dar suporte decisório direcionado à viabilidade ou não da antecipação ao ponto de impaciência da sociedade, e assim, fundamentar a transição, gerando uma vantagem competitiva em relação às empresas concorrentes.

#### 4.5 Conclusão

Conclui-se que o ponto de impaciência da sociedade frente ao crescimento exponencial do e-resíduo é iminente. E tende a trazer consigo as imposições regulatórias resultantes das exigências da sociedade junto a seus representantes públicos, seja por meio de manifestações públicas, seja por *lobby* empresarial, motivados por mudanças estruturais nas finanças corporativas, onde investidores são atraídos por empresas que buscam a sustentabilidade corporativa por meio da adequação de suas práticas ao *Multiple Bottom Line*.

Ao mesmo tempo, tendo em vista que tais imposições regulatórias, segundo a literatura, tendem a modelar as futuras cadeias de suprimentos nos moldes dos princípios da Economia Circular, parece, à primeira vista, incoerente a adoção do comportamento reativo como estratégia competitiva, uma vez que se contrapõe às inovações disruptivas. A alternativa ao ponto de impaciência da sociedade passa pela transição de modelos de negócios lineares para modelos de negócios circulares. E tal transição, em princípio, exige uma análise mais criteriosa sobre uma possível antecipação às imposições regulatórias. No entanto, o gestor pode entender não ser viável economicamente antecipar-se e aguardar as medidas legais para adequação do processo produtivo.

Destaca-se aí a dimensão econômica do *Multiple Bottom Line*, que é vista como pedra angular da sustentabilidade nos negócios (Brockett & Rezaee, 2013). Nesse sentido, se a dimensão econômica apontar para um cenário de viabilidade, por meio de KPIs definidos, as demais dimensões tendem a atender os critérios de sustentabilidade, gerando imagem positiva e legitimação perante os *stakeholders*.

As motivações para que a busca da alternativa ao problema causado pelo e-resíduo não coletado/tratado passe pela Economia Circular, pautam-se: i) pelo crescimento rápido das pesquisas internacionais em torno dos modelos de negócios circulares; ii) pela convergência das imposições regulatórias vigentes aos modelos de negócios circulares e cadeias de

suprimentos cíclicas; iii) pelo potencial econômico do mercado de e-resíduo a ser explorado e o alinhamento dos modelos de negócios com as tendências regulatórias.

Este ensaio contribuiu para incitar uma agenda de pesquisa voltada para o desenvolvimento de métricas econômicas capazes de direcionar o gestor ao suporte decisório quanto à antecipação de uma transição de modelos de negócios lineares e não sustentáveis para modelos de negócios disruptivos, sustentáveis e circulares. Os parâmetros decisórios para a transição antecipada para a Economia Circular carecem da análise econômica, sem perder o foco das demais dimensões do *Multiple Bottom Line*. Outro aspecto que pode ser explorado em estudos futuros é o efeito dos marcos regulatórios no Brasil em *outcomes* relacionados com a gestão de resíduos eletroeletrônicos de firmas brasileiras, com a possibilidade de implementação de estratégias de identificação de causalidade usando métodos quase-experimentais.

O fato é que como o ponto de impaciência da sociedade é um fator preponderante, real e iminente, e as discussões dessa vertente devem seguir numa curva crescente, tanto no âmbito acadêmico, quanto no âmbito legislativo e empresarial. O que se espera, com o atual ritmo de crescimento do e-resíduo, é que, ao atingir o volume de e-resíduo máximo suportável, a sociedade se expresse e exija junto ao Estado iniciativas normativas que venham a desestimular, descontinuar, corrigir e punir empresas não sustentáveis. Se a antecipação a essa situação não for uma alternativa, o poder público ouvirá da sociedade o clamor por políticas públicas mitigadoras dos impactos negativos dos e-resíduos, na forma de um simples e sonoro ultimato: Basta! Ou eles, ou nós!

## **5 SCORECARD DE SUSTENTABILIDADE CIRCULAR PARA O SETOR INDUSTRIAL DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS**

---

Este capítulo apresenta o terceiro artigo da tese aceito para publicação no *The 36th International Conference on Solid Waste Technology and Management*. Mar/2021. (Anexo C)

## 5.1 Introdução

Em um mundo de recursos naturais finitos, onde o consumismo é impulsionado e estimulado como estratégia empresarial, é inevitável pensar na continuação de sistemas produtivos que tenham a concepção da extração, produção, uso e descarte de bens de consumo (Boulding, 1966; Luz, 2017; Pearce & Turner, 1990). É perceptível que, neste cenário, essa conta não fecha, e a consequência não é nem um pouco animadora. O esgotamento de recursos naturais e aumento do descarte inadequado de produtos levará a economia global a um colapso (Brayner, 2019), e a principal fragilidade desse sistema de produção linear está na fase pós-consumo, na qual não há retenção de valor, uma vez que os bens consumidos são descartados de forma inadequada (Fischer & Pascucci, 2017).

Com a obsolescência gradual e crescente do sistema de Economia Linear, e o amadurecimento das discussões em torno do *redesign* de modelos de negócios e cadeias de suprimentos, com foco na sustentabilidade corporativa de longo prazo, a Economia Circular desponta, e ganha força, como alternativa para uma mudança de paradigma voltada para mimetização de sistemas naturais, dissociação de consumo dos recursos finitos e para a otimização de materiais e componentes no decorrer de seu ciclo de vida (EMF, 2015b; Geissdoerfer et al., 2017; Luz, 2017).

Um dos 17 objetivos de desenvolvimento sustentável definidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, na construção da Agenda 2030, trata da produção e consumo responsável. E um aspecto que se destaca nesse objetivo é que, para ser alcançado, é necessária uma redução substancial da geração de lixo, por meio de políticas e práticas de prevenção, redução, reparo, reciclagem e reuso (Cooper & Gutowski, 2017; Forti et al., 2020; Schroeder, Anggraeni, & Weber, 2019). Essa redução tornará a produção e o consumo sustentável, uma vez que, especificamente na indústria de equipamentos eletroeletrônicos (EMF, 2017), um maior nível de conscientização por parte de produtores e consumidores levará ao aproveitamento econômico de e-resíduos por meio da mineração urbana (Caiado, Guarnieri, Xavier, & Chaves, 2017; Ottoni, Dias, & Xavier, 2020; Xavier & Lins, 2018; Zhang et al., 2019), aumento da competitividade, resiliência e qualidade, bem como da redução de custos das empresas (Luz, 2017).

Entretanto, o principal argumento motivador para o *redesign*, concepção, planejamento, financiamento, transição e adaptação a um modelo de negócio baseado no conceito de Economia Circular, segundo o relatório da McKinsey & Company para a Fundação Ellen MacArthur, é a oportunidade de geração e aumento de lucro para a economia global, estimada em aproximadamente US\$ 2 trilhões (EMF, 2015b).

Sob a ótica dos investidores que percebem os riscos de separar as questões ambientais, sociais e de governança das questões fundamentais do negócio, o recente *Environmental, Social and Governance Evaluation* (ESG) tem servido de parâmetro para análise intersetorial, dando transparência à estratégia empresarial no que tange à capacidade operacional futura, e como os fatores avaliados sob a lente ESG impactam e influenciam os *stakeholders* da organização, bem como seu potencial reflexo financeiro nos resultados contábeis (Global, 2020).

Sob a ótica dos gestores, no entanto, a definição de indicadores de performance, no mundo corporativo, é uma premissa básica para o alcance de metas, objetivos, cumprimento de missões e realização de visões empresariais, pois, não se pode gerenciar o que não se pode mensurar (Drucker, 1993; Kaplan & Norton, 1997, 2002, 2004, 2006, 2008).

Indicadores de performance corporativa, muitas vezes, são construídos em função de informações financeiras e não financeiras, as quais têm sido comprovadamente eficientes, ao longo das últimas cinco décadas, para auxiliar o processo decisório estratégico e gerencial das organizações (Kaplan & Norton, 1997).

Na esfera do *disclosure* ambiental, as práticas, discutidas por Hopwood, Unerman, e Fries (2010), revelam que o uso de informações financeiras e não financeiras é importante e necessário para legitimar as ações de sustentabilidade empresarial junto ao exigente olhar da sociedade. Conciliar a influência do aparato das informações financeiras e não financeiras que uma organização gera, com a atual demanda por negócios economicamente viáveis, ambientalmente responsáveis e socialmente justos, é uma lacuna suprida parcialmente, com abordagens ainda incipientes.

Portanto, a questão de pesquisa investigada neste artigo é: como as indústrias de equipamentos eletroeletrônicos podem mensurar sustentabilidade de suas práticas considerando a abordagem dos princípios de Economia Circular? Dessa forma, este estudo objetiva propor um *Scorecard* de Sustentabilidade Circular baseado nas dimensões do *Multiple Bottom Line* e nos princípios da Economia Circular.

O artigo está estruturado em mais 4 seções. A seção 2 mostra a proposta teórica da sustentabilidade circular. A seção 3 descreve o material e métodos utilizados. A seção 4 apresenta os resultados. A seção 5 conclui.

## **5.2 A sustentabilidade circular e a integração de suas métricas**

A sustentabilidade corporativa, amplamente discutida no contexto do *Triple Bottom Line* – TBL (Elkington, 1997), passa a ser tratada neste trabalho sob uma perspectiva mais ampla: o *Multiple Bottom Line* – MBL, proposto por Brockett e Rezaee (2013). Diferente do

TBL que possui três dimensões (econômica, social e ambiental) que compõem o conceito de sustentabilidade, o MBL aborda a sustentabilidade sob cinco dimensões, as quais estão estruturadas para avaliar a performance conjunta das áreas: econômica, governança, social, ética e ambiental.

Dentre as dimensões abordadas é importante destacar que as organizações têm como principal objetivo a criação de valor para os acionistas, gerando lucros adequados e sustentáveis. Este objetivo remete à observância da dimensão econômica como alicerce para o desenvolvimento das demais dimensões (Porto, Freitas, & Silva, 2020a). Com o suporte adequado da dimensão econômica, “a empresa deve desenvolver, manter e aplicar práticas operacionais justas em todas as regiões do mundo em que opera. É fundamental que a empresa opere de forma justa e não tolere práticas de suborno e corrupção” (Brockett & Rezaee, 2013).

O MBL, em suas cinco dimensões, pode ser mensurado por meio de indicadores adequados a cada uma das dimensões EGSEA<sup>17</sup>. Brockett e Rezaee (2013), por exemplo, propõem um conjunto de 216 indicadores, sendo 62 para a dimensão econômica, 76 para a dimensão de governança, 23 para a dimensão social, 25 para a dimensão ética e 30 para a dimensão ambiental. No entanto, um número excessivo de indicadores tende a tornar mais complexa a tarefa de mensurar a performance de uma organização em suas diferentes perspectivas (Kaplan & Norton, 1997).

Embora alguns dos indicadores propostos sejam amplos em sua descrição, (por exemplo, Econômica: Notas explicativas; Governança: Dados prospectivos; Social: Acesso à troca de informações; Ética: Atividades políticas; e, Ambiental: Preservação do meio ambiente) a indicação destes se torna válida, na medida em que aponta caminhos genéricos para definição restrita de *proxies*, que nesse caso, são adequadas para servirem de métricas do desempenho sustentável corporativo.

Por outro lado, os indicadores mais específicos orientados por Brockett e Rezaee (2013); Farias e Farias (2009); Hopwood et al. (2010) também podem resultar em fatores que representem cada uma das cinco dimensões do MBL. Observando as demandas informacionais do MBL na B3 (2011), S&P Dow Jones (2020) e Global (2020), é perceptível a identificação das métricas mais comuns divulgadas nos relatórios de sustentabilidade e integrados das organizações mais bem cotadas na avaliação ESG. Com isso, é possível estabelecer *proxies* mensuráveis do MBL, especialmente, a partir dos relatórios dos destaques corporativos do setor industrial de eletroeletrônicos.

---

<sup>17</sup> Acrônimo para Econômica, Governança, Social, Ética e Ambiental.

Métricas de sustentabilidade, como o ESG, avaliam o risco de organizações negligenciarem a sustentabilidade corporativa em função da atenção dada apenas para a dimensão econômica. A tendência, com esse tipo de métrica, é que as organizações modifiquem seus critérios de avaliação de performance, e observem, não apenas o Retorno sobre Capital Investido (*return on invested capital* – ROIC), mas também o risco e seu nível de exposição ambiental. Tal mudança não implica em abandono dos indicadores financeiros, mesmo porque estes representam a dimensão considerada de maior relevância no MBL, mas sim, em uma abordagem mais ampla, completa e sinérgica da avaliação de performance da sustentabilidade corporativa, que levará o gestor a perceber que há valor em todas as moléculas de materiais, energia e água que estão presentes no negócio, e assim, o descarte de materiais e outros *inputs* de produção como rejeito perderá o sentido sob a perspectiva estratégica do negócio (Weetman, 2019).

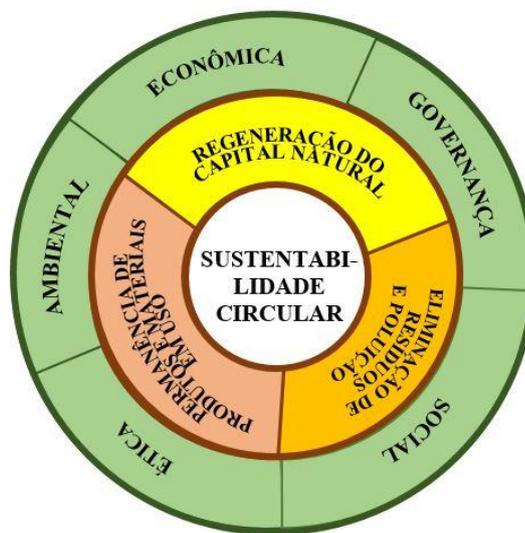
Contribuir para o bem-estar da sociedade não está dissociado do crescimento econômico de uma organização. E esses são critérios que descrevem a empresa preparada para competir no presente e no futuro. Nesse sentido, os modelos de negócios circulares iniciaram sua trajetória de desenvolvimento e despertaram estudos sobre o desempenho de suas premissas (Heyes, Sharmina, Mendoza, Gallego-Schmid, & Azapagic, 2018; Hofmann, 2019; Manninen et al., 2018; McDonough & Braungart, 2013; Mossali et al., 2020; Urbinati, Chiaroni, & Chiesa, 2017).

