



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO - CTC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Rafaela Francisca Moreira Barbosa

**MÉTRICAS PARA ECONOMIA CIRCULAR: UMA PROPOSTA DE INDICADOR
DE CIRCULARIDADE PARA MATERIAIS PLÁSTICOS**

Florianópolis
2023

Rafaela Francisca Moreira Barbosa

**MÉTRICAS PARA ECONOMIA CIRCULAR: UMA PROPOSTA DE INDICADOR
DE CIRCULARIDADE PARA MATERIAIS PLÁSTICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Engenharia de Produção.

Orientador(a): Prof.(a), Lucila Maria de Souza Campos, Dr.(a)
Coorientador Prof. Miguel Afonso Sellitto, Dr.

Florianópolis

2023

Barbosa, Rafaela Francisca Moreira

Indicadores Relacionados à Economia Circular : Uma Proposta de Indicador para Circularidade do Plástico / Rafaela Francisca Moreira Barbosa ; orientadora, Lucila Maria de Souza Campos, coorientador, Miguel Afonso Sellitto, 2023.

83 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Economia Circular. 3. Resíduo Sólido Plástico. 4. Índice de Circularidade. I. Campos, Lucila Maria de Souza. II. Sellitto, Miguel Afonso . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. IV. Título.

Rafaela Francisca Moreira Barbosa

**MÉTRICAS PARA ECONOMIA CIRCULAR: UMA PROPOSTA DE INDICADOR
DE CIRCULARIDADE PARA MATERIAIS PLÁSTICOS**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 30 de novembro de 2023 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Lucila Maria de Souza Campos, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Marina Ilka Baumer Cardoso, Dr. (a)
Membro Externo

Prof.(a) Juliana Veiga Mendes, Dr.(a)
Membro Externo

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestra em Engenharia de Produção.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Profa. Lucila Maria de Souza Campos, Dra.
Orientadora

Florianópolis, 2023

Dedico este trabalho aos meus pais, amigos de pós-graduação e ao meu
noivo.

“A educação, quando bem compreendida, é a chave para o progresso.”

Chico Xavier

RESUMO

A Economia Circular (EC) é uma abordagem focalizada na otimização da utilização e reutilização de recursos, ao mesmo tempo que visa minimizar o desperdício e mitigar os impactos ambientais. Neste contexto, a avaliação de práticas sustentáveis desempenha um papel de suma importância, uma vez que a complexidade inerente à economia circular exige o desenvolvimento de métricas inovadoras que considerem as propriedades distintas dos materiais, as variáveis ambientais e econômicas, e a necessidade de personalização em consonância com as circunstâncias específicas. É notório que a Economia Circular assume uma relevância ímpar, particularmente no âmbito dos materiais plásticos, dada a sua onipresença e os desafios ambientais que lhes estão associados. O aumento da conscientização sobre a poluição plástica e os impactos ambientais intensifica a urgência de avaliar a eficácia das estratégias destinadas à reutilização, reciclagem e à minimização do desperdício. Neste contexto, a presente dissertação aborda a crescente importância da Economia Circular na gestão de materiais plásticos, reconhecendo a necessidade premente de avaliar a circularidade desses materiais. Isso se concretiza por meio da proposição de um Indicador de Economia Circular (IEC) concebido para avaliar, de forma eficaz, a circularidade dos materiais plásticos, tirando partido de indicadores já existentes na literatura. Para tal, foi conduzido um abrangente levantamento bibliográfico, visando a identificação de indicadores já existentes na literatura que fossem relevantes para a avaliação da circularidade. Dentre os 53 indicadores catalogados, foram minuciosamente selecionados 11 que se mostraram particularmente aplicáveis na análise da circularidade de materiais, com um foco especial nos materiais plásticos. Essa seleção foi baseada em seis critérios fundamentais, a saber: recirculação, reutilização, reciclagem, redução, eficiência energética e substâncias perigosas, todos intimamente relacionados com as propriedades e características intrínsecas dos materiais plásticos. Os indicadores foram meticulosamente correlacionados com esses critérios por meio da aplicação do Diagrama de Venn, estabelecendo, assim, uma base sólida para a concepção do novo indicador. O IEC_T proposto sintetiza e harmoniza conceitos e métricas provenientes dos indicadores CEPI (*Circular Economy Performance Indicator*), do RDI (*Resource Duration Indicator*) e do RPI (*Reuse Potential Indicator*), configurando, assim, uma abordagem adaptável e personalizável, especialmente concebida para os materiais plásticos. Isso possibilita que o indicador se ajuste com precisão aos materiais plásticos, considerando, de maneira abrangente, os fatores ambientais e econômicos inerentes a essa classe de materiais.

Palavras-chave: Economia Circular; Resíduo Sólido Plástico; Materiais Plásticos; Indicador de Circularidade; Diagrama de Venn.

ABSTRACT

Circular Economy (CE) is an approach focused on optimizing the utilization and reutilization of resources, while simultaneously aiming to minimize waste and mitigate environmental impacts. In this context, the assessment of sustainable practices plays a paramount role, as the inherent complexity of the circular economy necessitates the development of innovative metrics that take into account the distinct properties of materials, environmental and economic variables, and the need for customization in accordance with specific circumstances. It is evident that Circular Economy assumes unique relevance, particularly in the realm of plastic materials, given their ubiquity and the associated environmental challenges. The increasing awareness of plastic pollution and environmental impacts heightens the urgency of evaluating the effectiveness of strategies for reutilization, recycling, and waste minimization. In this context, this dissertation addresses the growing importance of Circular Economy in the management of plastic materials, recognizing the pressing need to assess the circularity of these materials. This is realized through the proposal of a Circular Economy Indicator (CEI) designed to effectively evaluate the circularity of plastic materials, leveraging existing indicators in the literature. To achieve this, an extensive bibliographic survey was conducted to identify indicators already present in the literature that were relevant to circularity assessment. Out of the 53 indicators identified, 11 were meticulously selected as particularly applicable for the analysis of material circularity, with a special focus on plastic materials. This selection was based on six fundamental criteria, namely: recirculation, reutilization, recycling, reduction, energy efficiency, and hazardous substances, all intimately linked to the intrinsic properties and characteristics of plastic materials. The indicators were rigorously correlated with these criteria through the application of the Venn Diagram, thus establishing a solid foundation for the design of the new indicator. The proposed Theoretical Circular Economy Indicator (CEI_T) synthesizes and harmonizes concepts and metrics from the CEPI (Circular Economy Performance Indicator), RDI (Resource Duration Indicator), and RPI (Reuse Potential Indicator) indicators, thereby forming an adaptable and customizable approach, specifically tailored for plastic materials. This enables the indicator to precisely adapt to the complexities of plastic materials, comprehensively considering the environmental and economic factors inherent to this material class.

