

DINÂMICA DO COMPORTAMENTO DOS E-RESÍDUOS GLOBALMENTE E O PONTO DE IMPACIÊNCIA DA SOCIEDADE

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), 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 (UNU, 2012; Baldé, Forti, Gray, Kuehr, & Stegmann, 2014, 2017) 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.

Este estudo analisa o comportamento dos e-resíduos ao longo do tempo e algumas de suas implicações para a sociedade. 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?

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.

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, 2012). No contexto brasileiro, de acordo com a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2013), estimou-se que a geração de e-resíduo em 2016 seria de 1.376,13 kilotoneladas, contudo, na apuração de Baldé *et al.* (2017), foram gerados 1.534 kilotoneladas de e-resíduo, resultando numa média de 7,4 kg/hab., de modo que a previsão foi de 11,5% 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 (Xavier & Carvalho, 2014; Lu, Liu, & Yang, 2015; Cao *et al.*, 2016; Flygansvaer, Dahlstrom, & Nygaard, 2018).

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 (Luz & Echevengua, 2015; Global Footprint Network, 2018).

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 é capaz de direcionar melhor o e-resíduo. Partindo-se da premissa de que, em qualquer instante do tempo, o volume de rejeitos¹, W , é a diferença entre o volume de tecnologia, Q , e os e-resíduos², R , ou seja, $W = Q - R$, pode-se escrever que a variação dos resíduos no tempo é dada por

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

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.

¹ Resíduos que não têm condições de recuperação (reuso, recondicionamento ou reciclagem).

² Resíduos que têm condições de recuperação (reuso, recondicionamento ou reciclagem).

Esse resultado é esperado porque tem-se na tecnologia a fonte de origem dos resíduos.

- 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. 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 modelo de malthusiano causou controvérsias sobre a forma como a população cresceria e nesse sentido Verhulst (1838) propôs uma função logística como alternativa, que pode ser adaptada à situação dos rejeitos aqui discutida. Faz sentido pensar que os rejeitos obedecem um modelo expresso por

$$\frac{dW}{dt} = \beta W \left(1 - \frac{W}{W_m}\right) \quad (2)$$

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 (2), é dada por:

$$W(t) = \frac{W_m}{\left[\left(\frac{W_m}{W_0} - 1\right)e^{-\beta t} + 1\right]} \quad (3)$$

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 pequena³ 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 (3) 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 (3), o

³ O alto índice de toxicidade pode provocar medidas que limitem ou suspendam a produção de determinados produtos.

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. 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 considerando 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.

Por último, observa-se que o modelo logístico de Verhulst pode, alternativamente, determinar o tempo dessa tolerância, conhecidas as duas outras variáveis, ou, provavelmente, o que é mais interessante, determinar o volume máximo 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.

Nitidamente, o crescimento da tecnologia causa problemas porque gera resíduos, que geram rejeitos, e estes causam danos ao meio ambiente e à saúde da população. O processo produtivo tradicional de produção-consumo-descarte, chamado de Economia Linear, criticado por Leonard (2018), 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).

O que se espera é que o crescimento da tecnologia esteja dentro de padrões que respeitem a sustentabilidade.

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) como rejeitos, cujo destino final é retornar ao meio ambiente como *input* prejudicial.

Nessa tônica, surgem os estudos em torno dos resíduos sólidos de forma abrangente, como as pesquisas de Power e Chertow (2018) e Vieira, Silva, Pedro Filho, Madeira, & 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 toneladas⁴ de e-resíduos no mundo, de acordo com a Figura 1. 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

⁴ Esse volume de e-resíduo corresponde ao equivalente, em peso, a 4.500 torres Eiffel.

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.