Ocorre que, tanto os modelos de negócios circulares quanto as iniciativas voltadas para a sustentabilidade corporativa são peças que podem ser observadas de modo integrado. Sendo assim, considera-se pertinente a integração das dimensões do MBL com os princípios que regem as iniciativas de Economia Circular. Tal integração, teoricamente, seria uma forma de pensamento sistêmico, que também é a base do pensamento holístico circular, cujo *framework* é concebido como um modelo de sustentabilidade circular.

Esse *framework* de sustentabilidade circular acompanha a lógica exposta por Geissdoerfer, Morioka e Carvalho (2018), pois as práticas sustentáveis adotadas pelas empresas são soluções inovadoras que visam agregar valor financeiro e não financeiro, por meio da interação proativa dos *stakeholders*, sob uma perspectiva de gestão de longo prazo. Nesse caso, a sustentabilidade definida por tais práticas abrange as cinco dimensões do MBL. No entanto, para uma cadeia de valor alinhada aos interesses dos *stakeholders*, e uma consequente melhoria no desempenho da sustentabilidade, a externalização dos resíduos e emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e gases do efeito estufa (GEE) precisam ser minimizados. No caso do setor industrial de equipamentos eletroeletrônicos (EEE), objeto deste estudo, os resíduos mais

gerados na atividade produtiva são a sucata de material ferroso, o papel/papelão, o plástico e a escória férrica de recuperação de chumbo secundário (FEAM, 2011). É nesse contexto que os princípios da Economia Circular são integrados às práticas sustentáveis, no sentido de fechar, estreitar, desacelerar, intensificar e desmaterializar os ciclos produtivos das organizações.

Assim, a aplicação dos princípios de Economia Circular tem como consequência o atendimento às cinco dimensões da sustentabilidade, culminando em uma abordagem teórica de sustentabilidade circular, como visto na Figura 18, cujas dimensões e princípios possam ser mensurados e monitorados.



**Figura 18** – Integração entre os princípios da Economia Circular e as dimensões do MBL  
Fonte: Elaboração própria.

O fato é que, como qualquer modelo de negócio, os pressupostos da sustentabilidade circular necessitam serem mensurados quanto à performance. Considerando apenas a Economia Circular, para a mensuração adequada, um número crescente de indicadores tem sido definido e testado desde 2010. Já se pode encontrar uma taxonomia de, pelo menos, 55 conjuntos de indicadores relacionados à performance de produtos e serviços, no contexto da Economia Circular, e adequados a diferentes situações e modelos de negócio, no formato de *dashboard*, desenvolvido em Excel (Saidani, Yannou, Leroy, Cluzel, & Kendall, 2019).

Um exemplo são os indicadores de performance de produtos na Economia Circular propostos por Cayzer, Griffiths e Beghetto (2017). Em outro estudo, utilizando *Multiple Correspondence Analysis* (MCA), Parchomenko, Nelen, Gillabel, e Rechberger (2019) avaliaram 63 métricas de Economia Circular, juntamente com 24 tipos de recursos considerados relevantes para a Economia Circular, cuja análise resultou na identificação de três *clusters* principais para as métricas avaliadas. Outros 30 indicadores de performance da Economia

Circular foram analisados por Kristensen e Mosgaard (2020), inclusive relacionando-os com as dimensões do *Triple Bottom Line*.

Percebe-se, no entanto, que há uma diversidade de indicadores que não converge para apontar o grau de sustentabilidade circular de uma organização. Dito de outra forma, o excesso de indicadores com propósitos específicos para uma ou mais dimensões da sustentabilidade, ou para um ou mais princípios da Economia Circular, não consegue integrar a visão da sustentabilidade com a visão da circularidade dos processos e produtos de uma organização, incapacitando o gestor de enxergar o quanto ele se encontra distante ou próximo de uma sustentabilidade circular perfeita, ou ótima.

E é nessa tônica que a proposta dessa pesquisa se baseia: proporcionar ao gestor uma oportunidade de ter uma visão mais abrangente, integrada e comparada de sua performance corporativa, por meio de uma métrica capaz de mostrar o reflexo de suas práticas na construção da sustentabilidade corporativa com foco na Economia Circular. O resultado é um *dashboard* integrado composto por um *scorecard* de sustentabilidade circular, cujo delineamento metodológico será apresentado na próxima seção.

### 5.3 Material e método

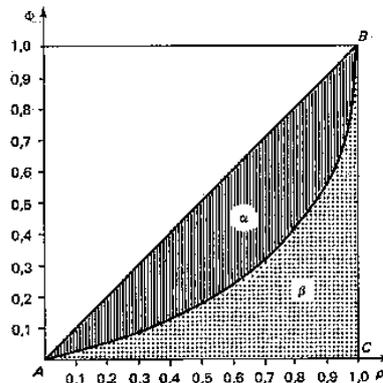
Os dados utilizados na elaboração do *Scorecard* de Sustentabilidade Circular foram obtidos a partir da Economatica®. Inicialmente foram selecionadas 12 empresas do setor industrial de EEE, com dados de seus relatórios financeiros no período entre 2010 e 2019, inclusive. Destas, apenas 4 indústrias apresentam dados completos, sendo uma de equipamentos de refrigeração, uma de computadores e periféricos, uma de motores, turbinas e transmissores de energia, e uma de eletrodomésticos.

Foi utilizada a Análise de Componentes Principais (*Principal Components Analysis – PCA*) para transformação ortogonal das variáveis contidas nas demonstrações financeiras analisadas, sob a perspectiva exploratória, objetivando encontrar correlações entre as variáveis que pudessem fornecer algumas pistas sobre as dimensões subjacentes, como adotado por Ormazabal et al. (2018). Além da análise da matriz de correlação entre os indicadores, selecionados a partir das sugestões de Brockett e Rezaee (2013), da B3 (2011) e S&P Dow Jones (2020), foram utilizados os testes de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e de esfericidade de Bartlett, com o intuito de verificar o grau de explicação dos dados, a partir dos fatores encontrados, e a significância da relação entre os indicadores, respectivamente.

A análise se deu com extensivas fases preliminares envolvendo o uso de alguns indicadores e contas contábeis de resultado e patrimoniais, oriundas do banco de dados da

Economática®. Entretanto, como tais fases apresentaram correlações com pouco poder explicativo para os componentes definidos, optou-se por apresentar os resultados das últimas 9 (nove) fases da análise de componentes principais, cujas correlações foram mais promissoras. Assim, é possível comparar e perceber o PCA mais promissor entre cada conjunto de indicadores selecionados, conforme Tabela 5 na subseção 5.4.1, os quais foram utilizados na construção e teste empírico do *Scorecard* de Sustentabilidade Circular. Para o tratamento dos dados amostrais obtidos foi utilizado o *software* IBM® SPSS® versão 22.

Para medir a desigualdade da sustentabilidade circular das empresas, considerando as dimensões do MBL e os princípios da Economia Circular, fez-se uma adequação aplicativa mediante o uso do coeficiente de Gini e da curva de Lorenz, como orientado por Hoffmann (2011), o qual afirma que tal medida não se limita à análise de distribuição de renda, e que pode ser adaptada a diversos outros campos de estudo, como na indústria, por exemplo. A linha diagonal será tratada como o estado ideal da sustentabilidade e da Economia Circular. O coeficiente de Gini estuda a amplitude de variação da área  $\alpha$ , chamada de área de concentração, mostrada na Figura 19.



**Figura 19** – Curva de Lorenz  
Fonte: (Hoffmann, 2011)

Aqui, o segmento  $AB$  representa a linha perfeita de igualdade das proporções da abscissa ( $p$ ) e da ordenada ( $\Phi$ ). Assim, toma-se o  $p$  como uma representação das dimensões do MBL e dos princípios da Economia Circular, ao passo que, o  $\Phi$  representa o *scorecard* resultante da aplicação dos indicadores de cada uma das dimensões do MBL e dos princípios da Economia Circular extraídos da análise de componentes principais. O valor máximo da diferença entre  $p$  e  $\Phi$  da curva de Lorenz é chamado de discrepância máxima ( $D$ ).

Nesse caso, o cálculo se dá por:

$$G = \frac{\alpha}{0,5} = 2\alpha \quad (1)$$

Sendo que  $0 \leq G < 1$ , visto que  $0 \leq \alpha < 0,5$ .

Para o tratamento dos dados e tabulação dos resultados dessa etapa, bem como a sua apresentação gráfica, foi utilizada uma planilha eletrônica no MS Excel. No caso, os resultados apresentados na planilha se referem a dados extraídos das demonstrações financeiras e dos relatórios de sustentabilidade e relatórios integrados de uma das quatro indústrias analisadas, tratada neste estudo como empresa X, obtidos a partir das informações disponibilizadas em seu site. A empresa foi selecionada como caso prático para análise do *scorecard* construído por ser uma empresa do setor industrial de equipamentos elétricos e eletrônicos relacionada no Índice de Sustentabilidade Empresarial da B3 (ISE B3), na carteira do *Dow Jones Sustainability Index* (DJSI) e no *MSCI ESG Leaders Index*, entre outros importantes índices.

#### **5.4 Resultados obtidos**

Esta seção apresenta a proposta de *scorecard* para mensurar a sustentabilidade circular das empresas considerando: a definição do PCA para a dimensão econômica, como procedimento extensivo às demais dimensões; a construção do *scorecard* de sustentabilidade corporativa; a construção do *scorecard* de circularidade; e a integração das perspectivas de sustentabilidade e circularidade em um *scorecard* de sustentabilidade circular.

##### **5.4.1 Componente principal para a dimensão econômica**

A análise de componentes principais foi realizada com o intuito de selecionar as variáveis que melhor representam a dimensão econômica da empresa. Para a validade dos cálculos, Hair, Black, Babin e Anderson (2018) orientam que seja utilizada uma amostra não menor que 50 observações, e uma proporção de, no mínimo, 5 observações para cada variável. No caso desta pesquisa, a amostra final, antes dos componentes principais serem usados no caso da empresa X, foi composta por 480 observações, sendo 40 observações por variável.

Como argumentado por Kaplan e Norton (1997), assim como um avião não poderia ser pilotado de forma eficaz se o piloto se guiasse por apenas um único indicador (por exemplo, a bússola), e, da mesma forma, não conseguiria tomar decisões tempestivas e eficazes com um número excessivo de indicadores em seu painel de controle, um gestor necessita de um número ótimo de indicadores que possam oferecer uma visão eficaz da performance sob uma determinada perspectiva ou dimensão.

A Tabela 5, apresenta os resultados de 320 observações com correlações mais significativas, e também as mesmas 40 observações por variável, mantendo-se, ainda assim, dentro dos parâmetros mínimos estabelecidos na literatura. Portanto, os requisitos para a utilização do PCA foram atendidos satisfatoriamente.

**Tabela 5 - Protocolo de análise de componentes principais para definição da dimensão econômica (2010 a 2019, com 4 indústrias do setor de EEE)**