Keywords: Circular Economy; Solid Plastic Waste; Plastics Materials; Circularity Indicator; Venn Diagram.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demanda global de plásticos por setor.....	14
Figura 2 - Participação no mercado global.....	23
Figura 3 - Relação entre polímero, biopolímero, plásticos e bioplásticos.....	30
Figura 4 - Cadeia de contaminação por meio de resíduos plásticos.....	35
Figura 5 - Diagrama da Borboleta (ciclo técnico x ciclo biológico).....	39
Figura 6 – Quantidade de publicações ao longo dos anos.....	48
Figura 7 – Etapas da Pesquisa.....	50
Figura 8 – Fase I da Pesquisa.....	52
Figura 9 - Lista de indicadores de circularidade encontrados (IEC_L).....	54
Figura 10 -- Modelo de avaliação de para construção de Indicadores de Circularidade.....	58
Figura 11 - Gráfico Venn para critérios de avaliação de IEC_L.....	65
Figura12 - Representação do Indicador de Reuso (RPI).....	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Percentual de produção de polímero no Brasil (2021)	23
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Polímeros e submateriais	25
Tabela 2 - Principais características de termoplásticos da indústria de embalagens	26
Tabela 3 - Aditivos e impactos	31
Tabela 4 - IEC_L mapeados.....	42
Tabela 5 - Características, vantagens e desvantagens dos IEC_L	45
Tabela 6 - Matriz de critérios x IEC_L	52
Tabela 7 - Matriz de priorização de critérios.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
BSI	The British Standards Institution
EC	Economia Circular
CE	Contaminantes Emergentes
CEIP	<i>Circular Economy Indicator Prototype</i>
CET	<i>Circular Economy Toolkit</i>
CLC	<i>Closed the Loop Indicator</i>
CR	Neopreno
C2C	<i>Material Reutilization Part</i>
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
IEC	Indicador de Economia Circular
IPEN	<i>International Polutants Elimination Network</i>
NBR	Butadieno Estireno
OMS	Organização Mundial da Saúde
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PET	Polietileno Tereftalato
PHA	Polihidroxialcanoato
PHB	Polihidroxibutirato
PHV	Polihidroxivalerato
PLA	Poliácido láctico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
POP	<i>Persistent Organic Polutants</i>
PS	Poliestireno
PUR	Poliuretano
PVC	Policloreto de Vinila
PP	Polipropileno
POP	<i>Persistent Organic Polutant</i>
RDI	<i>Resource Duration Indicator</i>
RPI	<i>Reuse Potential Indicator</i>
RR	<i>Recycling Rates</i>
UE	União Europeia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	18
1.1.1 <i>Objetivo geral</i>	18
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	18
1.2 JUSTIFICATIVA	18
1.3 DELIMITAÇÃO	19
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1 MATERIAIS PLÁSTICOS	21
2.1.1 <i>Características e utilização</i>	23
2.1.2 <i>Cadeia de contaminação de materiais plásticos</i>	29
2.2 A ECONOMIA CIRCULAR	32
2.2.1 <i>Associação da economia circular com os materiais plásticos</i>	36
2.2.2 <i>Revisão sistemática da literatura (RSL) sobre indicadores de Economia Circular</i>	38
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	46
3 DELINEAMENTO DA PESQUISA E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	48
3.1 FASE I – ANÁLISE DA LITERATURA.....	49
3.2 FASE II E III - INDICADORES DE ECONOMIA CIRCULAR.....	51
3.2.1 <i>Crítérios e parâmetros de Indicadores de Economia Circular da Literatura (IEC_L) voltados para materiais plásticos</i>	51
3.2.2 <i>Construção do modelo para Indicador de Circularidade Proposto (IEC_T).....</i>	54
4.1 SELEÇÃO DE IEC_L PARA CONSTRUÇÃO DO INDICADOR DE CIRCULARIDADE TEÓRICO (IEC_T)	56
4.1.1 <i>Matriz de priorização de critérios para avaliação de IEC_L aplicados a materiais plásticos</i>	56
4.1.2 <i>Avaliação dos critérios por meio do Gráfico de Venn.....</i>	58
4.2 INDICADOR DE CIRCULARIDADE TEÓRICO PARA MATERIAIS PLÁSTICOS (IEC_T)	60
4.2.1 <i>Circular Economy Performance Indicator (CEPI)</i>	61
4.2.2 <i>Resource Duration Indicator (RDI)</i>	62
4.2.3 <i>Reuse Potential Indicator (RPI).....</i>	64
4.3 FORMULAÇÃO PARA O INDICADOR DE ECONOMIA CIRCULAR TEÓRICO COM BASE NOS INDICADORES SELECIONADOS.....	66

4.4 CONTEXTO E EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO INDICADOR DE ECONOMIA CIRCULAR TEÓRICO	68
4.5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	72
5 CONCLUSÃO	77
REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

A partir da década de 1970, foi evidenciada uma crescente preocupação em relação aos detritos de materiais plásticos nos oceanos. No ano de 1972, a Assembleia das Nações Unidas para o Meio Ambiente reconheceu oficialmente que a disseminação de materiais plásticos representava uma série ameaça para o meio ambiente, e posteriormente aos seres humanos, com estimativa de danos de até US\$13 bilhões (Wang *et al.*, 2016).

A grande quantidade de resíduo plástico gerada anualmente causa danos ambientais em diversas esferas. Nessa linha, existem estudos que defendem a classificação do plástico como resíduo perigoso em função de seu próprio potencial tóxico e de sua alta capacidade de adsorver poluentes (Rochman *et al.*, 2013). O estudo das características desses materiais, assim como o seu potencial de impacto, são cruciais para fornecer aos tomadores de decisão a busca de ações mitigadoras (Senathirajah *et al.*, 2022).

No entanto, somente em 2014 houve o consenso internacional para a adoção de resoluções que resultaram na criação de uma estrutura de governança global para abordar a problemática dos materiais plásticos dispostos incorretamente no ambiente (Hartmann *et al.*, 2020). No Brasil, o consumo aparente de plástico foi de 6,99 milhões de toneladas em 2015 (Abiplast, 2016) e sua quantidade de plástico pós-consumo descartado em 2012 foi de 3 milhões de toneladas e, desse total, apenas 5% foi reciclado (Abiplast, 2016). Porém, essa não é apenas uma realidade brasileira, estima-se que apenas 1% do plástico produzido mundialmente é reciclado (Parchomenko, 2018).