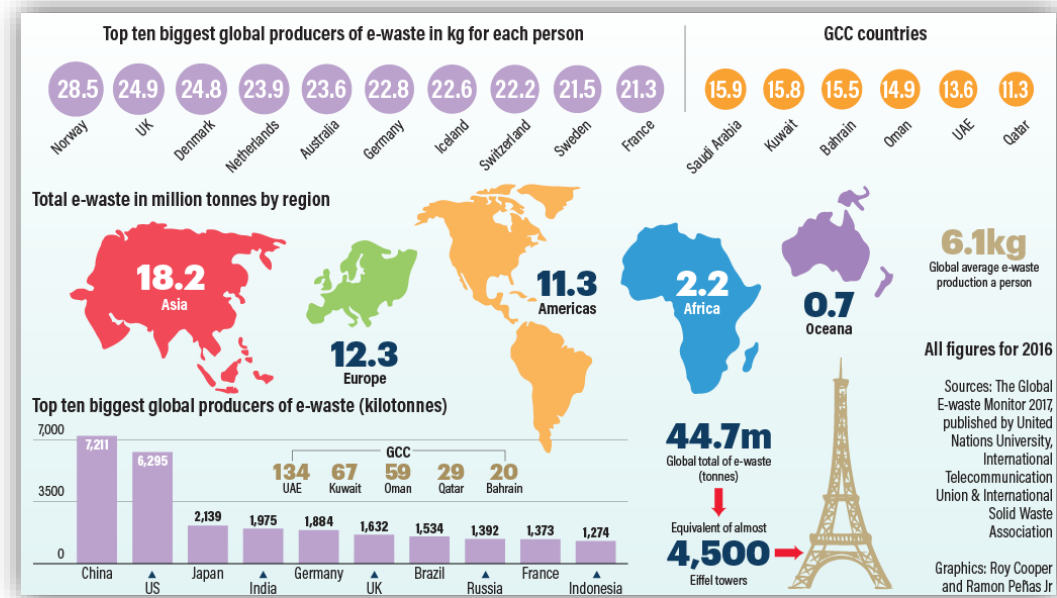


Figura 1 – Resumo do relatório de geração de e-resíduo em 2016 no mundo.
Fonte: Baldé *et al.* (2017).

Destaca-se na Figura 2, 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 (Xavier & Carvalho, 2014; Person, 2015; Baldé *et al.*, 2017; Forti, Baldé, & Kuehr, 2018).

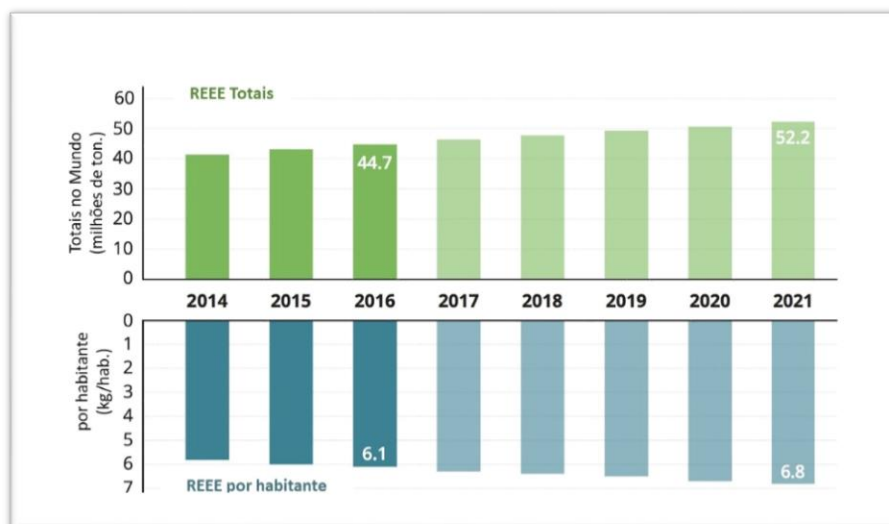


Figura 2 – e-resíduo global gerado e estimativas até 2021.
Fonte: Baldé *et al.* (2017). Tradução livre.

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 Material e método

Nesta seção, de forma alternativa e mais condizente com os dados disponíveis na base de dados da Eurostat⁵ (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:

$$W_t = Q_t - R_t \quad (4)$$

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 (4) considera $R_t = \alpha Q_t$, ou seja, o volume de resíduo destinado à recuperação é uma fração⁶ 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 (4), após manipulações algébricas elementares, pode ser reescrita como

$$Q_t = \left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right) Q_{t-1} \quad (4.1)$$

cuja solução é dada por

$$Q_t = \left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right)^t Q_0 \quad (4.2)$$

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

$$W_{t+1} = \beta \left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right)^t Q_0 \quad (4.3)$$

Decorre da equação (4.3) que o comportamento do volume de rejeitos dependerá das relações entre os coeficientes α e β , de acordo com os cenários propostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Cenários decorrentes das possíveis relações entre os coeficientes α e β

Hipótese	Relação entre α e β	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 (4.2) pode ser avaliado empiricamente, bastando para isso usar modelos de regressão log-linear, cujos resultados serão discutidos na seção 4, sendo escrito como:

$$\ln Q_t = \ln Q_0 + \ln \left(\frac{\beta}{1-\alpha}\right) t = \beta_0 + \beta_1 t \quad (4.4)$$

⁵ 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.