Variáveis	Estatística Descritiva		Teste KMO	Teste de esfericidade de Barlett (sig.)	Adequação de amostragem (correlação anti-imagem)	Comunalidades (extração)	Autovalores (%)		Variância (%)		Variância Total Explicada (%)	Componentes		Resíduos (% > 0,05)	Rotação Varimax		Pontuação		
	Casos	Média					Desvio-padrão	1	2	1		2	1		2	1	2		
Fase 1	ROIC		0,04	0,06	0,738	,933						<b>,842</b>	,473		,363	<b>,895</b>	-,184	<b>,443</b>	
	ROE		0,08	0,21	0,799	,910						<b>,724</b>	,621		,179	<b>,937</b>	-,289	<b>,544</b>	
	VM	39	3.040.049,34	4.215.682,00	0,745	,889							<b>,825</b>	-,456		<b>,929</b>	,158	<b>,379</b>	-,267
	EBITDA		216.397,26	211.550,04	0,852	,945							<b>,968</b>	-,091	14,0	<b>,813</b>	,533	<b>,174</b>	,025
	ROL		1.847.043,33	1.356.614,54	0,831	,831	6,373	1,026	79,67	12,82	92,49		<b>,901</b>	,138		,618	<b>,670</b>	,026	<b>,193</b>
	LL		141.131,86	157.777,78	0,799	,953							<b>,975</b>	,047		<b>,733</b>	,645	,091	<b>,131</b>
	PL		781.005,27	757.172,76	0,73	,974							<b>,926</b>	-,343		<b>,937</b>	,310	<b>,322</b>	-,171
	AT		1.959.951,69	1.574.704,76	0,755	,963							<b>,949</b>	-,249		<b>,897</b>	,398	<b>,268</b>	-,097
Fase 2	ROIC		0,06	0,05	0,631	0,977						<b>0,826</b>	0,543		0,427	<b>0,891</b>	-0,166	<b>0,517</b>	
	ROE		0,16	0,12	0,517	0,992						<b>0,699</b>	<b>0,709</b>		0,234	<b>0,968</b>	-0,265	<b>0,645</b>	
	Ln_VM	31	14,02	1,92	0,795	0,943						<b>0,952</b>	-0,192		<b>0,915</b>	0,326	<b>0,220</b>	-0,086	
	Ln_EBITDA		12,00	1,18	0,921	0,932	6,606	1,028	82,57	12,85	95,42	<b>0,960</b>	-0,105	0,0	<b>0,876</b>	0,405	<b>0,177</b>	-0,013	
	Ln_ROL		14,32	0,87	0,913	0,910						<b>0,944</b>	-0,139		<b>0,880</b>	0,368	<b>0,192</b>	-0,042	
	Ln_LL		11,09	2,04	0,728	0,953						<b>0,976</b>	0,006		<b>0,833</b>	0,509	<b>0,124</b>	0,081	
	Ln_PL		13,23	1,30	0,683	0,945						<b>0,924</b>	-0,300		<b>0,947</b>	0,220	<b>0,270</b>	-0,178	
	Ln_AT		14,35	0,89	0,867	0,983						<b>0,954</b>	-0,270		<b>0,957</b>	0,261	<b>0,259</b>	-0,151	
Fase 3	ROIC		0,06	0,05	0,774	0,726						0,852						0,148	
	ROE		0,16	0,12	0,681	0,546						0,739						0,128	
	Ln_VM	31	14,02	1,92	0,818	0,885						0,941						0,163	
	Ln_EBITDA		12,00	1,18	0,865	0,918	5,775		82,50		82,50	0,958		57,0				0,166	
	Ln_ROL		14,32	0,87	0,887	0,878						0,937						0,162	
	Ln_LL		11,09	2,04	0,873	0,940						0,969						0,168	
	Ln_PL		13,23	1,30	0,832	0,882						0,939						0,163	
	Ln_AT		14,35	0,89	0,835	0,882						0,969						0,163	
Fase 4	ROIC		0,04	0,06	0,672	0,762						0,873						0,157	
	ROE		0,08	0,21	0,785	0,577						0,760						0,137	
	VM	39	3.040.049,34	4.215.682,00	0,802	0,627						0,792						0,143	
	EBITDA		216.397,26	211.550,04	0,804	0,928	5,542		79,17		79,17	0,963		42,0				0,174	
	AT		1.959.951,69	1.574.704,76	0,772	0,859						0,927						0,167	
	LL		141.131,86	157.777,78	0,723	0,955						0,977						0,176	
	ROL		1.847.043,33	1.356.614,54	0,802	0,834						0,913						0,165	
	Ln_AT		14,35	0,89	0,835	0,882						0,969						0,163	
Fase 5	EBITDA		211.421,48	211.178,19	0,690	0,946						0,973						0,235	
	VM	40	2.964.227,43	4.188.823,40	0,850	0,656						0,810						0,195	
	LL		136.900,63	158.024,23	0,725	0,959	4,143		82,76		82,86	0,979		30,0				0,236	
	ROL		1.807.383,22	1.362.398,68	0,781	0,844						0,919						0,222	
	ROIC		0,04	0,06	0,711	0,738						0,859						0,207	
Fase 6	EBITDA		211.421,48	211.178,19	0,699	0,912						0,955						0,215	
	LL		136.900,63	158.024,23	0,719	0,947						0,973						0,219	
	ROL	40	1.807.383,22	1.362.398,68	0,776	0,830	4,435		88,70		88,70	0,936		20,0				0,211	
	ROIC		0,04	0,06	0,732	0,793						0,890						0,201	
	Ln_VM		13,28	2,23	0,952	0,906						0,952						0,215	
Fase 7	LL		141.339,15	157.543,80	0,895	0,919						0,959						0,216	
	ROL		1.825.276,42	1.375.438,85	0,928	0,871						0,933						0,210	
	ROIC	39	0,04	0,06	0,939	0,820	4,440		88,80		88,80	0,906		20,0				0,204	
	Ln_VM		13,30	2,25	0,896	0,921						0,960						0,216	
	Ln_EBITDA		11,50	1,51	0,899	0,909						0,953						0,215	
Fase 8	LL		141.339,15	157.543,80	0,891	0,908						0,953						0,203	
	ROIC		0,04	0,06	0,940	0,824						0,908						0,213	
	Ln_VM	39	13,30	2,25	0,872	0,935	4,470		89,41		89,41	0,967		20,0				0,216	
	Ln_EBITDA		11,50	1,51	0,923	0,908						0,953						0,213	
	Ln_ROL		14,02	0,99	0,894	0,896						0,947						0,212	
Fase 9	ROIC		0,04	0,06	0,929	0,828						0,910						0,206	
	Ln_VM		13,30	2,25	0,877	0,923						0,961						0,218	
	Ln_EBITDA	39	11,50	1,51	0,915	0,901	4,410		88,21		88,21	0,949		20,0				0,215	
	Ln_ROL		14,02	0,99	0,896	0,899						0,948						0,215	
	Ln_LL		8,81	4,88	0,927	0,859						0,927						0,210	

Fonte: Elaboração própria.

Legenda: ROIC (*Return Of Invested Capital*); ROE (*Return Of Equity*); VM (Valor de Mercado); EBITDA (*Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization*); ROL (Receita Operacional Líquida); LL (Lucro Líquido); PL (Patrimônio Líquido); AT (Ativo Total); Ln\_VM (Logaritmo natural do Valor de Mercado); Ln\_EBITDA (Logaritmo natural do *Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization*); Ln\_ROL (Logaritmo natural da Receita Operacional Líquida); Ln\_LL (Logaritmo natural do Lucro Líquido); Ln\_PL (Logaritmo natural do Patrimônio Líquido); Ln\_AT (Logaritmo natural do Ativo Total).

No caso da dimensão econômica, por exemplo, já foi dito que sua performance pode ser mensurada por, no mínimo, 62 indicadores (Brockett & Rezaee, 2013). No entanto, esse número, no que tange ao aspecto holístico decisorial do gestor, excede o número indicado para cada perspectiva ou dimensão organizacional (Kaplan & Norton, 1997, 2002), que é de 4 a 5. Dito isto, entende-se como salutar para o entendimento de cada perspectiva de um *scorecard* de uma empresa que seus indicadores estejam dentro dessa recomendação, sendo o mesmo raciocínio aplicado às demais dimensões do MBL. Para a seleção dos principais indicadores da dimensão econômica, a presente pesquisa se utilizou da identificação de fatores que representem grande parte dos indicadores sugeridos, por meio da análise de componentes principais, onde são apontados *scores* para cada fator, os quais servirão como pesos para a formação de um *scorecard* principal para o fator da dimensão econômica e demais do MBL.

Para a dimensão econômica, após os testes utilizando o PCA, o resultado mais promissor se deu na Fase 9 da Tabela 5, com 5 indicadores selecionados, onde a análise conjunta dos testes MKO, esfericidade de Barlett e a correlação anti-imagem apresentaram níveis ótimos em relação aos obtidos nas demais fases da Tabela 5. Vale destacar que, embora na Fase 2 da Tabela 5 o percentual de resíduos com valores absolutos maiores que 0,05 tenha sido 0%, o teste KMO dessa fase, que indica o grau de explicação dos dados originais a partir dos fatores encontrados, foi de 75%, ao passo que, na Fase 9 foi de 90,2%. Consequentemente, a Fase 9 mostra que os dados originais nesta configuração, tendem a viabilizar o componente de forma mais eficaz do que na Fase 2. O PCA ainda atribuiu uma pontuação na Fase 9, a qual serviu como parâmetro para a definição de um fator ponderador (peso) para os KPIs testados, dado por:

$$P_{KPI} = \frac{S_k}{\sum_{k>0}^n S_k} \quad (2)$$

Onde,  $0 < P_{KPI} < 1$ , e  $S$  representa a pontuação atribuída pelo PCA para cada KPI testado  $k$ . Sendo assim, a dimensão econômica, no *scorecard* de sustentabilidade, passa a ser representado pelos indicadores apresentados no Quadro 3, os quais apresentam o peso de cada KPI que, após sua multiplicação pelo KPI correspondente, resultará em um *score* que será utilizado na etapa seguinte: a obtenção do *scorecard* de sustentabilidade.

**Quadro 3** – Indicadores para a dimensão econômica

Indicador	Descrição	Peso KPI
ROIC	<i>Return On Invested Capital</i>	0,194
Ln_VM	Logaritmo natural do Valor de Mercado	0,205
Ln_EBITDA	Logaritmo natural dos <i>Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization</i>	0,202
Ln_ROL	Logaritmo natural da Receita Operacional Líquida	0,202
Ln_LL	Logaritmo natural do Lucro Líquido	0,197

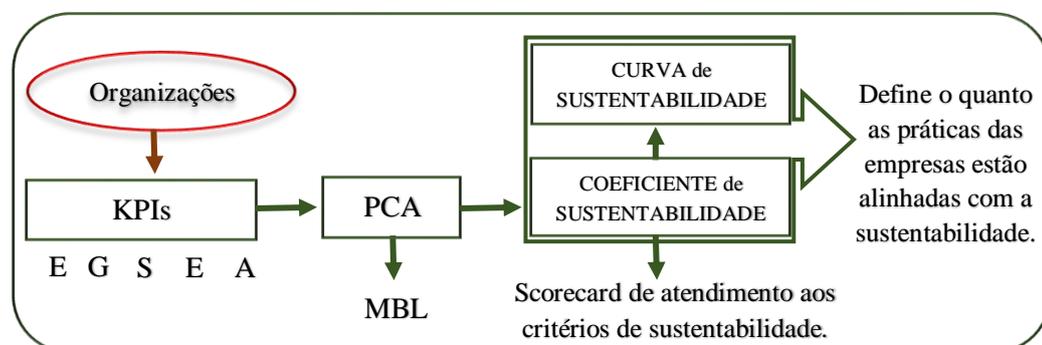
Fonte: Elaboração própria.

Para as demais dimensões do MBL e para as dimensões relacionadas aos princípios de Economia Circular os mesmos critérios de escolha dos indicadores podem ser aplicados. No entanto, a disparidade dos formatos dos relatórios de sustentabilidade não contempla alguns indicadores. Dessa forma, como exemplo de aplicação do método, a análise de componentes principais foi feita considerando as indústrias com dados completos para cada indicador.

#### 5.4.2 Scorecard de sustentabilidade

Na construção do *scorecard* de sustentabilidade, os *Key Performance Indicators* (KPIs) foram definidos a partir da literatura, e seus componentes principais foram estabelecidos com base no MBL em suas cinco dimensões EGSEA, como descrito na Figura 20. O processo de alimentação dos dados, em cada um dos KPIs integrantes dos PCAs calculados, resulta na obtenção do coeficiente de sustentabilidade, o qual se propõe a ser um *scorecard* que mede o atendimento aos critérios de sustentabilidade tidos como formadores do DNA da sustentabilidade corporativa, de acordo com a abordagem de Porto et al. (2020a). Quando aplicado, este coeficiente de sustentabilidade gera informações suficientes para o desenho da curva de sustentabilidade, cujo comportamento define dois aspectos fundamentais para sua análise:

- o quanto as práticas relatadas pela empresa estão alinhadas com a sustentabilidade esperada e tida como ideal para o tipo de organização analisada; e
- o quanto tais práticas estão se aproximando ou se distanciando da sustentabilidade ideal em relação ao ano anterior, incluindo a observação direta de qual dimensão mais influenciou para a melhora ou piora do *scorecard* obtido, a partir da discrepância máxima (D).



**Figura 20** – Scorecard de Sustentabilidade.

Nota: KPIs (*Key Performance Indicators*); E G S E A (Acrônimo para Econômico, Governança, Social, Ética e Ambiental); PCA (*Principal Components Analysis*); MBL (*Multiple Botton Line*)

A Figura 20 resume o processo de obtenção do *scorecard* de sustentabilidade. O PCA obtido para representar o MBL é uma métrica que procura garantir a confiabilidade dessa

representatividade. No entanto, para reforçar a credibilidade dos KPIs nesta aplicação do coeficiente e da curva de sustentabilidade, optou-se pela fundamentação dos KPIs por meio do apontamento de estudos anteriores que testaram e validaram o poder informacional e decisório que tais KPIs possuem.

Dessa forma, para o caso da empresa X, foram alimentados os KPIs apresentados no Quadro 4, com seus respectivos objetivos, como sendo as principais métricas para o MBL, após a aplicação do PCA. Os KPIs, neste caso, são corroborados pelos estudos nos quais sua aplicação tem sido defendida.