A comunidade internacional tem buscado formas de transição de uma economia linear para um paradigma de economia circular, que se fundamenta na recuperação e valorização de resíduos, reintegrando-os à cadeia de produção (Elia *et al.*, 2017). A reintrodução de resíduos no processo produtivo caracteriza a economia circular como um sistema restaurador e regenerativo (Jabbour *et al.*, 2019). A premissa da restauração e regeneração implica a necessidade de alterações na estrutura de projeto de produtos e nos processos de produção (Esposito *et al.*, 2018; Hopkison *et al.*, 2018).

A transição para a economia circular introduz uma complexidade adicional na gestão de materiais, especialmente nas estruturas intrincadas de produção de bens destinados ao consumidor final. Este novo paradigma demanda uma abordagem mais

cuidadosa e integrada, considerando não apenas a eficiência econômica, mas também os aspectos ambientais e sociais ao longo de todo o ciclo de vida do produto. Para lidar com externalidades negativas de um modelo de consumo linear (produzir-consumir-descartar), a economia circular (EC) surge como uma forma de superar as limitações da economia linear conciliando os anseios pelo desenvolvimento econômico e a proteção ambiental (Lieder; Asif; Rashid, 2017).

A EC estimula a utilização de recursos por um período maior (e menor desperdício) e tem potencial de criar economias mais resilientes e um ambiente mais saudável, além de combater mudanças climáticas e ressignificar a geração e disposição de resíduos (BSI, 2017). O conceito de EC tem origem em diversas outras bases teóricas como economia ecológica, economia ambiental e ecologia industrial (Ghisellini *et al.*, 2016). Segundo a Ellen MacArthur Foundation (2013), a EC é definida como um sistema restaurador e/ou regenerativo por intenção e design. E a inclusão do tema resíduos no design de produtos e processos permite fechar o ciclo de materiais, aumentando o seu reaproveitamento, enquanto minimiza o uso da matéria prima virgem e a poluição ambiental (Ghisellini *et al.*, 2016).

Através de estratégias circulares, pode-se obter recursos locais a partir de materiais e produtos pós-consumo (Geng *et al.*, 2020). Para tal, é preciso entender onde, quando e como esses materiais, e as tecnologias em que estão incorporados, podem ser reutilizados e/ou recuperados, de forma a propiciar um sistema de utilização de material crítico em circuito fechado e, conseqüentemente, garantir o funcionamento contínuo da infraestrutura básica (Busch *et al.*, 2014).

Dessa forma, a EC surgiu como estratégia necessária para mitigar os problemas acima relacionados ao foco dessa pesquisa que são os materiais plásticos. Com a inserção dos conceitos de EC na cadeia de materiais plásticos, foram adotadas medidas legais e até regulamentações, como exemplo, a regulamentação da União Europeia sobre a restrição ao uso de plásticos que teve início no final da década de 1960 persistindo até os dias atuais. Ainda, a Estratégia Europeia para os Plásticos foi divulgada, com uma nova diretiva em fase de preparação para proibir produtos plásticos de uso único, incluindo utensílios descartáveis e talheres.

Abordagens estratégicas para lidar com os plásticos, como aquelas promovidas pela Fundação Ellen MacArthur, têm sido implementadas para auxiliar empresas e consumidores europeus na adoção de práticas mais sustentáveis. A Fundação Ellen MacArthur lançou uma série de relatórios explorando as implicações ambientais dos plásticos e estratégias econômicas para lidar com eles, como "*The New Plastics Economy*:"

Rethinking the Future of Plastics and Catalysing Action", lançado em dezembro de 2017 (EMF, 2017).

Este estudo será direcionado ao resíduo plástico devido sua presença ser considerada como a principal fonte de poluição por descarte inadequado de resíduos gerados no mundo (Ludwig; Hellweg; Stuck, 2003). A composição do resíduo sólido urbano reflete os padrões de consumo, hábitos alimentares, estrutura social e outros aspectos de uma sociedade. No caso do plástico, o surgimento de novas tecnologias que visam atender novas demandas de consumo que surgem a cada dia é um dos principais fatores para o crescimento da produção mundial. Somente no ano de 2010, 265 milhões de toneladas de plástico foram produzidas para atender as necessidades mundiais (Plastics Europe, 2011).

A grande quantidade de resíduo plástico gerada anualmente causa danos ambientais em diversas esferas tanto no ecossistema marinho quanto no terrestre. Por esta vertente, existem estudos que defendem a classificação do resíduo plástico como resíduo perigoso em função de seu próprio potencial tóxico e de sua alta capacidade de adsorver poluentes (Rochman *et al.*, 2013). No ambiente marinho, o maior volume de resíduo plástico é composto por macro fragmentos, entretanto, em quantidade, o tamanho dominante é o de micro plásticos. Os micros plásticos são partículas menores que 5 mm e por serem microscópicas podem facilmente se instalar em diferentes ecossistemas causando desequilíbrio ambiental.

Nesse sentido, a economia circular é uma ferramenta que, estando alinhada ao entendimento dos impactos que esses resíduos podem causar, proporciona uma visão mais assertiva a respeito da problemática. Neste contexto, o uso de indicadores para medir o nível de circularidade dos materiais é um tema que merece ser explorado. Uma circularidade perfeita dos materiais é considerada impossível em função da entropia e dissipação energética (Cullen, 2017). Entretanto, este é um ideal teórico que pode potencializar o uso de recursos e ser usado como referencial para ações em direção à desejada sustentabilidade (Cullen, 2017).

Diante desse cenário, o presente trabalho busca contribuir com a identificação de indicadores de circularidade ideais para avaliar a problemática dos materiais plásticos de modo a facilitar a sua compreensão para a tomada de decisões mais assertivas de recuperação. Com isso, considerando a EC como propulsora de um sistema econômico sustentável e que está sendo adotada por diversos países, a pergunta de pesquisa que norteia esse trabalho é: "Baseando-se em indicadores de economia circular já existentes, qual seria um indicador mais adequado para mensurar e classificar os tipos de plásticos quanto à sua circularidade?".

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

A seguir serão indicados o objetivo geral e os objetivos específicos que irão nortear o estudo, tendo em vista as considerações anteriormente apresentadas.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente estudo é propor um Indicador de Economia Circular Teórico que avalie a circularidade de materiais plásticos com base em indicadores existentes.