⁶ Define-se $0 < \alpha < 1$ e $0 < \beta < 1$

Os resultados do uso do modelo empírico 4.4 decorrem da análise inferencial dos dados da Eurostat relacionados aos e-resíduos, os quais estão dispostos e organizados conforme a Figura 3, por país-membro da União Europeia e por ano.

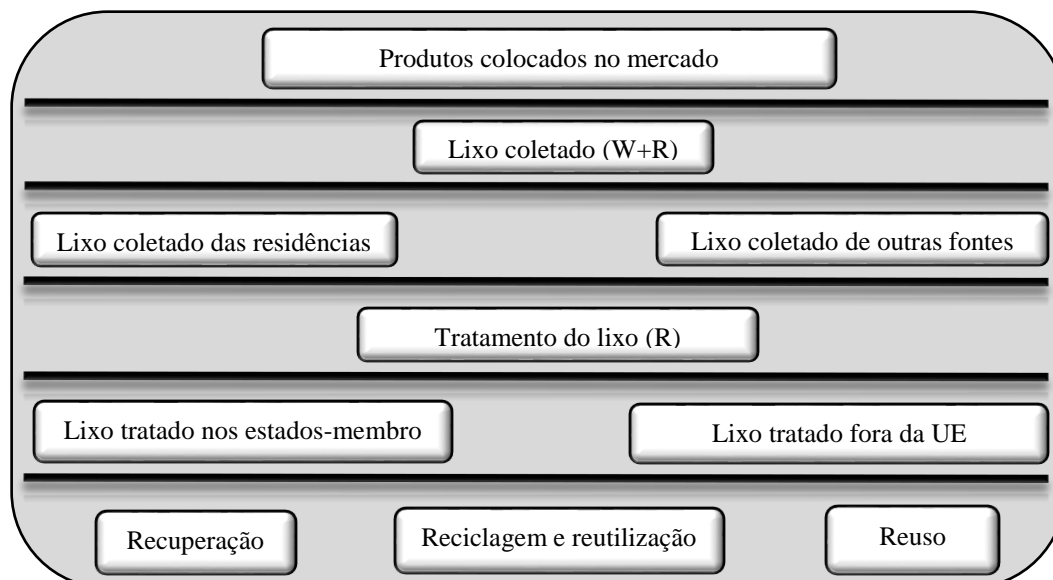


Figura 3 – Disposição e organização dos dados da Eurostat (2020).

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 Brexit⁷; 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 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. A forma de contornar essa questão foi trabalhar com a soma das variáveis produzidas por ano e usar o logaritmo 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-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).

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

⁷ 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*.

geração de resíduos (W+R), bem como seus desdobramentos registrados na base de dados da Eurostat.

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
Amostra inicial	31	13	365	365
				730
(-) Países com dados incompletos no período pesquisado (2005 a 2017)	20	13	222	222
				444
Amostra final	11	13	143	143
				286

Fonte: Dados da pesquisa.

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.

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 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.

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.

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
	Tecnologia (UE)	Constante	14,18147	0,03678	385,5627
Tempo		0,021056	0,00463	4,54389	0,00083
		R² = 0,6524	F_(1,11) = 20,64698**		
e-resíduo (Holanda)	Variável	Coefficientes	Erro padrão	Estatística t	p-valor
	Constante	11,36684	0,034237	331,9999	0,00000
	Tempo	0,048326	0,004314	11,2034	0,00000
		R² = 0,9194	F_(1,11) = 125,51627**		
e-resíduo (UE)	Variável	Coefficientes	Erro padrão	Estatística t	p-valor
	Constante	13,15725	0,09206	142,9167	0,00000
	Tempo	0,052819	0,01159	4,55384	0,00082
		R² = 0,6534	F_(1,11) = 20,73749**		

** Significativo a 1%.

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir da identificação dos coeficientes da equação 4.2 e 4.3, feitos a partir do modelo econométrico descrito na equação 4.4, 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.

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 compra⁸, 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 representa uma busca mais frequente por mudanças tecnológicas (obsolescência funcional⁹). 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.

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 4.

Os produtos eletroeletrônicos colocados no mercado 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.

⁸ *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).

⁹ Substituição de um bem ainda funcional por outro, em função de seu avanço tecnológico.