**Quadro 4 – Principais indicadores para o *Multiple Bottom Line* (MBL)**

Dimensão do MBL	Indicador	Objetivo	Fonte
Econômica	ROIC	Mostrar a eficiência da empresa em gerar lucros por meio de seus ativos operacionais para remunerar seus financiamentos.	(Godoi, Aquino, Pereira, Santos, & Santos, 2020)
	Valor de mercado	Apresentar o valor de um ativo pronto para negociação, em determinado momento, no mercado.	(B3, 2011; Di Maio, Rem, Baldé, & Polder, 2017; Farias & Farias, 2009)
	EBITDA	Mostrar o potencial de geração de caixa de um negócio, pois indica quanto dinheiro é gerado pelos ativos operacionais.	(Macedo, Machado, Murcia, & Machado, 2012; Mey & Lamprecht, 2020)
	Receita operacional líquida	Medir o desempenho do setor de vendas.	(Alamerew & Brissaud, 2019)
	Lucro líquido	Divulgar o rendimento residual da empresa, pois trata-se do recurso que pertence aos acionistas e é uma base para remunerar os gestores cujos esforços não possam ser mensurados diretamente.	(Ngan et al., 2019; Sunder, 2014)
Governança	Remuneração dos executivos	Mostrar compensação paga à diretoria executiva e conselho administrativo.	(B3, 2011; Brockett & Rezaee, 2013)
	Composição do conselho	Mostrar diversidade, independência, feminilidade e atuação no período.	(Brockett & Rezaee, 2013)
	Corrupção/conflito de interesses	Relacionar códigos e políticas anticorrupção, e seus mecanismos de prevenção/tratamento, e quantificar casos de corrupção e conflitos de interesse.	(B3, 2011)
	Política de dividendos	Divulgar política de distribuição de dividendos aos acionistas.	(B3, 2011; S&P Dow Jones, 2020)
	Gestão de riscos	Reportar riscos sistêmicos.	(Brockett & Rezaee, 2013; S&P Dow Jones, 2020)
Social	Benefícios	Quantificar investimento em saúde, segurança, engajamento e diversidade junto aos colaboradores.	(B3, 2011)
	Treinamentos	Mostrar o nível educacional corporativo da conscientização social e capacitação profissional.	(Ngan et al., 2019)
	Força de trabalho e diversidade	Qualificar e quantificar a composição do quadro de colaboradores.	(Brockett & Rezaee, 2013; S&P Dow Jones, 2020)
	Projetos	Mostrar o engajamento voluntário da organização e seus colaboradores em projetos socioambientais.	(B3, 2011)
	Relacionamentos	Divulgar destinação de receita para projetos comunitários locais e definições de critérios socioambientais para seleção de fornecedores.	(B3, 2011; Ngan et al., 2019)
Ética	Monitoramento	Expor mecanismos de avaliação e monitoramento de conformidades com regulações, padrões, leis, regras, código de conduta e ética da organização.	(B3, 2011; Brockett & Rezaee, 2013)
	Envolvimento em escândalos	Quantificar casos de envolvimento em conflitos éticos internos e externos.	(B3, 2011)
	Conduta	Evidenciar políticas e códigos de condução ética dos negócios.	(S&P Dow Jones, 2020)
	Melhores práticas	Mostrar <i>compliance</i> em ações éticas e regulatórias	(Brasil, 2020)
	<i>Accountability</i>	Qualificar a aplicação da responsabilidade e prestação de contas.	(Brockett & Rezaee, 2013; Ijiri, 1975)
Ambiental	Risco Ambiental	Divulgar provisões e passivos de natureza ambiental em função de autuações fiscais, bem como, termos de ajustamento de conduta firmados.	(Alamerew & Brissaud, 2019; B3, 2011; EMF, 2013a; Farias & Farias, 2009)
	Investimento Ambiental	Relatar volume de investimento em projetos de natureza ambiental (Energia limpa, coleta e tratamento de resíduos, sistemas de controle etc.).	(Van Schaik & Reuter, 2016)
	Desempenho Ambiental	Mostrar e monitorar a eficiência na gestão do ciclo de vida dos produtos.	(Moraga et al., 2019)
	Exposição Ambiental	Quantificar a geração e gestão de resíduos e emissões de CO <sub>2</sub> e GEE.	(Kasztelan, 2020)

Fonte: Elaboração própria.



existem diversos grupos e clusters de indicadores para medir circularidade nos níveis micro (produtos), meso (organização) e macro (região, país, continentes). A circularidade abordada neste estudo, no entanto, está no nível meso, uma vez que analisa o grau de circularidade relativa ao caso da empresa X, sem especificar a análise de seus produtos ou abrangendo seus resultados para um contexto macrogeográfico-institucional.

Nesse sentido, a visualização dos KPIs no Quadro 5 serve como uma representação do tipo de informação que foi utilizada para alimentar o coeficiente de circularidade e a consequente formação da curva de circularidade da empresa testada.

**Quadro 5 – Principais indicadores de circularidade**

Princípios da EC	Indicador	Objetivo	Fonte
Regeneração do capital natural	Redução de Extração de matéria prima virgem	Mostrar que a empresa demanda menos matérias primas virgens, em função de sua substituição por materiais secundários.	(EMF, 2015a; Kasztelan, 2020)
	Aumento de uso de energia renovável	Caracterizar o aumento da resiliência dos sistemas, evitando esgotamento de recursos.	(Brockett & Rezaee, 2013; EMF, 2013b)
	Redução de emissões de CO <sub>2</sub> e GEE	Mostrar redução da pegada de carbono e GEE, adaptando-se aos riscos regulatórios e metas.	(Brockett & Rezaee, 2013; Ngan et al., 2019)
	Redução do uso de água	Indicar a eficiência no uso otimizado da água nos processos produtivos para preservar fontes hídricas.	(B3, 2011; Ormazabal et al., 2018)
	Recuperação de recursos naturais	Mostrar investimentos em recuperação de efluentes e insumos sensíveis ao esgotamento.	(B3, 2011; Moraga et al., 2019)
	Mensuração do esgotamento de recursos	Mensurar o volume máximo de extração suportado pela sociedade.	(Porto, Freitas, & Silva, 2020b)
	Substituição contínua de recursos escassos e não renováveis	Mostrar o nível de substituição de recursos sensíveis e não renováveis.	(Brockett & Rezaee, 2013)
Eliminação de resíduos e poluição	Redução de emissões de CO <sub>2</sub> e GEE	Mostrar redução da pegada de carbono e GEE, adaptando-se aos riscos regulatórios e metas.	(Brockett & Rezaee, 2013; Ngan et al., 2019)
	Redução de geração de resíduos	Mostrar a efetividade de medidas de redução de resíduos	(B3, 2011; Kasztelan, 2020)
	Descarte adequado de resíduos	Apresentar os canais de descarte de resíduos usados.	(Kasztelan, 2020)
	Uso adequado de tecnologias sem resíduos	Revelar as tecnologias limpas usadas pela empresa.	(Brockett & Rezaee, 2013)
	Divulgação do uso e descarte de produtos químicos tóxicos	Divulgar a qualidade da gestão de produtos químicos tóxicos pela empresa.	(Brockett & Rezaee, 2013)
Permanência de produtos e materiais em uso	Uso eficiente de materiais reciclados	Mostrar a taxa de reciclagem e de uso de materiais reciclados.	(Kasztelan, 2020; Moraga et al., 2019; Van Schaik & Reuter, 2016)
	Reuso de resíduos gerados	Mostrar a taxa de reuso dos resíduos gerados.	(Cooper & Gutowski, 2017)
	Potencial de conectância. Resíduos com potencial simbiótico	Indicar o potencial de trocas de resíduos entre indústrias do mesmo distrito (Simbiose Industrial).	(Magrini & Veiga, 2018; Mantese, 2018)
	Longevidade	Mostrar a extensão do ciclo de vida possível dos produtos.	(Franklin-Johnson, Figge, & Canning, 2016)
	Circularidade	Mensurar o grau de circularidade dos produtos fabricados.	(Linder, Sarasini, & van Loon, 2017; Saidani et al., 2019)

Fonte: Elaboração própria.

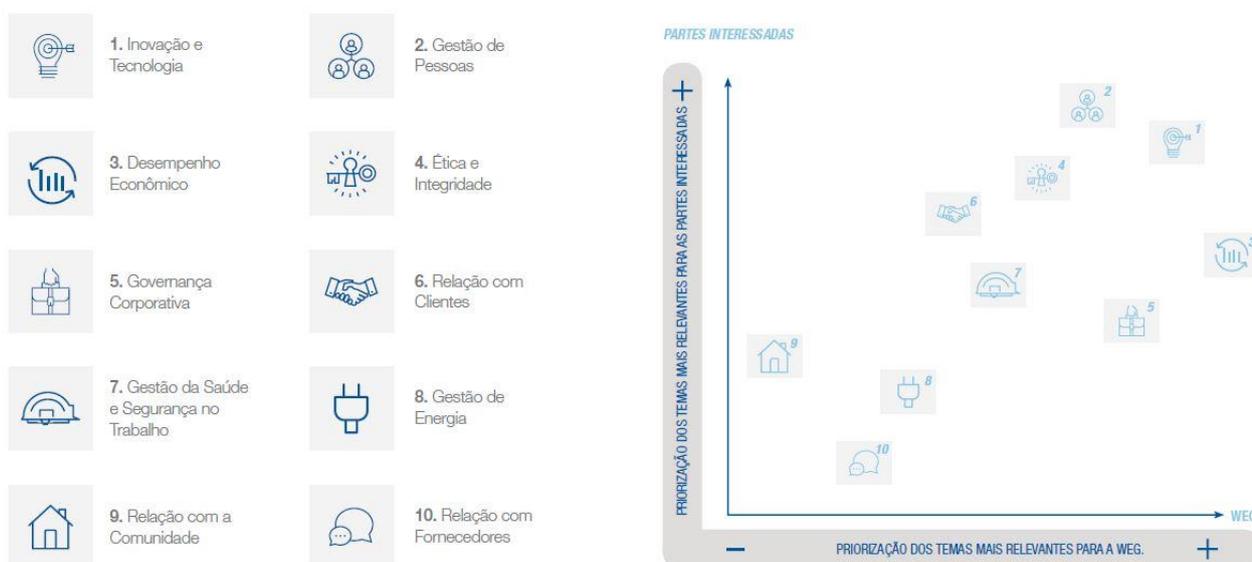
Na subseção seguinte, a aplicação de ambos *scorecards* (sustentabilidade e circularidade) tomam forma com a inserção dos dados da empresa X em uma planilha dinâmica do MS Excel, na qual é possível ver o resultado da integração de ambos os conceitos (Sustentabilidade e Economia Circular) em uma estrutura de Sustentabilidade Circular.

#### 5.4.4 *Scorecard* de Sustentabilidade Circular

A partir da integração das métricas dos dois primeiros *scorecards* foi possível obter uma visão mais ampla da performance corporativa, uma vez que a junção das cinco dimensões do MBL com os três princípios da Economia Circular proporciona uma análise sob oito perspectivas diferentes, sinérgicas e complementares entre si. Surge, então, o *Circular Sustainability Scorecard* (CiSS), uma métrica que usa a mesma lógica conceitual das duas métricas anteriores, e cujo objetivo principal é confrontar o nível de discrepância da performance organizacional em relação às prioridades expressas na sua matriz de materialidade.

##### 5.4.4.1 Matriz de materialidade

A matriz de materialidade é parte integrante do relatório de sustentabilidade das organizações, e representa graficamente os temas de sustentabilidade que são considerados importantes para a empresa e seus *stakeholders*, e que afetam sua geração de valor. Empresas aderentes aos padrões do *Global Reporting Initiative* (GRI), atualizam e divulgam periodicamente sua matriz de materialidade. As Figuras 22 e 23 mostram um exemplo desse tipo de informação de uma empresa, a Weg S/A, listada na B3, em 2018 e 2019.



**Figura 22** – Matriz de materialidade da Weg S/A em 2018.

Fonte: (Weg, 2018, p. 6).



**Figura 23** – Matriz de materialidade da Weg S/A em 2019.  
Fonte: (Weg, 2019, p. 6).

É possível perceber, por exemplo, que o tema mais relevante para a Weg em 2018 era o desempenho econômico, enquanto para as partes interessadas a prioridade era a gestão de pessoas. Em 2019, a matriz toma uma forma mais integrada, passando a ideia de um resultado conjunto entre os interesses internos e dos *stakeholders* consultados. Nessa tônica, a questão ética assume o topo da materialidade, sem, no entanto, perder o foco nas classificações do ano anterior. Um dos benefícios do CiSS, neste caso, é proporcionar uma análise comparativa sobre o alinhamento entre o *disclosure* e a performance da sustentabilidade circular alcançada nos temas relacionados à matriz de materialidade da empresa.

#### 5.4.4.2 O CiSS e a Funcionalidade da planilha como um produto

O resultado alcançado com a aplicação do CiSS com alguns dados da Empresa X que estavam disponíveis em seus relatórios anuais integrados mostra que:

- a) Em 2018, a empresa X apresenta a dimensão social, seguida pela dimensão ambiental, com uma discrepância máxima entre as oito perspectivas analisadas. O que aponta para uma convergência entre o posicionamento da empresa na matriz de materialidade e sua performance no contexto da sustentabilidade circular.

- b) Em 2019, a discrepância máxima continua sendo a perspectiva ambiental, seguido de perto pela perspectiva de eliminação de resíduos e poluição, o que condiz com a relevância exposta para este último item na matriz de materialidade.

É importante ressaltar que os dados qualitativos foram ajustados com vistas a priorizar a demonstração da funcionalidade da métrica e representam, nos dados faltantes, uma simulação, uma vez que os relatórios de sustentabilidade divulgados não contemplam informações detalhadas para uma uniforme coleta e tabulação dos KPIs escolhidos.

O *layout* e funcionamento da planilha elaborada com a finalidade de receber os dados (*input*), processá-los por meio de funções pré-programadas, e, por fim, entregar o resultado em forma de um *dashboard* gráfico (*output*) apresenta interface amigável, no sentido de que:

- a) Não há necessidade de efetuar nenhum cálculo prévio para a obtenção do coeficiente e da curva de sustentabilidade circular, bastando apenas inserir os dados quantitativos retirados de relatórios gerenciais disponibilizados pela empresa. Neste caso, os dados qualitativos necessitam de conversão para dados quantitativos antes da inserção;
- b) Optou-se por apresentar resultados comparativos entre os finais de exercício social de 2018 e 2019, para fins de discussão. Porém, a planilha é flexível para o uso comparativo entre períodos mais longos (3, 5 ou 10 anos) e períodos mais curtos (a cada 1, 3 ou 6 meses). Visualmente, é preferível que o máximo de três períodos possa ser inserido na planilha, a fim de gerar três curvas simultâneas;
- c) Indicadores novos ou cujo poder informacional seja julgado mais eficiente pelo gestor podem substituir os que estão sugeridos neste estudo, o que reforça o poder de adaptabilidade da ferramenta. Ressalta-se que a inexistência de dados para qualquer dos KPIs adotados não prejudica o cálculo coeficiente de sustentabilidade circular, pois para o cálculo, leva-se em conta o peso dos demais KPIs existentes e sua média ponderada.

A Figura 24 apresenta uma visão geral das telas de *input* e *output* da planilha.