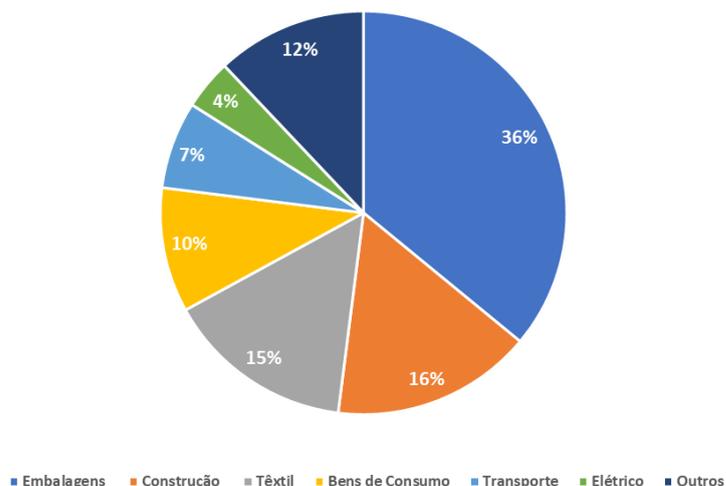
1.1.2 Objetivos específicos

- a) Identificar a partir da literatura os indicadores de economia circular aplicados a materiais;
- b) Analisar, a partir do estabelecimento de critérios aplicáveis a plásticos, os indicadores e métricas dos Indicadores de Economia Circular da literatura que possam ser aplicados ao Indicador de Economia Circular Teórico proposto;
- c) Definir as métricas do Indicador de Economia Circular Teórico a serem utilizadas na avaliação dos plásticos.

1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com a Plastic Europe (2018), a produção de materiais plásticos saltou de 1,5 milhões de toneladas em 1950 para 348 milhões de toneladas no ano de 2017. O maior produtor mundial de plásticos foi a Ásia, gerando 174,34 milhões de toneladas, seguido do continente europeu com 64,8 milhões e a América Latina com 61,5 milhões de toneladas produzidas no ano de 2017 (Plastics Europe, 2018). Apesar de ter sido facilmente difundido em meados da década de 60 até os tempos atuais, em menos de um século após sua difusão, o resíduo proveniente do processo de fabricação do plástico até o resíduo pós consumo tornaram-se um problema social e ambiental. Com o aumento da capacidade de produção, juntamente com uma compreensão crescente da sua versatilidade no que diz respeito ao consumo, os plásticos ganharam setores cada vez mais complexos sendo o setor de embalagens o que possui maior demanda global por esses materiais conforme Figura 1.

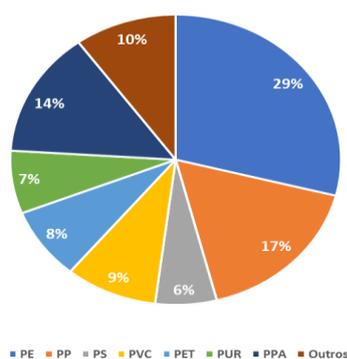
Figura 1 - Demanda global de plásticos por setor



Fonte: Adaptado de Geyer et al., 2016

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST), no ano de 2020 foram produzidas um total de 367 milhões de toneladas de resinas plásticas no mundo, sendo que cerca de 2% desse total foi produzido no Brasil (Abiplast, 2021). Existem centenas de tipos diferentes de plásticos e misturas de polímeros em produção, mas o mercado atual é denominado pelo Polietileno (tanto o de alta densidade quanto o de baixa densidade, polipropileno (PP), poli cloreto de vinila (PVC), poliuretano (PUR), poliestireno (PS) e polietileno tereftalato (PET) conforme Figura 2. Esses seis tipos de materiais compõem cerca de 80% de toda produção global além de serem os materiais mais encontrados na forma de resíduo nos oceanos (Gesamp, 2020).

Figura 2 - Participação no mercado global



Fonte: Adaptado de Geyer et al., 2017

Por serem materiais versáteis, o uso generalizado de materiais plásticos coloca desafios significativos para a sustentabilidade dos recursos naturais, uma vez que os plásticos advêm da indústria petroquímica. Concomitantemente, pode-se concluir que o aumento da produção global de plásticos aumenta junto ao crescimento populacional e conseqüentemente evidencia que a produção e consumo continuarão crescendo, se nada for feito para conter esse crescimento (Andrady, 2017). O Quadro 1 apresenta o percentual de produção de materiais plásticos mais consumidos no Brasil em 2021.

Quadro 1 - Percentual de produção de polímero no Brasil (2022)

<u>Tipo de Polímero</u>	<u>% de produção</u>
PP	20,1%
PVC	14,9%
PEAD	12,5%
PET	12,3%
PELBD	8,0%
PEBD	8,0%
PS	7,5%
EPS	2,4%
<u>Outros</u>	<u>13,8%</u>

Fonte: ABIPLAST (2022)

O PP (Polipropileno) ocupa o primeiro lugar de produção no Brasil de acordo com o quadro exposto acima apesar de ser o segundo maior em nível global. O segundo lugar é ocupado pelo Policloreto de Vinilo (PVC) e, em terceiro, pelo Polietileno de Alta Densidade (PEAD) seguido do Polietileno de Baixa Densidade (PEBDL). Cerca de 4 a 8% do total de petróleo extraído são destinados para a fabricação de pellets (Abiplast, 2022). Por serem versáteis, o uso generalizado de materiais plásticos coloca desafios significativos para a sustentabilidade dos recursos naturais uma vez que os plásticos advêm da indústria petroquímica.

De acordo com os fatos expostos sobre a problemática que advém dos materiais plásticos, é possível salientar que a Economia Circular (EC) surge como potencial modelo que pode ser capaz de diminuir o nível de resíduos plásticos que são descartados na natureza. Na EC, ao invés do descarte final após utilização, pode haver a possibilidade de, por exemplo, reparação, reutilização, retomo ou reciclagem dos bens e/ou produtos onde se torna possível um resíduo voltar a ser

recurso, ocorrendo uma valorização dos resíduos, e uma diminuição dos bens e/ou produtos descartados (EMF, 2013; Geissdoerfer *et al.*, 2016; Prieto-Sandoval *et al.*, 2018).