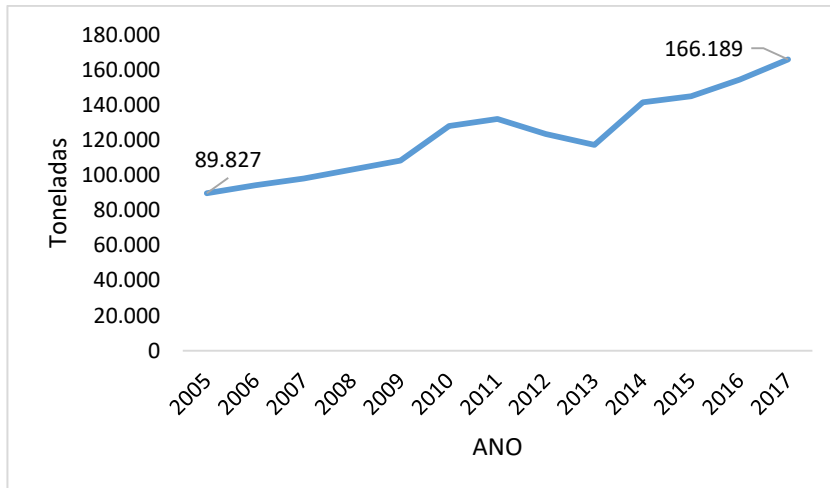


Figura 4 – Coleta de e-resíduo na Holanda ao longo do tempo.
Fonte: Eurostat (2020).

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 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.

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.

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 UNU (2012), 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 5.

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.* (2014) 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.

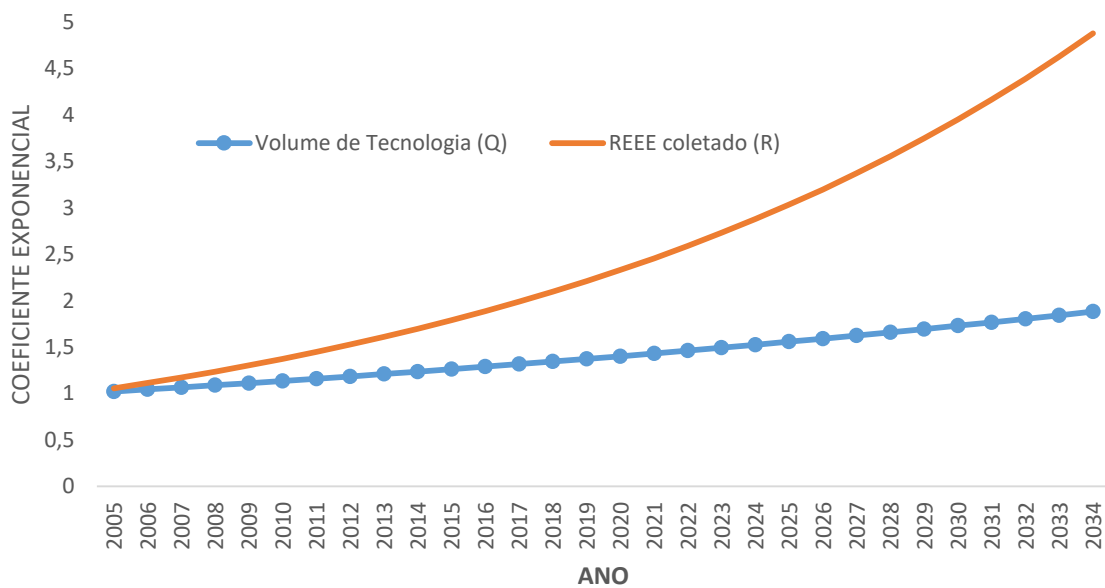


Figura 5 - Projeções de crescimento (tecnologia *versus* e-resíduo coletado) no tempo.

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.