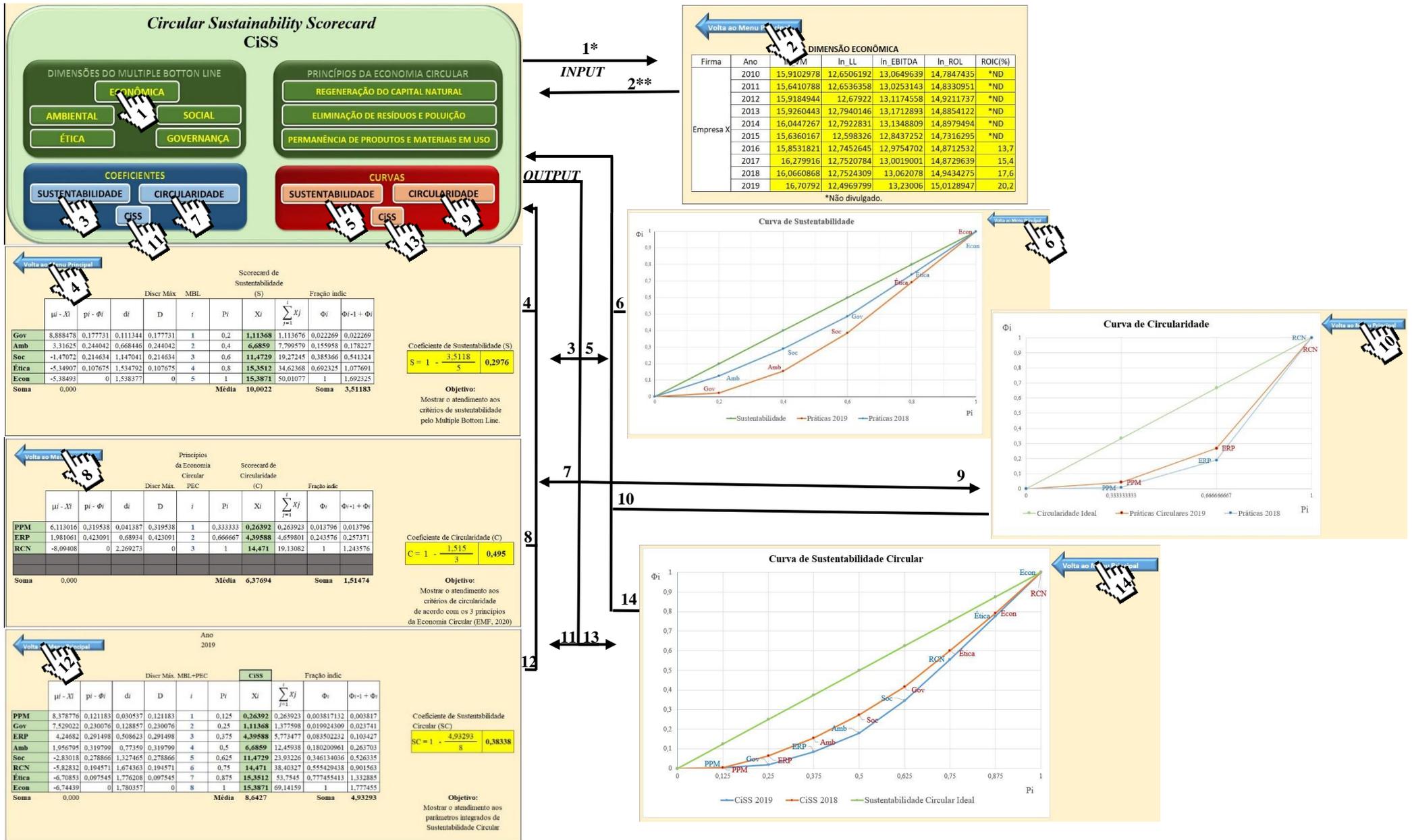


Figura 24 – Visão geral do menu de opções do Scorecard, seus inputs e outputs.

Fonte: Elaboração própria.

\*O input se repete até que todas as demais dimensões do MBL e os princípios da Economia Circular sejam alimentados. \*\* Idem quanto ao retorno ao menu principal.

Na sequência estabelecida, os passos 1 e 2 são escolher entre as dimensões do MBL e os princípios da Economia Circular, e, inserir os dados brutos coletados dos relatórios gerenciais. Estes passos são os únicos que se repetem durante o uso da planilha. Os passos seguintes já são de visualização dos resultados (coeficiente e curva de sustentabilidade e circularidade) para análise e comparação. Os passos de 3 a 6 mostram o *scorecard* de sustentabilidade, enquanto que, os passos de 7 a 10 mostram o *scorecard* de circularidade.

Por fim, os passos de 11 a 14 apresentam os resultados do CiSS, indicando, de forma integrada, o grau de discrepância e concentração das práticas de sustentabilidade circular corporativa. A curva de sustentabilidade circular pode ser interpretada e discutida sob a ótica dos investimentos feitos pela empresa para atender as oito perspectivas do CiSS. O equilíbrio entre tais perspectivas é o que levaria o coeficiente de sustentabilidade circular a ficar próximo de zero, o que representaria uma distribuição equitativa de ações e recursos em todas as perspectivas. Esse equilíbrio de prioridades tende a satisfazer tanto internamente quanto aos *stakeholders*. Numa abordagem pigouviana (Hoffmann, 2011), uma transferência de atenção, ou prioridade, de uma perspectiva para outra, levaria a um aumento da discrepância entre o discurso e a prática. E este comportamento pode se dar pela decisão gerencial de não internalização monetária dos danos causados a terceiros e ao meio ambiente. Por isso, o resultado do CiSS exorta a empresa a não permanecer com o crescimento econômico dissociado do esgotamento de recursos e degradação ambiental, e antecipar-se a mecanismos regulatórios que tendem a forçar a internalização de custos ambientais no sistema de preços.

Na curva do CiSS apresentada na Figura 7, a empresa se mostra com discrepância máxima na perspectiva ambiental. Observando o coeficiente de sustentabilidade circular, em 2019 a performance da empresa se distanciou da sustentabilidade circular em relação ao ano de 2018. O resultado alerta a empresa para o monitoramento de suas ações, no sentido de atender às demandas das perspectivas.

## 5.5 Conclusão

Partindo da premissa integrada da sustentabilidade circular, este artigo propôs um *Scorecard* de Sustentabilidade Circular (*Circular Sustainability Scorecard* – CiSS), considerando as dimensões do *Multiple Bottom Line* e os princípios da Economia Circular. Seu diferencial inovador está na tentativa precursora e exploratória de adaptar o coeficiente de Gini e a curva de Lorenz para o campo de mensuração da sustentabilidade corporativa, integrando nesse contexto, a Economia Circular, ambas aplicadas com dados do setor industrial de equipamentos eletroeletrônicos. O desenvolvimento da métrica de sustentabilidade circular foi

dividido em três etapas: i) definição do *Scorecard* de Sustentabilidade; ii) definição do *Scorecard* de Circularidade; e iii) integração e definição do CiSS.

Os resultados expostos com o uso de planilha dinâmica do MS Excel mostraram que o coeficiente e a curva de sustentabilidade circular são válidos aos seus propósitos, e que o CiSS proporciona uma visão ampla, completa e comparada do grau de sustentabilidade, integrado ao grau de circularidade, no nível meso, indicando o quanto a indústria do setor de equipamentos eletroeletrônicos está próximo, ou distante, de uma posição plena de sustentabilidade corporativa ancorada nos princípios da Economia Circular.

A concepção do CiSS supre a necessidade de mensuração e confronto do alinhamento da cadeia de valor definida pela empresa frente aos interesses de seus *stakeholders*. No que tange ao fechamento dos ciclos produtivos, como ocorre na gestão de resíduos da atividade produtiva e da fase pós-consumo, a exemplo das indústrias do setor de EEE, o CiSS proporciona uma visão objetiva do grau de atenção dos investimentos feitos pelas indústrias sob a ótica da circularidade, em relação às demais perspectivas da cadeia de valor que levam à melhoria na sustentabilidade corporativa. A proposta do CiSS oportuniza ao gestor uma visão holística e sinérgica da performance corporativa capaz de refletir as práticas empresariais na construção da sustentabilidade corporativa com foco na Economia Circular.

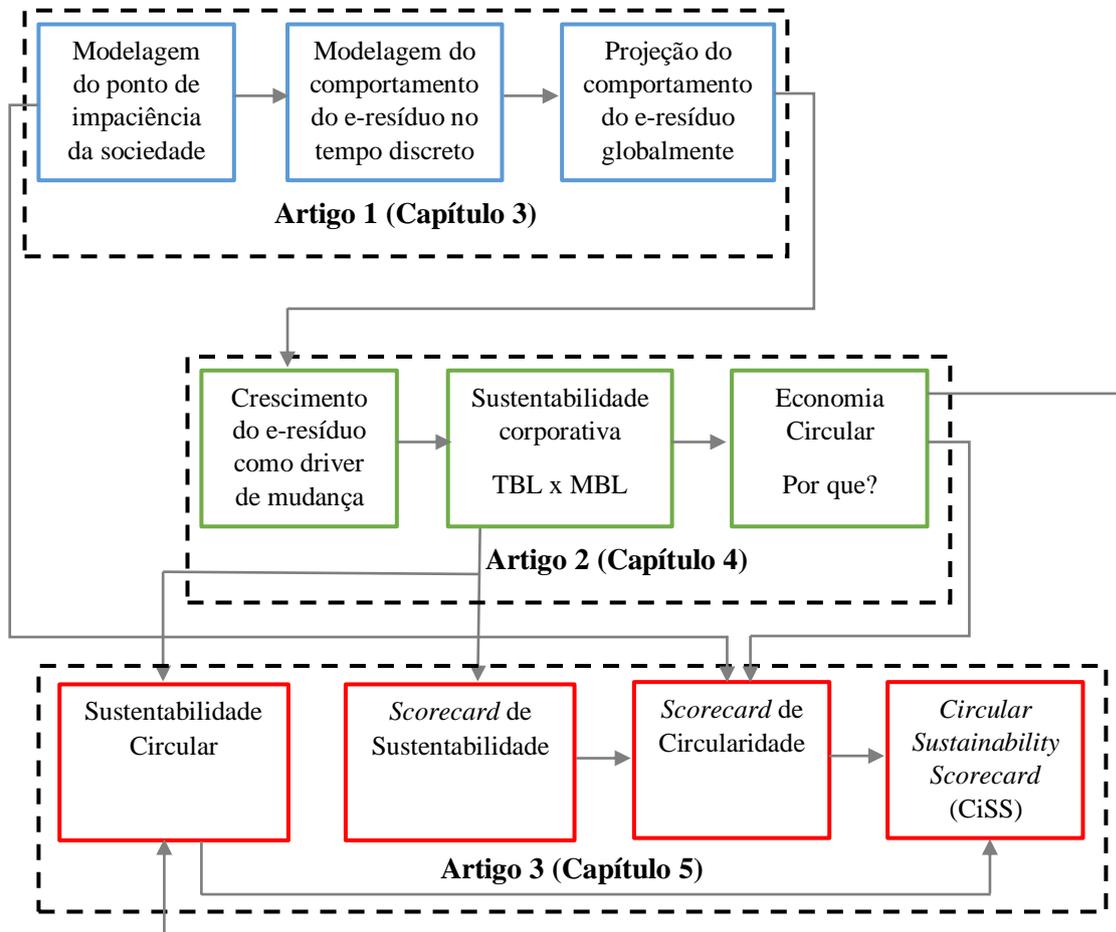
A replicação deste estudo em outras organizações do mesmo setor, ou em conglomerados, com uma base de dados uniforme e completa, pode proporcionar insights valiosos, bem como pode se tornar uma etapa aprofundada para fins confirmatórios.

Adicionalmente, um *gap* de pesquisa que pode ser explorado futuramente é a identificação das diferenças entre empresas com práticas mais próximas do *framework* de Sustentabilidade Circular e as mais distantes, com vistas a subsidiar o gestor no processo decisório de transição ou melhoria de processos, alinhando-os aos interesses de seus *stakeholders*. Isto pode ser feito com uma análise discriminante das variáveis envolvidas.

Por fim, o CiSS, para indústrias do setor de EEE, se mostra uma ferramenta útil para a determinação de políticas empresariais voltadas para alinhar o crescimento econômico, desejado pelos gestores e acionistas, com a sustentabilidade, esperada pelas demais partes interessadas. Indo nesse caminho, será possível construir um paradigma de desenvolvimento sustentável, fechando o ciclo produtivo e garantindo a longevidade de produtos, materiais e recursos.



Os resultados desta tese, em virtude de sua organização, encontram-se distribuídos dentre os três artigos desenvolvidos ao longo da pesquisa. A Figura 25 mostra as conexões entre os temas abordados. A sinergia entre as partes proporciona, de forma integrada, a resposta à questão de pesquisa levantada.



**Figura 25** – Resultados de pesquisa e suas conexões

Fonte: Elaboração própria.

As setas apresentadas na Figura 25 significam que o assunto iniciado na respectiva seta contribuiu como embasamento ao conteúdo para onde a seta aponta. Por exemplo, as reflexões teóricas sobre a abordagem conceitual da sustentabilidade corporativa sob a ótica do *Multiple Bottom Line* (MBL), presentes no artigo 2, foram essenciais para a construção do *framework* de sustentabilidade circular, sem o qual não seria possível propor o CiSS no artigo 3.

Este trabalho abordou o problema em torno do e-resíduo por ser este o tipo de resíduo que cresce mais rápido entre os resíduos gerados no mundo. Em uma análise mais aprofundada, foi possível perceber indícios de que o comportamento dos e-resíduos esteja fortemente correlacionado com o avanço da tecnologia e que esta pode estar afetando o crescimento exponencial do e-resíduo, impulsionado pela obsolescência funcional. O volume crescente de

e-resíduo gerado no mundo ainda não tem o tratamento adequado. Não houve evolução percentual do volume coletado e tratado nos últimos cinco anos, mesmo com avanços no campo das políticas públicas regulatórias e empresariais.

O primeiro artigo mostrou que, ao se estabelecer as especificações de um determinado tipo de e-resíduo, bem como seu volume inicial gerado, é possível chegar a um volume máximo suportado pela sociedade, a partir do qual serão exigidas políticas públicas mitigadoras das consequências da geração e descarte inadequado. Esse chamado ponto de impaciência da sociedade representa, em termos práticos, uma oportunidade de monitoramento dos diversos tipos de e-resíduos, ao mesmo tempo em que se torna um importante indicador basilar para formação de políticas públicas e estratégias empresariais voltadas para a redução do seu impacto no meio ambiente e na saúde humana.