Através de estratégias circulares, pode-se obter recursos locais provenientes de materiais e produtos em fim de vida (Sarkis *et al.*, 2020). No entanto, é preciso entender onde, quando e como esses materiais, e as tecnologias em que estão incorporados, podem ser reutilizadas e/ou recuperados, de forma a propiciar um sistema de utilização de material crítico em circuito fechado e, conseqüentemente, garantir o funcionamento contínuo da infraestrutura básica (Busch *et al.*, 2014). Como exemplo, a China foi o primeiro país do mundo a promover uma lei específica sobre o tema em 2008 (Ciraig, 2015) e países como Alemanha, Itália e Japão foram pioneiros no estabelecimento de ações mais concretas para promover a circularidade (Geng *et al.*, 2013). Apesar de ser um tema bastante discutido na literatura, os indicadores de circularidade ainda são temas complexos tanto para identificar quanto para ser medido. É uma parte da EC que lida com diversos fatores de um processo produtivo, da cadeia de valor e/ou pós consumo e que muitas vezes aborda medidas intangíveis de práticas de negócios (Geng *et al.*, 2013).

A utilização de indicadores de circularidade simplifica a complexidade dos sistemas e tornam as decisões mais fáceis e transparentes para o tomador de decisão (Shields *et al.*, 2002). Considerando a importância de se aplicar o conceito de economia circular e avaliar a efetividade desta aplicação, existem estratégias de medição, através de indicadores, para acompanhar o nível de implantação da economia circular. São descritos três campos de aplicação da EC: nível micro, que se refere à implantação em pequenas empresas e consumidores; nível médio, referente à parques industriais; e, nível macro, englobando cidades e nações (May *et al.*, 2002). O foco desta dissertação de mestrado será somente nos níveis micro da economia circular, pois está relacionado ao produto e/ou material.

Apesar dos esforços, os indicadores de circularidade ainda estão em estágio inicial de desenvolvimento, necessitando de maior atenção e desenvolvimento. Isso já havia sido apontado por Giurco *et al.* (2014), tendo sido reforçado por Bonarcosi e Mattei (2020). De acordo com os dados divulgados pela Eurostat uma lista de indicadores de economia circular para a União Europeia (UE) foi dividida em quatro categorias: produção e consumo, gestão de resíduos, matérias primas secundárias, competitividade e inovação. Apesar dos estudos já realizados, ainda há a

necessidade de avaliar a economia circular por meio de indicadores. A medição da circularidade está no centro de muitas questões levantadas recentemente por pesquisadores, tais como: como medir o progresso da transição para a EC? (Potting *et al.*, 2016). Os indicadores associados a gestão de resíduos e produção e consumo são as métricas mais comuns para avaliar a transição para a EC (Bonarcosi; Mattei, 2020). No caso dos materiais plásticos, é primordial reunir informações sobre os diferentes polímeros que constituem o fluxo de vida desses materiais, pois estes precisam ser quantificados a fim de entender seu contexto e buscar medidas mitigadoras de uso e consumo (Eygen; Fellner, 2018). Além disso, manter a circularidade dos plásticos diminui impactos ambientais desde a sua produção.

De acordo com Kristense e Mosgaard (2020), não há um entendimento detalhado de como medir e documentar o progresso em direção a uma economia circular, especialmente no nível micro. A variabilidade de indicadores e metodologias acaba se tornando uma barreira para as empresas que almejam fornecer produtos e serviços circulares, bem como para os consumidores que desejam comparar produtos (Kristense; Mosgaard, 2020). Ainda, a divergência de indicadores é um obstáculo para a adoção e implementação dos modelos de negócio circulares devido à dificuldade em medir o progresso em direção as metas de EC nas organizações (Saidani *et al.*, 2018). Os indicadores para a circularidade dos materiais críticos são os menos estudados. Para Whalen e Whalen (2020), o setor público deve participar do desenvolvimento e da promoção de indicadores circulares, de forma alinhada as estratégias nacionais e globais de sustentabilidade.

Dado o crescimento associado a transição para uma economia circular e o reconhecimento de sua contribuição para alcançar a neutralidade climática, é imperativo que existam indicadores adequados para monitorar essa transição e seus impactos, capturando as características específicas dos sistemas (Bos; Broeze, 2020). Devido à ausência de uma definição clara e consensual de EC e seus princípios, uma quantidade considerável de indicadores tem sido desenvolvida nos últimos anos no nível micro. Segundo a EASAC (2016), é possível que as empresas enfrentem dificuldades em adotar soluções de Economia Circular devido à falta de (i) indicadores e metas, (ii) conscientização sobre opções alternativas circulares e benefícios econômicos, e (iii) presença de lacunas de habilidades na força de trabalho, juntamente com a ausência de programas de Economia Circular em vários

níveis educacionais, como design, engenharia e escolas de negócios. De fato, a falta de intercâmbio de informações é mencionada como um obstáculo para o êxito das práticas de Economia Circular (Winans *et al.*, 2017). Sem um quadro de avaliação consistente ou apoio da indústria, as iniciativas de Economia Circular podem não ser sustentadas.

Com base nessa perspectiva, é amplamente reconhecido que, para impulsionar a Economia Circular (CE), torna-se crucial introduzir ferramentas de monitoramento e avaliação, como indicadores, que possam medir e quantificar o progresso nessa direção (Walker *et al.*, 2018; Acampora *et al.*, 2017; Cayzer *et al.*, 2017; Akerman, 2016; Di Maio e Rem, 2015). A Comissão Europeia também identificou a necessidade de indicadores de circularidade por meio de seu plano de ação para a CE (CE, 2015a), afirmando a importância de possuir um conjunto confiável de indicadores para avaliar o avanço em direção a uma economia mais circular e a eficácia das ações nos níveis da UE e nacional.

De acordo com Wisse (2016), a avaliação da eficácia das estratégias circulares implementadas em níveis nacional, regional e local é essencial. Como resultado, há uma crescente tentativa na literatura de desenvolver indicadores para o conceito de CE (Akerman, 2016). Embora tenham sido desenvolvidos inúmeros indicadores de circularidade nos últimos anos, listados no Apêndice A, a abordagem tem sido inconsistente em relação a seus propósitos, escopos e possíveis aplicações. A falta de conhecimento acadêmico e científico sobre esses indicadores é apontada como uma barreira para uma implementação mais abrangente (Akerman, 2016). Diante desse cenário, Linder *et al.*, (2017) destacam a necessidade urgente de revisar cuidadosamente as soluções disponíveis para medir a circularidade, a fim de superar suas diversas fraquezas ou identificar complementaridades.