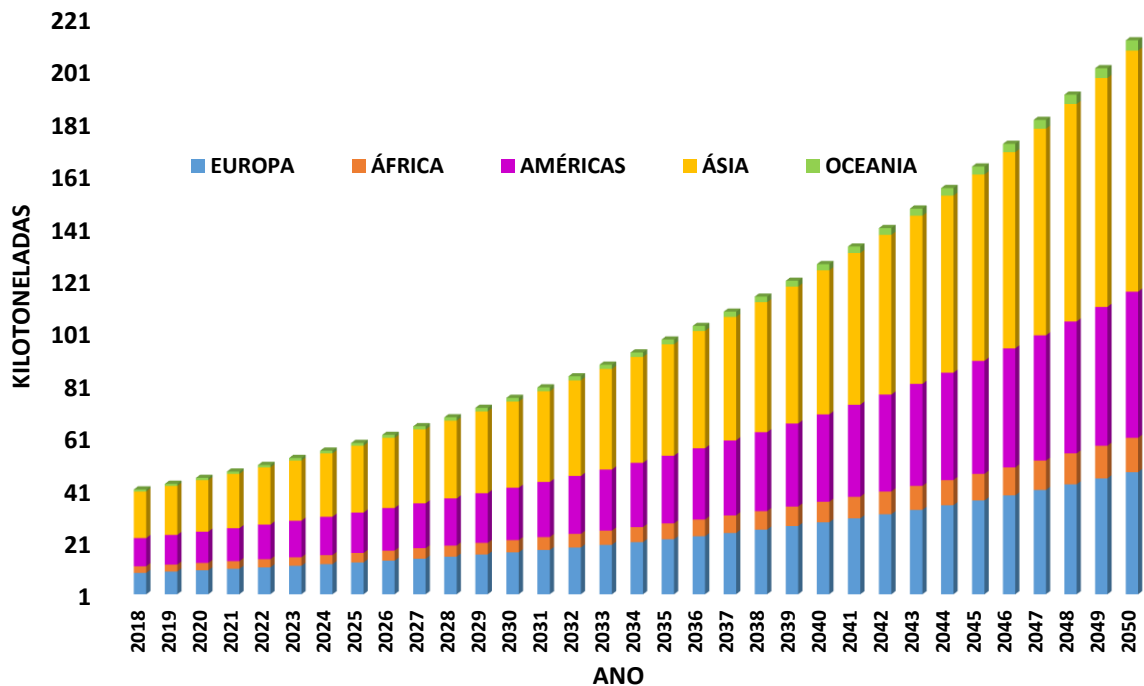


Figura 6 - Projeções de crescimento dos e-resíduos não coletados/tratados (W) em escala global no tempo.

Fonte: Dados da pesquisa.

A projeção do comportamento de crescimento desse e-resíduo não coletado/tratado pode ser observada na Figura 6, 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 (Xavier & Carvalho, 2014; Person, 2015; Baldé *et al.*, 2017; Forti *et al.*, 2018), 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 7.

Os e-resíduos são decorrentes de fatores naturais, 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.

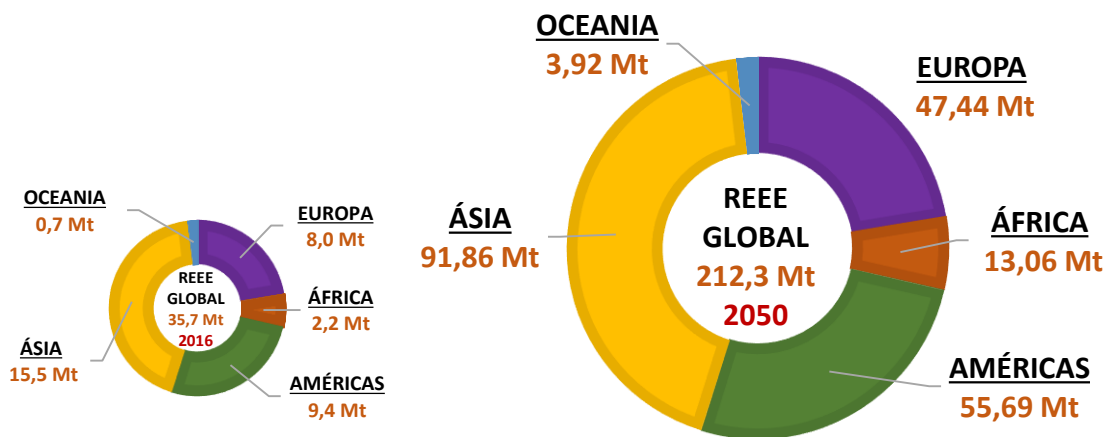


Figura 7 – Comparação entre cenários de e-resíduo gerado e não coletado/tratado em escala global (2016 e o projetado em 2050).

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.

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.

Conclusão

Visivelmente o processo produtivo baseado na Economia Linear, associado à aceleração tecnológica e ao comportamento consumista da sociedade, tem levado à geração 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 e exigirá medidas corretivas e políticas públicas e empresariais 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 e 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.