As projeções realizadas com o modelo de equações de diferenças finitas, no tempo discreto, resultaram em um alerta para um crescimento exponencial do e-resíduo que supera as estimativas da literatura cinzenta. O fato é que o e-resíduo cresce numa velocidade superior a qualquer outro tipo de resíduo e o modelo aplicado nesta tese mostra que até 2030 o mundo terá um problema generalizado, caso não sejam tomadas medidas preventivas e corretivas mais eficientes. Mesmo os países mais desenvolvidos ainda têm um longo caminho até o controle dos níveis de geração do e-resíduo. Enquanto isso, a tendência é o ponto de impaciência da sociedade encurtar a distância e provocar imposições regulatórias que certamente causarão impacto na economia, ao ponto que empresas despreparadas para esse momento, não suportarão os custos de transição.

No gancho dessa problemática da geração do e-resíduo e de suas consequências, este trabalho trouxe à reflexão a concepção da sustentabilidade corporativa no sentido de discutir quais critérios são necessários para a definição de uma prática sustentável. Os critérios são vistos como ponto de partida para uma alternativa ao processo produtivo baseado na Economia Linear, responsável pelo crescimento exponencial do e-resíduo e por contribuir para a escassez de recursos, emissão de GEE e  $CO_2$ . Tais critérios culminam em uma concepção mais abrangente da sustentabilidade corporativa, resultando em cinco dimensões EGSEA que formam o *Multiple Bottom Line* (MBL). Paralelo ao MBL, a Economia Circular (EC) tangencia as discussões sobre uma alternativa para a antecipação ao ponto de impaciência da sociedade, ao mesmo tempo em que se mostra estreitamente ligada às oportunidades econômicas potenciais do mercado de e-resíduo. As reflexões realizadas levam à compreensão de que a sinergia latente nas abordagens teóricas do MBL e EC precisam ser aproveitadas para criar uma

métrica mais abrangente e completa para a organização mensurar suas práticas no contexto das duas abordagens, simultaneamente.

Com isso, fez-se aqui uma abordagem teórica defendendo que a integração entre as abordagens do MBL e EC é fundamental para um perfeito atendimento aos critérios de sustentabilidade corporativa. Esta integração MBL/EC satisfaz as necessidades de uma abordagem prática para o equilíbrio entre o atendimento aos interesses econômicos, socioambientais, éticos, de governança e ao fechamento do ciclo para a mitigação do problema do e-resíduo. Nesse sentido, este estudo propôs a abordagem teórica da sustentabilidade circular, ao mesmo tempo em que define como métrica a integração entre as cinco dimensões do MBL e os três princípios da Economia Circular em um único indicador, capaz de medir o coeficiente de sustentabilidade circular presente na performance de indústrias de equipamentos eletroeletrônicos.

O assim chamado de *Circular Sustainability Scorecard* – CiSS se apresenta como uma métrica de sustentabilidade circular flexível, abrangente, de interface amigável, eficiente aos seus propósitos e comparável. Seu poder informacional reside prioritariamente na análise das discrepâncias de cada perspectiva analisada. A dinâmica da ferramenta proporciona a visualização da mudança de posicionamento de cada perspectiva, de acordo com sua performance de um período para o outro. No que tange à periodicidade escolhida para análise, o CiSS é adaptável a qualquer necessidade informacional.

Diante das propostas desenvolvidas, a saber, a abordagem integrada da sustentabilidade circular e o CiSS, é possível concluir que o ponto de impaciência da sociedade representa o clamor dos *stakeholders* exercendo seu papel influenciador junto às indústrias de equipamentos eletroeletrônicos ainda inseridas no sistema degenerativo da Economia Linear. Tais empresas, por sua vez, podem avaliar, com o CiSS, seu posicionamento em relação à sustentabilidade, por meio de suas performances sob oito perspectivas diferentes, e assim, obter suporte decisório para definir pela permanência no paradigma da Economia Linear até que as iminentes imposições regulatórias de mudança sejam estabelecidas, ou, antecipar-se às tais imposições, corrigindo suas práticas e alinhando suas prioridades com os interesses de seus *stakeholders*.

Os resultados aqui expostos não esgotam o assunto. Ao contrário, representam mais um passo em direção ao desenvolvimento sustentável e à evolução das práticas de mensuração e *disclosure* ambientais. As reflexões e proposições deste trabalho contribuem para delineamentos de pesquisas futuras em vertentes promissoras. Tanto a aplicação prática do ponto de impaciência da sociedade quanto do CiSS podem ser aprimorados em um nível computacional, com um algoritmo que resulte em um sistema integrado de gestão e

performance da sustentabilidade circular, ou, no caso do ponto de impaciência da sociedade, um sistema de monitoramento do comportamento do capital natural. Outra abordagem possível é a definição de um tratamento padronizado às variáveis categóricas dos indicadores que compõem a estrutura de mensuração do modelo de sustentabilidade circular, o qual contribuirá para a uniformidade das métricas qualitativas escolhidas pelo gestor.

Por fim, a validação do modelo necessita de pesquisa junto a profissionais do mercado devido à sua complexidade, e falta de padronização das variáveis, não coube neste trabalho, até mesmo pelo momento ímpar vivenciado pelo mundo. O estabelecimento de critérios para a definição clara de empresas lineares e circulares, baseados em seus *disclosures*, pode ser útil para a construção de um modelo de análise discriminante que busque mostrar, sob a ótica econômica, por exemplo, quais modelos de negócios se sobressaem em suas performances podem também ser palco de pesquisas futuras.

## REFERÊNCIAS

- ABDI. (2013). Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos Análise de Viabilidade Técnica e Econômica. *Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - ABDI*, 177.
- Alabi, O. A., Bakare, A. A., Xu, X., Li, B., Zhang, Y., & Huo, X. (2012). Comparative evaluation of environmental contamination and DNA damage induced by electronic-waste in Nigeria and China. *Science of the Total Environment*, 423, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.01.056>
- Alamerew, Y. A., & Brissaud, D. (2019). Circular economy assessment tool for end of life product recovery strategies. *Journal of Remanufacturing*, 9(3), 169–185. <https://doi.org/10.1007/s13243-018-0064-8>
- Almeida, L. maria W., & Oliveira, C. F. (2015). *Modelos de crescimento populacional : um olhar à luz de uma socioepistemologia*. 107–133.
- Appelt, A. I., Porto, W. S., Pedro Filho, F. S., Carneiro, A. F., & Costa, R. F. (2015). Electronic waste management and discard of technology. *30th International Conference on Solid Waste Technology and Management*, 964–982. Philadelphia, PA.
- Awasthi, A. K., Cucchiella, F., D’Adamo, I., Li, J., Rosa, P., Terzi, S., ... Zeng, X. (2018). Modelling the correlations of e-waste quantity with economic increase. *Science of the Total Environment*, 613–614, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.288>
- B3. (2011). Novo Valor - Sustentabilidade nas empresas. In *BOVESPA. Guia de Sustentabilidade. Novo Valor: Sustentabilidade nas Empresas. Como Começar, Quem*

- Envolver e o Que Priorizar*. Retrieved from <http://www.b3.com.br/data/files/1A/D7/91/AF/132F561060F89E56AC094EA8/Guia-para-empresas-listadas.pdf>
- Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). The global e-waste monitor - 2017. In *United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA)*. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.05.148>
- Baldé, C. P., Wang, F., Kuehr, R., & Huisman, J. (2015). The global e-waste monitor - 2014. In *United Nations University - UNU-IAS - Institute for the Advanced Study of Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s00705-012-1479-4>
- Bansal, Pratima; Roth, K. (2000). Why Companies Go Green : Responsiveness. *Academy of Management*, 43(4), 717–736. <https://doi.org/10.2307/1556363>
- Barton, D., Bailey, J., & Zoffer, J. (2016). Rising to the challenge of short-termism. *Rising to the Challenge of Short-Termism*, 16. Retrieved from <https://www.fcltglobal.org/docs/default-source/default-document-library/fclt-global-rising-to-the-challenge.pdf>
- Barton, D., Manyika, J., & Williamson, S. K. (2017). Finally, Proof That Managing for the Long Term Pays Off. *Harvard Business Review Digital Articles*, 2–8. Retrieved from <https://hbr.org/2017/02/finally-proof-that-managing-for-the-long-term-pays-off>
- Barton, D., York, N., Manyika, J., & Francisco, S. (2017). Measuring the economic impact of short-termism. *McKinsey Quarterly*, 2017(2), 57–61.
- Bomfim, W. H. (2011). *Vítimas da contaminação por chumbo e a luta pelo direito: o caso do município de Santo Amaro na Bahia* (Universidade Católica de Salvador). Retrieved from <http://ri.ucsal.br:8080/jspui/bitstream/123456730/319/3/WADIIH HABIB BOMFIM.pdf>
- Boulding, K. E. (1966). The Economics of the Coming Spaceship Earth. In H. Jarrett (Ed.), *Environmental Quality in a Growing Economy* (pp. 3–14). Baltimore, MD: Resources for the Future/Johns Hopkins University Press.
- Brasil. Decreto nº 7.404, de 23 de Dezembro de 2010. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Im. , (2010).
- Brasil. Lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. ,

- (2010).
- Brasil. (2016). Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. In *Senado Federal*.  
<https://doi.org/10.4304/jcp.6.9.1903-1912>
- Brasil. *Decreto nº 9.177, de 23 de Outubro de 2017. Regulamenta o art. 33 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e complementa os art. 16 e art. 17 do Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010 e dá outras. , (2017).*
- Brasil, R. F. do. Decreto 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. , 2 Senado Federal § (2020).
- Brayner, F. (2019). *Desafios da economia circular (Palestra)*. Recife/PE: Federação das Indústrias de Pernambuco – FIEPE.
- Brockett, A., & Rezaee, Z. (2013). Corporate sustainability: integrating performance and reporting. In *Wiley corporate F&A series*. Hoboken, NJ: Wiley corporate F&A.
- Caiado, N., Guarnieri, P., Xavier, L. H., & Chaves, G. D. L. D. (2017). Resources , Conservation and Recycling A characterization of the Brazilian market of reverse logistic credits ( RLC ) and an analogy with the existing carbon credit market. *“Resources, Conservation & Recycling,” 118, 47–59.*  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.11.021>
- Cao, J., Chen, Y., Shi, B., Lu, B., Zhang, X., Ye, X., ... Zhou, G. (2016). WEEE recycling in Zhejiang Province, China: generation, treatment, and public awareness. *Journal of Cleaner Production, 127, 311–324.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.147>
- Carson, R. (1962). *Silent Spring*. Houghton Mifflin.
- Cayzer, S., Griffiths, P., & Beghetto, V. (2017). Design of indicators for measuring product performance in the circular economy. *International Journal of Sustainable Engineering, 10(4–5).* <https://doi.org/10.1080/19397038.2017.1333543>
- Cong, X., Xu, X., Xu, L., Li, M., Xu, C., Qin, Q., & Huo, X. (2018). Elevated biomarkers of sympatho-adrenomedullary activity linked to e-waste air pollutant exposure in preschool children. *Environment International, 115(March), 117–126.*  
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.03.011>
- Cooper, D. R., & Gutowski, T. G. (2017). The Environmental Impacts of Reuse: A Review. *Journal of Industrial Ecology, 21(1), 38–56.* <https://doi.org/10.1111/jiec.12388>
- Davis, J. M., & Garb, Y. (2019). A strong spatial association between e-waste burn sites and childhood lymphoma in the West Bank, Palestine. *International Journal of Cancer, 144(3), 470–475.* <https://doi.org/10.1002/ijc.31902>
- Decharat, S. (2018). Urinary mercury levels among workers in e-waste shops in Nakhon Si

- Thammarat Province, Thailand. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, 51(4), 196–204. <https://doi.org/10.3961/jpmp.18.04>
- Decharat, S., & Kiddee, P. (2020). Health problems among workers who recycle electronic waste in southern Thailand. *Osong Public Health and Research Perspectives*, i(1), 34–43. <https://doi.org/10.24171/j.phrp.2020.11.1.06>
- Di Maio, F., Rem, P. C., Baldé, K., & Polder, M. (2017). Measuring resource efficiency and circular economy: A market value approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 163–171. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.009>
- Drucker, P. F. (1993). *Sociedade Pós-Capitalista*. São Paulo/SP: Pioneira.
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business*. Michigan University: New Society Publishers.
- EMF, E. M. F. (2013a). *Towards the Circular Economy Vol 1: economic and business rationale for an accelerated transition* (Vol. 40). Retrieved from <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>
- EMF, E. M. F. (2013b). *Towards the Circular Economy Vol 2: Opportunities for the consumer goods sector*. <https://doi.org/10.1162/108819806775545321>
- EMF, E. M. F. (2013c). *Towards the Circular Economy Vol 3: accelerating the scale-up across global supply chains*. Retrieved from <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Towards-the-circular-economy-volume-3.pdf>
- EMF, E. M. F. (2015a). *Toward the Circular Economy*. Retrieved from [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-à-economia-circular\\_Updated\\_08-12-15.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-à-economia-circular_Updated_08-12-15.pdf)
- EMF, E. M. F. (2015b). *Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition*. Retrieved from [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE\\_Ellen-MacArthur-Foundation\\_9-Dec-2015.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf)
- EMF, E. M. F. (2017). *Circular Consumer Electronics: an initial exploration*.
- EMF, E. M. F. (2019a). Infographic: circular economy system diagram. Retrieved August 2, 2019, from <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/infographic>
- EMF, E. M. F. (2019b). What is a circular economy? Concept. Retrieved August 2, 2019, from <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept>
- Eurostat. (2018). Energy, transport and environment indicators. 2018 edition. In *Eurostat -*