Como resposta ao crescente número de indicadores de CE que apresentam complexidade e multifacetamento, uma definição mais clara desses indicadores seria benéfica para facilitar sua disseminação e uso apropriado. A falta de informações estruturadas sobre indicadores de EC é uma barreira para sua implementação mais ampla e isto têm sido reconhecidos por vários autores que revisaram, catalogaram e categorizaram essas métricas (EEA, 2016; Saidani *et al.*, 2019; Kristensen; Mosgaard, 2020; Lindgreen *et al.*, 2020). Assim, partindo de uma

contribuição teórica, a presente dissertação almeja propor um indicador de circularidade teórico voltado aos materiais plásticos.

1.3 DELIMITAÇÃO

A presente pesquisa se concentra em uma análise estritamente teórica e conceitual no campo da economia circular, em especial, a indicadores de circularidade de materiais. Para esta pesquisa, foi utilizado como base somente os indicadores de circularidade voltados a produtos, ou seja, indicadores que se enquadram no nível micro preconizado pela economia circular. O escopo deste estudo é limitado à exploração e discussão de teorias, conceitos e modelos existentes relacionados ao tema, sem incorporar elementos empíricos ou experimentais. Portanto, a pesquisa não envolverá coleta de dados, análise estatística ou estudos de caso.

Embora o trabalho possa considerar uma variedade de perspectivas teóricas e debates acadêmicos nesse contexto, a pesquisa não incluirá atividades de campo, entrevistas, experimentos laboratoriais ou análises quantitativas. Em vez disso, concentrar-se-á na análise crítica de obras publicadas, artigos acadêmicos, livros e documentos teóricos existentes que se relacionem especificamente com a circularidade de produtos plásticos. A pesquisa tem como objetivo contribuir para a base de conhecimento existente, proporcionando uma visão aprofundada das teorias e conceitos fundamentais que moldam o campo da economia circular no contexto dos materiais plásticos. O objetivo primordial deste trabalho é avançar na compreensão conceitual dos indicadores de circularidade de materiais com o foco nos indicadores que podem estar voltados aos materiais plásticos, fornecendo uma revisão aprofundada da literatura e uma síntese crítica das principais teorias e abordagens propostas no campo.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está estruturada em cinco capítulos. Este primeiro capítulo apresenta a contextualização geral sobre o tema, incluindo questões relacionadas à economia circular e os materiais plásticos. Este Capítulo também

apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos que nortearão o desenvolvimento da pesquisa. A justificativa do trabalho também é apresentada e focada na importância de estudos sobre circularidade de materiais plásticos.

No Capítulo 2, apresenta-se o referencial teórico, como base científica para o entendimento da pesquisa. Nesse capítulo são abordados os temas de materiais plásticos e economia circular. No caso dos materiais plásticos serão apresentadas questões sobre seus tipos, características e sua cadeia. Sobre a economia circular serão apresentadas definições, e sua relação com o tema de materiais plásticos.

Em seguida, no Capítulo 3, são discutidos o delineamento da pesquisa e os procedimentos metodológicos. Nesse capítulo são apresentadas as etapas e procedimentos da pesquisa, utilizados para o desenvolvimento dos indicadores advindo da literatura (IEC_L) e o indicador teórico proposto (IEC_T).

No Capítulo 4 são apresentados os resultados e as discussões. Inicialmente são evidenciados o levantamento teórico dos indicadores de circularidade através da revisão sistemática da literatura. Em seguida são mapeados os indicadores que estão associados ao nível do produto (nível micro) e relacionados aos materiais plásticos por meio de critérios previamente definidos para este estudo. Por fim, com base nos indicadores existentes, é apresentada a proposta de um indicador teórico de circularidade voltado a materiais plásticos (IEC_T). Ainda nesse capítulo apresenta-se as discussões dos principais resultados encontrados. Essa discussão é feita a partir dos achados prévios sobre o tema. Por fim, o quinto capítulo é dedicado às conclusões do trabalho. Além disso apresenta-se também algumas sugestões para pesquisas futuras e as limitações do presente estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico é apresentado com base em pesquisa feita em literatura científica, sendo organizado em duas partes que compreende os materiais plásticos e a economia circular. Esse tópico considera inicialmente a abordagem da economia circular e de indicadores associados ao tema, com o intuito de contextualizar sua importância e relacioná-lo com o material plástico. Por fim, são apresentados os principais dados sobre esses materiais, assim como suas características, definições e utilização.

2.1 MATERIAIS PLÁSTICOS

Os plásticos ou polímeros são usados desde o ano 1600 A.C. por meio das resinas naturais e ceras. Com o passar das décadas, o ser humano continuou a usar esses materiais de modo expansivo por meio do beneficiamento das borrachas naturais. No entanto, observou-se que os polímeros naturais possuíam limitações de uso, além do alto valor de produção (Gu et al., 2020). Esta situação incentivou o desenvolvimento de materiais semissintéticos a custos mais baixos e em maiores quantidades, como exemplo, a ebonite, a parkesina, celuloide, caseína e o acetato de celulose (Callapez, 2021).

A diferença fundamental entre um polímero e um plástico reside na sua definição e propriedades. Um polímero é uma macromolécula composta por unidades repetitivas conhecidas como monômeros, que estão unidas por ligações covalentes. Os polímeros podem assumir várias formas, desde proteínas e DNA em sistemas biológicos até polietileno e polipropileno em aplicações industriais. Por outro lado, um plástico é um tipo específico de polímero que possui a capacidade de ser moldado ou deformado sob a influência de calor e/ou pressão (Gu et al., 2020). Essa característica é devida às suas propriedades termoplásticas, permitindo que os plásticos sejam fundidos e moldados repetidamente, tornando-os ideais para uma ampla gama de aplicações na indústria de fabricação e embalagens. Portanto, enquanto todos os plásticos são polímeros, nem todos os polímeros são plásticos, pois esta última categoria refere-se a um subconjunto distinto de materiais poliméricos com propriedades de termoplasticidade (Callapez, 2021).

Os polímeros são mais conhecidos como “plásticos”, que deriva do grego “plastikos”. Significam materiais resilientes e moldáveis capazes de sofrer deformação sob ação externa de temperatura e pressão. A derivação de “polímeros” tem origem no grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição) (Cangemi *et al.*, 2005). Definindo de acordo com a química, os plásticos são polímeros constituídos por fortes ligações covalentes formados pela união de macromoléculas que por sua vez são formadas por moléculas menores denominadas monômeros. A ampla variedade química, aliada aos aditivos incorporados aos plásticos, é responsável pela possibilidade da alta variedade de produção de materiais plásticos de acordo com o produto específico desejado (Cangemi *et al.*, 2005; Kawecki *et al.*, 2018).