Referências

- Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. (2013). *Logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos: análise da viabilidade técnica e econômica*. Brasília: ABDI-INVENTTA.
- Almeida, L. M. W., & Oliveira, C. S. (2015). Modelos de crescimento populacional: um olhar à luz de uma socioepistemologia. *UNIÓN – Revista Iberoamericana de Educación Matemática*. n. 41. Março. pp. 107-133. Recuperado de <http://www.fisem.org/www/union/revistas/2015/41/Artigo6.pdf>.
- Baldé, C.P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2014). *The Global E-waste Monitor – 2017: Quantities, Flows, and Resources*. UNU, IAS – SCYCLE, Bonn, Germany.
- Baldé, C.P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). *The Global E-waste Monitor – 2017: Quantities, Flows, and Resources*. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn, Geneva, Vienna.

- Brayner, F. (2019). *Desafios da economia circular*. (Palestra). In: FIEPE AMBIENTAL. Federação das Indústrias de Pernambuco – FIEPE. Recife/PE, 06 jun.
- 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. *J. Clea. Prod.* v. 127. pp. 311-324.
- Eurostat. (2019). Escritório de Estatística da União Europeia. Recuperado de <https://ec.europa.eu/eurostat>.
- Eurostat. (2020). Escritório de Estatística da União Europeia. Recuperado de https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_waselee&lang=en
- Faro, O. E., Calia, R. C., & Pavan, V. H. G. (2012). 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*. São Paulo, v. 6, n. 3, p. 142-153, set./dez.
- Flygansvaer, B., Dahlstrom, R., & Nygaard, A. (2018). Exploring the pursuit of sustainability in reverse supply chains for electronics. *J. Clea. Prod.* v. 189. pp. 472-484.
- Forti, V., Baldé, C.P., & Kuehr, R. (2018). E-waste statistics: guidelines on classifications, reporting and indicators. 2th edition. UNU, ViE – SCYCLE, Bonn, Germany.
- Global Footprint Network. (2018). *The Ecological Footprint is a fair metric for Slovenia to achieve its climate goals*. Recuperado de <https://www.footprintnetwork.org/2018/09/25/ecological-footprint-is-a-fair-metric-for-slovenia-to-achieve-its-climate-goals/>.
- Lebow, V. (1955). Price competition in 1955. *Journal of Retailing*. Spring.
- Leonard, A. (2018). *Story of Stuff, Referenced and Annotated Script*. Recuperado de http://s.bsd.net/stuff/default/page/Downloads/MovieScripts/SoStuff_Annotated_Script.pdf.
- Lu, B., Liu, J., Yang, J., & Li, B. (2015). The environmental impact of technology innovation on WEEE management by Multi-Life Cycle Assessment. *J. Clea. Prod.* v. 89. pp. 148-158.
- Luz, B., & Echevengua, C. (2015). *Gestão Empresarial para a Sustentabilidade em tempos de Mudanças Climáticas*. São Paulo: Manole.
- Moore, G. E. (1965). Cramming more components on to integrated circuits. *Electronics*. v. 38, n. 8, April 19.
- Person, O. *What is circular economy? – The discourse of circular economy in the Swedish public sector*. Master Thesis in Sustainable Development. Uppsala University. Uppsala, Swedish, 2015.
- Power, J. T., & Chertow, M. R. (2018). Quantity, components, and value of waste materials landfilled in the United States. *Journal of Industrial Ecology*. v.0. n. 0. pp. 1-14.
- Ricklefs, R. E. (2010). *The Economy of Nature*. 6th ed. USA: Guanabara Koogan.
- Statistics Netherlands, CBS. (2020). *Population dynamics; month and year*. Recuperado de <https://www.cbs.nl/en-gb/figures/detail/83474ENG>.
- Tavoni, R., & Oliveira, R. Z. G. (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*, Bauru, v. 2, n. 2, p. 86-99, dez. Recuperado de <http://www2.fc.unesp.br/revistacqd/index.jsp>.
- United Nations University. (2012). *StEP – Solving the E-waste Problem*. Annual Report 2012/2013. Washington D.C., UNU-ISP.
- Verhulst, P. F. (1838). Noticesurlaloi que La population suitdansso naccroissement. *Correspondance Mathématique et Physique*, 10, 113-121.
- Vieira, N. M. C., Silva, M. J. P. G, Pedro Filho, F. S., Madeira, M. J. A., & 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*. v. 44, n. 1, feb.
- Xavier, L. H., & Carvalho, T. C. (2014). *Gestão de resíduos eletroeletrônicos: uma abordagem prática para a sustentabilidade*. Rio de Janeiro: Campus.