- Statistica Books*. <https://doi.org/10.2785/94549>
- Eurostat. (2020). Escritório de Estatística da União Europeia. Retrieved from [https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env\\_waselee&lang=en](https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_waselee&lang=en)
- Farias, K. T. R., & Farias, M. R. S. (2009). Influência do desempenho ambiental na estratégia de divulgação ambiental das empresas abertas brasileiras. *XXXIII Encontro Da ANPAD*, 19–23. São Paulo/SP.
- Faro, O. El, Calia, R. C., & Pavan, V. H. G. (2013). A logística reversa do lixo tecnológico: um estudo sobre a coleta do e-lixo em uma importante universidade brasileira. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 6(3), 142. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v6i3.461>
- FEAM, F. E. do M. A. (2011). Inventário de resíduos sólidos industriais: ano base 2010. In *Fundação Estadual do Meio Ambiente. - FEAM*. Retrieved from [http://www.feam.br/images/stories/declaracoes\\_ambientais/inventarios\\_industriais/Inventário\\_Resíduos\\_Sólidos\\_Industriais\\_\\_2015\\_ano\\_base\\_2014.pdf](http://www.feam.br/images/stories/declaracoes_ambientais/inventarios_industriais/Inventário_Resíduos_Sólidos_Industriais__2015_ano_base_2014.pdf)
- Fink, L. D. (2020). Uma mudança estrutural nas finanças. Retrieved September 1, 2020, from BlackRock, Inc. website: <https://www.blackrock.com/br/larry-fink-ceo-letter>
- Fischer, A., & Pascucci, S. (2017). Institutional incentives in circular economy transition: The case of material use in the Dutch textile industry. *Journal of Cleaner Production*, 155, 17–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.038>
- Flygansvær, B., Dahlstrom, R., & Nygaard, A. (2018). Exploring the pursuit of sustainability in reverse supply chains for electronics. *Journal of Cleaner Production*, 189, 472–484. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.014>
- Fonte, R., Agosti, A., Scafa, F., & Candura, S. M. (2007). Anaemia and abdominal pain due to occupational. *The Hematology Journal*, 92(online), 13–14.
- Forti, V., Baldé, C. ., & Kuehr, R. (2018). E-waste Statistics: Guidelines on Classifications, Reporting and Indicators, second edition. In *United Nations University, IAS-SCYCLE*. Retrieved from [http://collections.unu.edu/eserv/UNU:6477/RZ\\_EWaste\\_Guidelines\\_LoRes.pdf](http://collections.unu.edu/eserv/UNU:6477/RZ_EWaste_Guidelines_LoRes.pdf)
- Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020: quantities, flows and the circular economy potential*. Bonn/Geneva/Rotterdam.
- Franklin-Johnson, E., Figge, F., & Canning, L. (2016). Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance. *Journal of Cleaner Production*, 133, 589–598. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.023>
- Freeman, A. M. (1979). *The benefits of environmental improvements: theory and practice*. Baltimore, MD: The John Hopkins University Press.

- Freeman, R. E. (1984). *Strategic management: a stakeholder perspective*. Boston: Pitman Publishing.
- Geissdoerfer, M., Morioka, S. N., & Carvalho, M. M. De. (2018). Business models and supply chains for the Circular Economy. *Journal of Cleaner Production*, *190*, 712–721. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.159>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, *143*, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- GFN, G. F. N. (2018). The ecological footprint is a fair metric for Slovenia to achieve its climate goals. Retrieved from <https://www.footprintnetwork.org/2018/09/25/ecological-footprint-is-a-fair-metric-for-slovenia-to-achieve-its-climate-goals/>
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Global, S. (2020). ESG Evaluation: sustainable practices, sustainable returns. Retrieved August 12, 2020, from S&P Global website: [https://www.spglobal.com/en/capabilities/esg-evaluation?mkt\\_tok=eyJpIjoiWVRneVpEYzFZV0ZsTWpBMyIsInQiOiJJMHBrWDhXUFWvZzVCbWVXT3FMdWtNTmlnVEhrbmxDWlWjNhT2lZUTHVUvHkdEhZVFJzRmZKK1d6aUd4Y0tETytGb0srTWVabEhoMHVyekxVUzQ3KzkwM2M3d2R0ckxWdE1NNWdtdzldTdwMzZKb3g](https://www.spglobal.com/en/capabilities/esg-evaluation?mkt_tok=eyJpIjoiWVRneVpEYzFZV0ZsTWpBMyIsInQiOiJJMHBrWDhXUFWvZzVCbWVXT3FMdWtNTmlnVEhrbmxDWlWjNhT2lZUTHVUvHkdEhZVFJzRmZKK1d6aUd4Y0tETytGb0srTWVabEhoMHVyekxVUzQ3KzkwM2M3d2R0ckxWdE1NNWdtdzldTdwMzZKb3g)
- Godoi, A. F., Aquino, C. É. M. de, Pereira, J. E. A., Santos, J. O. dos, & Santos, F. de A. (2020). Fatores determinantes da rentabilidade bancária dos bancos de grande porte listados na [B]3 Brasil, Bolsa, Balcão: uma análise empírica com base no ROIC. *Revista Eletrônica de Administração - REA*, *19*(1), 104–126. Retrieved from <http://periodicos.unifacel.com.br/index.php/rea/article/view/1754>
- Golev, A., & Corder, G. D. (2017). Quantifying metal values in e-waste in Australia: The value chain perspective. *Minerals Engineering*, *107*, 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.10.021>
- Gujarati, D. N., & Porter, D. C. (2011). Econometria básica. In *Mqa* (5th ed.). Porto Alegre/RS: AMGH.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2018). Exploratory Factor Analysis. In *Multivariate Data Analysis* (8th ed., p. 832). Cengage Learning.
- Heyes, G., Sharmina, M., Mendoza, J. M. F., Gallego-Schmid, A., & Azapagic, A. (2018).

- Developing and implementing circular economy business models in service-oriented technology companies. *Journal of Cleaner Production*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.168>
- Hoffmann, R. (2011). Medidas de desigualdade. In *Estatística para economistas* (4th ed.).  
<https://doi.org/85-221-0494-8>
- Hofmann, F. (2019). Circular business models: Business approach as driver or obstructer of sustainability transitions? *Journal of Cleaner Production*, 224, 361–374.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.115>
- Hogan, D. J. (1995). *Dilemas socioambientais e desenvolvimento sustentavel* (2nd ed.). São Paulo/SP: Unicamp.
- Hopwood, A., Unerman, J., & Fries, J. (2010). *Accounting for sustainability: practical insights*. London: Earthscan.
- Houaiss, A., & Villar, M. (2001). Dicionário Houaiss da língua portuguesa. In *Instituto Antonio Houaiss de Lexicografia e Banco de Dados da Língua Portuguesa*. Rio de Janeiro/RJ: Instituto Antonio Houaiss de Lexicografia e Banco de Dados da Língua Portuguesa.
- Hu, Y., He, X., & Poustie, M. (2018). Can legislation promote a circular economy? A material flow-based evaluation of the circular degree of the Chinese economy. *Sustainability (Switzerland)*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/su10040990>
- Huo, X., Dai, Y., Yang, T., Zhang, Y., Li, M., & Xu, X. (2019). Decreased erythrocyte CD44 and CD58 expression link e-waste Pb toxicity to changes in erythrocyte immunity in preschool children. *Science of the Total Environment*, 664, 690–697.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.040>
- Huo, X., Wu, Y., Xu, L., Zeng, X., Qin, Q., & Xu, X. (2019). Maternal urinary metabolites of PAHs and its association with adverse birth outcomes in an intensive e-waste recycling area. *Environmental Pollution*, 245, 453–461.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.098>
- Ijiri, Y. (1975). *Theory of accounting measurement*. Sarasota: American Accounting Association.
- Ikhlayel, M. (2016). Differences of methods to estimate generation of waste electrical and electronic equipment for developing countries: Jordan as a case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 134–139.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.015>
- Inglezakis, V. J., & Moustakas, K. (2015). Household hazardous waste management: A

- review. *Journal of Environmental Management*, 150, 310–321.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.021>
- Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1997). *A estratégia em ação: Balanced Scorecard*. Rio de Janeiro/RJ: Campus.
- Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (2002). *Organização orientada para a estratégia: como as empresas que adotam o Balanced Scorecard prosperam no novo ambiente de negócios*. Rio de Janeiro/RJ: Alta Book.
- Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (2004). *Mapas estratégicos: Convertendo ativos intangíveis em resultados tangíveis*. Rio de Janeiro/RJ: Elsevier.
- Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (2006). *Alinhamento: utilizando o Balanced Scorecard para criar sinergias positivas*. Rio de Janeiro/RJ: Alta Book.
- Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (2008). *A execução premium*. Rio de Janeiro/RJ: Elsevier.
- Kasztelan, A. (2020). How circular are the European economies? A taxonomic analysis based on the INEC (index of national economies' circularity). *Sustainability (Switzerland)*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/su12187613>
- Kirchherr, J., Piscicelli, L., Bour, R., Kostense-Smit, E., Muller, J., Huibrechtse-Truijens, A., & Hekkert, M. (2018). Barriers to the Circular Economy: Evidence From the European Union (EU). *Ecological Economics*, 150(April), 264–272.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.028>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127(April), 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Kristensen, H. S., & Mosgaard, M. A. (2020). A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability? *Journal of Cleaner Production*, 243, 118531. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118531>
- Landrigan, P. J., & Goldman, L. R. (2011). Children's vulnerability to toxic chemicals: A challenge and opportunity to strengthen health and environmental policy. *Health Affairs*, 30(5), 842–850. <https://doi.org/10.1377/hlthaff.2011.0151>
- Lebow, V. (1955). Journal of Retailing. *Journal of Retailing*, 31(5), 7.  
<https://doi.org/10.1016/j.jretai.2006.1>
- Leite, P. R. (2017). *Logística reversa: sustentabilidade e competitividade* (3rd ed.). São

Paulo/SP: SaraivaUni.

- Leonard, A. (2020). Story of Stuff, Referenced and Annotated Script. Retrieved July 24, 2020, from [https://www.storyofstuff.org/wp-content/uploads/2020/01/StoryofStuff\\_AnnotatedScript.pdf](https://www.storyofstuff.org/wp-content/uploads/2020/01/StoryofStuff_AnnotatedScript.pdf)
- Lepawsky, J., & McNabb, C. (2010). Mapping international flows of electronic waste. *Canadian Geographer*, *54*(2), 177–195. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.2009.00279.x>
- Lewis, S. L., & Maslin, M. A. (2015). Defining the Anthropocene. *Nature*, *519*, 171–180.
- Linder, M., Sarasini, S., & van Loon, P. (2017). A Metric for Quantifying Product-Level Circularity. *Journal of Industrial Ecology*, *21*(3), 545–558. <https://doi.org/10.1111/jiec.12552>
- Liu, Q., Li, H., Zuo, X., Zhang, F., & Wang, L. (2009). A survey and analysis on public awareness and performance for promoting circular economy in China : A case study from Tianjin. *Journal of Cleaner Production*, *17*(2), 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.003>
- Lu, B., Liu, J., Yang, J., & Li, B. (2015). The environmental impact of technology innovation on WEEE management by Multi-Life Cycle Assessment. *Journal of Cleaner Production*, *89*, 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.004>
- Lu, C., Zhang, L., Zhong, Y., Ren, W., Tobias, M., Mu, Z., ... Xue, B. (2014). An overview of e-waste management in China. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, *17*(1), 2020. <https://doi.org/10.1007/s10163-014-0256-8>
- Luz, B. (2017). *Economia Circular Holanda – Brasil: da teoria à prática*. Rio de Janeiro/RJ: Exchange 4 Change Brasil.
- Luz, B., & Echevengua, C. (2015). Gestão empresarial para a sustentabilidade em tempos de mudanças climáticas. In *Manole*. São Paulo/SP: Manole.
- Macedo, M. A. D. S., Machado, M. R., Murcia, F. D.-R., & Machado, M. A. V. (2012). Análise da relevância do Ebitda versus Fluxo de Caixa Operacional no mercado brasileiro de capitais. *Advances in Scientific and Applied Accounting*, *5*(1), 99–130. Retrieved from <http://www.atena.org.br/revista/ojs-2.2.3-08/index.php/ASAA/article/viewFile/1846/1702>
- Magalini, F. U.-I., Kuehr, R. U.-I., & Baldé, C. P. U.-I. (2015). *eWaste in Latin America*. Retrieved from <http://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2015/11/gsma-unu-ewaste2015-eng.pdf>
- Magrini, A. ., & Veiga, L. B. E. (2018). *Ecologia industrial: desafios na perspectiva da*

*Economia Circular*. Rio de Janeiro/RJ: Synergia.