A criação de materiais semissintéticos foi amplamente difundida a partir do Séc. XX e levou a alta utilização dos polímeros desde a indústria automobilística até a indústria de bens de consumo. As substâncias utilizadas como matéria prima para a obtenção dos plásticos basicamente derivam do petróleo e é constituído por hidrocarbonetos (Plastics Europe, 2016). Através do processo de destilação fracionada do óleo cru que ocorre nas refinarias, são obtidas várias frações: o gás liquefeito, a nafta, a gasolina, o querosene, o óleo diesel, as graxas parafínicas, os óleos lubrificantes e o piche. A nafta é submetida a um processo de craqueamento térmico (aquecimento na presença de catalisadores) e dá origem a várias substâncias denominadas de petroquímicos básicos, entre elas, etileno, propileno, butadieno, buteno e isobutileno.

Os plásticos possuem diversas características que lhe atribuem valor, tais como leveza, resistência e, especialmente, a versatilidade. Apesar das vantagens, um fator que está sendo amplamente discutido na literatura diz respeito à durabilidade dos produtos plásticos (Jambeck *et al.*, 2015; Plastics Europe, 2016). A durabilidade pode ser considerada como a fragilidade dessa indústria devido aos nocivos efeitos causados no meio ambiente e para a saúde humana decorrente do descarte inadequado dos materiais plásticos não degradáveis (House of Commons, 2016). O fato de os plásticos não serem degradáveis tem estimulado investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem, bem como ações para a conscientização quanto ao consumo e ao descarte adequados dos materiais plásticos (ABDI, 2008). Apesar da percepção comum de que o resíduo plástico não deve se acumular no ambiente, ainda há pouco consenso com relação

à melhor estratégia a ser adotada na abordagem do material para torná-lo sustentável (Kram; Volker, 2018).

2.1.1 Características e utilização

A indústria do plástico sintético começou em meados de 1907 após a produção do primeiro plástico conhecido como baquelita. O pós Segunda Guerra mundial e o início da Terceira Revolução Industrial foram os maiores propulsores da ampla utilização dos plásticos. De acordo com sua diversidade, os materiais plásticos sintéticos obtidos por reações químicas foram classificados em função do tipo de monômero, estrutura molecular, método de preparação, composição da cadeia polimérica e do tipo de ligação covalente (Guamá *et al.*, 2008; Gu *et al.*, 2020). A cadeia de polímeros existentes está agrupada de acordo com seus quatro tipos de classificação: termofixos, termoplásticos, elastômeros e gel. Os polímeros termofixos são redes poliméricas conectadas por ligações covalentes e são polímeros classificados de acordo com sua capacidade de aquecimento. Os termofixos são rígidos, normalmente insolúveis e quando aquecidos uma vez mudam suas propriedades químicas e não podem ser fundidos novamente, ou seja, não podem ser reciclados mecanicamente.

Os termoplásticos são redes de macromoléculas conectadas por ligações não covalentes. Acima de certas temperaturas, os termoplásticos podem fazer a transição de sólidos rígidos para sólidos fluidos processáveis, que podem ser remodelados, curados e reciclados (Abiplast, 2010; Gu *et al.*, 2019). Podem ser classificados ainda quanto às características termomecânicas como elastômeros (borrachas), elastômeros termoplásticos e géis. Os elastômeros caracterizam-se pela elevada elasticidade à temperatura ambiente em pelo menos duas vezes o seu comprimento. São capazes de retornar ao formato original após a retirada do esforço.

Como resultado, são materiais macios, mas não fluidos. Os géis são redes poliméricas construídas a partir de ligações covalentes e supramoleculares e aumentam seu volume líquido em meio à água e solventes. Os elastômeros termoplásticos são materiais recicláveis que combinam as propriedades das duas famílias (elastômeros e termoplásticos) (Gorni, 2003; Gu *et al.*, 2019; Varnava; Patrickios, 2020). Caracterizados pela elasticidade e alta extensibilidade, os

elastômeros são utilizados principalmente para a fabricação de veículos e pneus em geral. Tanto a borracha natural (BN) e a borracha sintético (BS), devido sua alta plasticidade e resistência ao desgaste, são utilizadas para a fabricação de botas, materiais cirúrgicos e utilidades domésticas (Senyek, 2008). A borracha butadieno estireno (NBR) possui características similares ao Neopreno (CR) e devido a sua resistência a produtos químicos e ácidos diluídos é utilizada nas indústrias aeronáuticas e automotivas (Varnava; Patrickios, 2020).

Quanto ao seu uso, a diversidade de materiais produzidos a partir das resinas plásticas sintéticas é variada. O polietileno de baixa densidade (PEBD) é comumente utilizado em frascos, filmes para empacotamento de leite e filmes para alimentos. Os polímeros do tipo PEAD (polietileno de alta densidade) são utilizados para fabricar sacolas, brinquedos, peças e sacarias em geral. Os do tipo PP (polipropileno) são utilizados para copos e pratos descartáveis e até mesmo em utilidades domésticas. As garrafas PET (polietileno tereftalato) possuem o mesmo nome da resina que é utilizada na sua fabricação e podem ser reciclados. O PET também é usado em brinquedos e peças de eletrodomésticos e eletrônicos (ABIPLAST, 2010).

Tabela 1 - Polímeros e submateriais

POLÍMERO	SIGLA	SUBMATERIAL
TERMOFIXOS		
Uréia-Formaldeído	UF	*
Melanina-formaldeído	MF	*
Fenol-formaldeído	PF	*
Epóx	*	*
Alquídico	*	*
Polidiciclopentadieno	PDCPD	*
Poli-imida	PI	*
Policarbonato	PC	*
Poliuretano	PU	*
TERMOPLÁSTICO		
Polietileno	PE	PE de alta densidade - PEAD
		PE de baixa densidade - PEBD
		PE de baixa densidade linear - PBDL
		PE de Ultra alto peso molecular - PEUAPM
Polipropileno	PP	PP Homopolímero - PP Homo
		PP Copolímero - PP Copo
Poliestireno	PS	PS Cristal
		PS Expandido - EPS
		PS de Alto Impacto - PSAI
Policloreto de Vinila	PVC	Não plastificado - PVC U
		Plastificado - PVC P
Etil Vinil Acetato	EVA	*
Polimetacrilado de Metila	PMMA	Acrílico
Polietileno Tereftalato	PET	*
Polibutileno Tereftalato	PBT	*
Poliamida	PA	PA 6:6, PA 6, PA 11, etc.
Polióximetilénos	POM	*
ELASTÔMEROS		
Borracha Natural	BN	*
Borracha Sintética	BS	*
Borracha butílica	BB	*
Borracha Polibutadieno	BP	*
Borracha de Butadieno Estireno	SBS	*
Borracha Nitrílica	Buna N	*
Neopreno	CR	*
Silicone	*	*
Borracha Etileno-Propileno-Dieno	EPDM	*
TERMOPL. ELAST.		
Policarbonato	PC	Policarbonato de bisfenol A - PC BPA
Poliuretano Termoplástico	TPU	*
Borracha de Butadieno Estireno	SBS	*
GEL		
Hidrogel	*	*
Organogel	*	*