- Manninen, K., Koskela, S., Antikainen, R., Bocken, N., Dahlbo, H., & Aminoff, A. (2018). Do circular economy business models capture intended environmental value propositions? *Journal of Cleaner Production*, *171*, 413–422.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.003>
- Mantese, G. C. (2018). *Proposal of framework for the validation of industrial symbiosis indicators using agent-based modeling* (Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos). Retrieved from  
<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-23052018-100230/pt-br.php>
- Marconi, M. A., & Lakatos, E. M. (2017). *Metodologia científica* (7th ed.). São Paulo/SP: Atlas.
- McDonough, W., & Braungart, M. (2013). *Cradle to Cradle: criar e reciclar ilimitadamente*. São Paulo/SP: GGBR.
- Mebratu, D. (1998). Sustainability and sustainable development: historical and conceptual review. *Environ Impact Asses Rev*, *9255(98)*, 493–520.
- Merli, R., Preziosi, M., & Acampora, A. (2018). How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, *178*, 703–722.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.112>
- Mey, M. T., & Lamprecht, C. (2020). The association between EBITDA reconciliation quality and opportunistic disclosure. *South African Journal of Accounting Research*, *0(0)*, 1–24.  
<https://doi.org/10.1080/10291954.2020.1817268>
- MMA, M. do M. A. Acordo setorial para implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes. , Pub. L. No. Acordo Setorial MMA de 31/08/2019, Brasília/DF 92 (2019).
- Moore, G. E. (1965). Cramming more components on to integrated circuits. *Electronics*, *38(8)*.
- Moraga, G., Huysveld, S., Mathieux, F., Blengini, G. A., Alaerts, L., Van Acker, K., ... Dewulf, J. (2019). Circular economy indicators: What do they measure? *Resources, Conservation and Recycling*, *146(March)*, 452–461.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045>
- Mossali, E., Picone, N., Gentilini, L., Rodríguez, O., Pérez, J. M., & Colledani, M. (2020). Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments. *Journal of Environmental Management*, *264*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110500>

- Motta, R. S. da. (2006). *Economia ambiental*. Rio de Janeiro/RJ: FGV.
- Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2016). *The Circular Economy : An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context*. (May), 0–37.  
<https://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- Ngan, S. L., How, B. S., Teng, S. Y., Promentilla, M. A. B., Yatim, P., Er, A. C., & Lam, H. L. (2019). Prioritization of sustainability indicators for promoting the circular economy: The case of developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *111*, 314–331. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.001>
- Nilipour, A., Silva, T. De, & Li, X. (2020). The Readability of Sustainability Reporting in New Zealand over time The Readability of Sustainability Reporting in New Zealand over time. *Australasian Accounting, Business and Finance Journal*, *14*(3), 86–107.  
<https://doi.org/10.14453/aabfj.v14i3.7>
- Nti, A. A. A., Arko-Mensah, J., Botwe, P. K., Dwomoh, D., Kwarteng, L., Takyi, S. A., ... Fobil, J. N. (2020). Effect of particulate matter exposure on respiratory health of e-waste workers at agboglobshie, Accra, Ghana. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(9), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093042>
- Ormazabal, M., Prieto-Sandoval, V., Puga-Leal, R., & Jaca, C. (2018). Circular Economy in Spanish SMEs: Challenges and opportunities. *Journal of Cleaner Production*, *185*, 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.031>
- Otoni, M., Dias, P., & Xavier, L. H. (2020). A circular approach to the e-waste valorization through urban mining in Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, *261*.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120990>
- Parchomenko, A., Nelen, D., Gillabel, J., & Rechberger, H. (2019). Measuring the circular economy - A Multiple Correspondence Analysis of 63 metrics. *Journal of Cleaner Production*, *210*, 200–216. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.357>
- Pauli, G. (2019). Blue Economy. Retrieved August 2, 2019, from  
<https://www.gunterpauli.com/the-blue-economy.html>
- Pearce, D. W., & Turner, R. K. (1990). *Economics of Natural Resources and the Environment*. Baltimore, MD.
- Per Döfnäs, E., & Kuehr, R. (2017). *Step Annual Report 2015-2016*. Retrieved from  
[https://www.step-initiative.org/files/\\_documents/annual\\_reports/2015\\_16/Step\\_Annual\\_Report\\_2015\\_16\\_ebook.html](https://www.step-initiative.org/files/_documents/annual_reports/2015_16/Step_Annual_Report_2015_16_ebook.html)
- Persson, O. (2015). What Is circular economy? – The discourse of circular economy in the

- Swedish public sector. Master Thesis in Sustainable Development. Uppsala University. Uppsala, Swedish.
- Pickin, J., & Randell, P. (2016). *Australian National Waste Report 2016. A Report Prepared for the Department of Energy and Environment*. 84. Retrieved from <https://www.environment.gov.au/system/files/resources/d075c9bc-45b3-4ac0-a8f2-6494c7d1fa0d/files/national-waste-report-2016.pdf%0Awww.blueenvironment.com.au>
- Porter, M. E., & Kramer, M. R. (2011). Creating shared value. *Harvard Business Review*, (Jan/Feb), 62–77.
- Porto, W. S., Brasnieski, A. C. F., Souza, J. A. de, & Freitas, M. A. L. de. (2020). Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos: um diagnóstico da destinação na percepção do consumidor final de Vilhena/RO. *Amazônia, Organizações e Sustentabilidade - AOS*, 8(2), 07. <https://doi.org/10.17648/aos.v8i2.1008>
- Porto, W. S., Freitas, M. A. L. de, & Silva, A. S. (2020a). Basta! Ou eles, ou nós! Uma reflexão sobre o ponto de impaciência da sociedade no mercado do e-resíduo sob as lentes do Multiple Bottom Line e da Economia Circular. *XXII ENGEMA - Encontro Internacional de Gestão Empresarial e Meio Ambiente*, 1–19. Retrieved from <http://engemausp.submissao.com.br/22/anais/arquivos/139.pdf>
- Porto, W. S., Freitas, M. A. L. de, & Silva, A. S. (2020b). Dinâmica do comportamento dos e-resíduos globalmente e o ponto de impaciência da sociedade. *XXII ENGEMA - Encontro Internacional de Gestão Empresarial e Meio Ambiente*, 1–16. Retrieved from <http://engemausp.submissao.com.br/22/anais/arquivos/138.pdf>
- Porto, W. S., Souza, J. A. de, Campos, K. S., & Freitas, M. A. L. de. (2018). Gestão do descarte de resíduos eletroeletrônicos com foco na TI Verde. *Amazônia, Organizações e Sustentabilidade - AOS*, 7(2), 47–68. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17800/2238-8893/aos.v7n2jul/dez2018p47-68>
- Portugal, C. E. (2018). Sobre economia circular. Retrieved September 6, 2018, from <https://www.circulareconomy.pt/sobre-economia-circular/#historia>
- Powell, J. T., & Chertow, M. R. (2019). Quantity, Components, and Value of Waste Materials Landfilled in the United States. *Journal of Industrial Ecology*, 23(2), 466–479. <https://doi.org/10.1111/jiec.12752>
- Pronczuk-Garbino, J. (2005). Children's Health and the Environment: A Global Perspective. In *World Health Organization* (Vol. 19). <https://doi.org/10.1108/ijhcqa.2006.06219eae.002>
- Puangprasert, S., & Prueksasit, T. (2019). Health risk assessment of airborne Cd, Cu, Ni and

- Pb for electronic waste dismantling workers in Buriram Province, Thailand. *Journal of Environmental Management*, 252(October), 109601.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109601>
- Raworth, K. (2019). *Economia Donut: uma alternativa ao crescimento a qualquer custo*. Rio de Janeiro/RJ: Zahar.
- Rezaee, Z. (2017). Corporate Sustainability: Theoretical and Integrated Strategic Imperative and Pragmatic Approach. *The Journal of Business Inquiry*, 16(1), 60–87. Retrieved from <http://www.uvu.edu/woodbury/jbi/articles>
- Ricklefs, R. E. (2010). The Economy of Nature. In *Guanabara Koogan* (6th ed.). USA.
- Rome, T. C. of. (2020). History. Retrieved September 3, 2020, from <http://www.clubofrome.org/about-us/history/>
- Ruskey, F., & Weston, M. (2011). Spherical venn diagrams with involutory isometries. *The Electronic Journal of Combinatorics*, 18(1), 191–204.
- S&P Dow Jones. (2020). Índice S&P/B3 Brasil ESG (BRL). Retrieved from <https://portugues.spindices.com/indices/equity/sp-b3-brazil-esg-index-brl>
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., & Kendall, A. (2019). A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production*, 207, 542–559.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014>
- Schroeder, P., Anggraeni, K., & Weber, U. (2019). The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 77–95. <https://doi.org/10.1111/jiec.12732>
- Schumpeter, J. A. (1942). *Capitalism, Socialism, and Democracy* (3rd ed.). Harper and Brothers.
- Seith, R., Arain, A. L., Nambunmee, K., Adar, S. D., & Neitzel, R. L. (2019). Self-Reported Health and Metal Body Burden in an Electronic Waste Recycling Community in Northeastern Thailand. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 61(11), 905–909. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000001697>
- Silva, T.-A. de. (2015). Corporate Sustainability: Integrating Performance and Reporting. *Pacific Accounting Review*, 27(4), 438–440. <https://doi.org/10.1108/PAR-08-2013-0077>
- Soetrisno, F. N., & Delgado-Saborit, J. M. (2020). Chronic exposure to heavy metals from informal e-waste recycling plants and children’s attention, executive function and academic performance. *Science of the Total Environment*, 717, 137099.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137099>
- Souza, G. F. (2015). *Avaliação ambiental nas cooperativas de materiais recicláveis*

- (Universidade de São Paulo - USP). <https://doi.org/10.11606/T.5.2015.tde-20052015-103437>
- Souza, R. G., Clímaco, J. C. N., Sant'Anna, A. P., Rocha, T. B., Valle, R. A. B., & Quelhas, O. L. G. (2016). Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. *Waste Management*, *57*, 46–56.  
<https://doi.org/10.1177/0734242X16665914>
- Stahel, W. R. (2016). The Circular Economy. Retrieved August 2, 2019, from Nature News, Nature Publishing Group website: <https://www.nature.com/news/the-circular-economy-1.19594>
- Stahel, W. R., & Reday-Mulvey, G. (1977). *The Potential for Substituting Manpower for Energy: Final Report 30 July 1977 for the Commission of the European Communities*. Battelle.
- Statistics Netherlands, C. (2020). Population dynamics; month and year. Retrieved from <https://www.cbs.nl/en-gb/figures/detail/83474ENG>
- StEP, I. (2013). Annual report 2012-2013. In *United Nations University (UNU)*. Retrieved from [https://www.step-initiative.org/files/\\_documents/annual\\_reports/2012\\_13/StEP\\_AR.html](https://www.step-initiative.org/files/_documents/annual_reports/2012_13/StEP_AR.html)
- Sunder, S. (2014). *Teoria da contabilidade e do controle*. São Paulo/SP: Atlas.
- Tavoni, R., & Zotin G. de Oliveira, R. (2013). Os modelos de crescimento populacional de Malthus e Verhulst - uma motivação para o ensino de logaritmos e exponenciais. *C.Q.D.- Revista Eletrônica Paulista de Matemática*, *2*, 86–99.  
<https://doi.org/10.21167/cqdv022201323169664rtrzgo8699>
- Urbinati, A., Chiaroni, D., & Chiesa, V. (2017). Towards a new taxonomy of circular economy business models. *Journal of Cleaner Production*, *168*, 487–498.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.047>
- Van Schaik, A., & Reuter, M. A. (2016). Recycling indices visualizing the performance of the circular economy. *World of Metallurgy - ERZMETALL*, *69*(4), 201–216.
- Verhulst, P. F. (1838). Noticesurlaloi que La population suitdansso naccroissement. *Correspondance Mathématique et Physique*, *10*, 113–121.
- Vieira, N. M. C., Da Silva, M. J. P. G., Filho, F. de S. P., Madeira, M. J. A., & De Almeida, F. M. (2018). Managing the technology for selectively collecting solid waste in the western amazon sub region. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, *44*(1), 43–50. <https://doi.org/10.5276/JSWTM.2018.43>
- Wang, F., Huisman, J., Stevels, A., & Baldé, C. P. (2013). Enhancing e-waste estimates:

- Improving data quality by multivariate Input-Output Analysis. *Waste Management*, 33(11), 2397–2407. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.07.005>
- Watson, J. (1968). *The Double Helix: a personal account of the discovery of the structure of DNA*. EUA: Atheneum Press.
- WCED, W. C. on E. and D. (1987). *Our common future* (G. H. Brundtland, Ed.). Oxford/New York: Oxford University Press.
- Weetman, C. (2019). *Economia Circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa*. São Paulo/SP: Autêntica Business.
- Weg. (2018). *Relatório anual integrado 2018*. Retrieved from <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/sustainability>
- Weg. (2019). *Relatório anual integrado 2019*. Retrieved from <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/sustainability>
- Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., & Böni, H. (2005). Global perspectives on e-waste. *Environmental Impact Assessment Review*, 25(5 SPEC. ISS.), 436–458. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2005.04.001>
- Xavier, L. H. ., & Lins, F. A. F. (2018). Mineração Urbana de resíduos eletroeletrônicos : uma nova fronteira a explorar no Brasil. *Brasil Mineral*, 379(1), 22–26. Retrieved from <https://www.cetem.gov.br/images/periodicos/2018/mineracao-urbana.pdf>
- Xavier, L. H., & Carvalho, T. C. (2014). Gestão de resíduos eletroeletrônicos: uma abordagem prática para a sustentabilidade. In *Campus* (Campus). Rio de Janeiro/RJ: Campus.
- Xu, L., Huo, X., Liu, Y., Zhang, Y., Qin, Q., & Xu, X. (2020). Hearing loss risk and DNA methylation signatures in preschool children following lead and cadmium exposure from an electronic waste recycling area. *Chemosphere*, 246, 125829. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125829>
- Xue, B., Chen, X., Geng, Y., Guo, X., Lu, C., Zhang, Z., & Lu, C. (2010). Survey of officials ' awareness on circular economy development in China : Based on municipal and county level. *Resources, Conservation & Recycling*, 54(12), 1296–1302. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.05.010>
- Xue, M., Yang, Y., Ruan, J., & Xu, Z. (2012). Assessment of Noise and Heavy Metals (Cr, Cu, Cd, Pb) in the Ambience of the Production Line for Recycling Waste Printed Circuit Boards. *Environmental Science Technology*, (46), 494–499. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1021/es202513b>
- Zhang, L., Qu, J., Sheng, H., Yang, J., Wu, H., & Yuan, Z. (2019). Urban mining potentials of

university : In-use and hibernating stocks of personal electronics and students ' disposal behaviors. *Resources, Conservation & Recycling*, 143(December 2018), 210–217.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.007>

Zhang, Y., Xu, X., Chen, A., Basha, C., Zheng, X., Kim, S. S., ... Huo, X. (2018). Maternal urinary cadmium levels during pregnancy associated with risk of sex-dependent birth outcomes from an e-waste pollution site in China. *Reproductive Toxicology*, 75, 49–55.

<https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2017.11.003>

Zhou, P., Guo, J., Zhou, X., Zhang, W., Liu, L., Liu, Y., & Lin, K. (2014). PM2.5, PM10 and health risk assessment of heavy metals in a typical printed circuit boards manufacturing workshop. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 26(10), 2018–2026.

<https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.08.003>