Fonte: Adaptado de ABIPLAST (2010) e Varnava e Patrickios (2021)

A Tabela 1 apresenta os principais tipos de plásticos de acordo com sua classificação e seus respectivos submateriais. A ampla gama de utilização do plástico e seu crescimento estão atribuídos ao seu baixo custo, baixa densidade, alta flexibilidade e durabilidade inerte química. Para Geyer *et al.* (2017) a maioria

dos produtos plásticos são feitos de materiais como PE (polietileno), PP (polipropileno), PS (poliestireno) e PET (polietileno tereftalato). Cada tipo possui características intrínsecas e são usados na indústria para a fabricação de diferentes materiais. A Tabela 2 apresenta as características de alguns termoplásticos comumente usados na indústria de embalagens.

A Tabela 2 apresenta as características de alguns termoplásticos comumente usados na indústria de embalagens.

Tabela 2 - Principais características de termoplásticos da indústria de embalagens

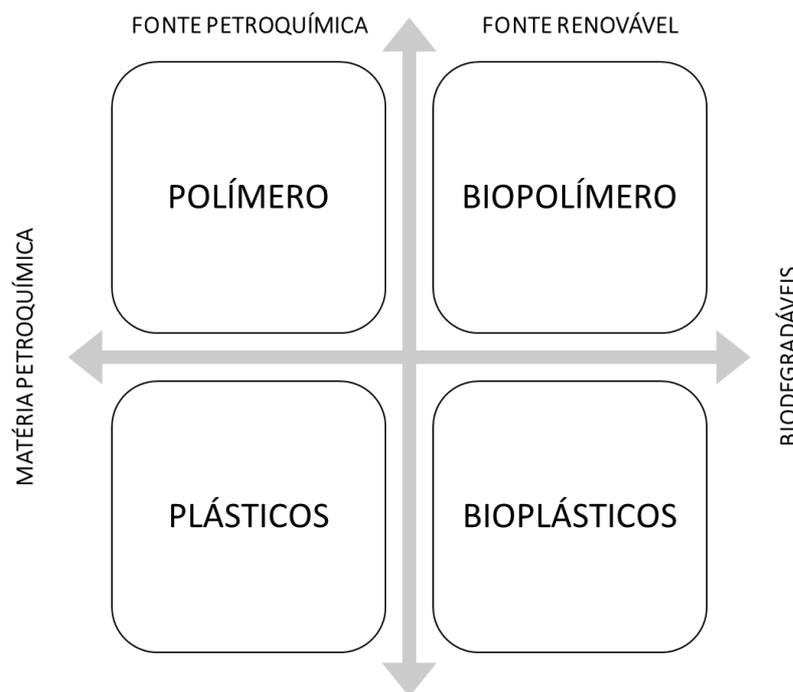
Tipo	Características e Propriedades	Aplicações
ET	Material semicristalino, de alta densidade, resistente e rígido. Propriedades de atrito de deslizamento, altamente rígido com comportamento frágil em temperaturas abaixo de zero, estabilidade térmica, expansão térmica mínima, sensibilidade à água quente e vapor, condutividade térmica relativamente alta, baixa condutividade elétrica, propriedade de isolamento, alta resistência química e ao desgaste e baixa absorção de umidade.	Reconhecida por seu sucesso como substituto do vidro em garrafas de bebidas devido à sua estabilidade dimensional, resistência e resistência a produtos químicos. Amplamente utilizado em aplicações de embalagens de alimentos e cuidados pessoais.
VC	Material amorfo, opticamente transparente, de alta densidade, duro e quebradiço. É resistente, relativamente forte e rígido com muito boas propriedades de atrito deslizante, baixa expansão térmica, baixa condutividade térmica, baixa condutividade elétrica, boas propriedades de isolamento, boa resistência química e ao desgaste e absorção de umidade.	Está disponível em duas formas: plastificado (flexível) ou não plastificado (duro, resistente) e é usado em embalagens blister para medicamentos e cápsulas.
P	Semicristalino, de baixa densidade, material com melhor resistência, dureza, rigidez e estabilidade térmica do que os tipos de PE (HDPE-LDPE). Sensível em temperaturas abaixo de zero, baixa condutividade térmica, baixa condutividade, propriedades de isolamento relativamente boas e baixa absorção de umidade.	Possui a menor densidade de todos os termoplásticos, que aliada à sua excelente fadiga e resistência química podem torná-lo atraente em muitas aplicações de embalagem, tais como tampas de todos os tipos, embalagens e recipientes de alimentos expostos a altos níveis de calor e estresse químico.

Fonte: Adaptado de HAHLADAKIS; IACOVIDOU (2018)

Pode-se considerar o petróleo como uma das principais fontes de matéria-prima para a produção de materiais plásticos, porém devido à escassez de recursos e aos problemas de poluição pós consumo que esse setor tem

gerado, fez-se necessário o desenvolvimento de materiais menos agressivos. Com isso houve o surgimento dos biopolímeros e os bioplásticos como alternativa para o desenvolvimento de materiais biodegradáveis. Os biopolímeros são macromoléculas naturais ou sintetizadas por organismos vivos, compostas por unidades repetitivas chamadas monômeros. Essas moléculas desempenham papéis cruciais em diversos processos biológicos e podem ser encontradas em organismos vivos, como plantas, animais e microorganismos (Borschiver *et al.*, 2008). Existem basicamente dois tipos de biopolímeros que são os naturais e sintéticos, onde os naturais são formados por proteínas, ácidos nucleicos e polissacarídeos enquanto os sintéticos são controlados em laboratório, como exemplo do polihidroxicanoato (PHA) (Abiplast, 2019).

Figura 3 – Relação entre polímero, biopolímero, plásticos e bioplásticos



Fonte: Autora (2023)

Além dos biopolímeros existem os bioplásticos que são materiais obtidos a partir de fontes de matéria-prima renováveis (Borschiver *et al.*, 2008). A Figura 3 demonstra as principais diferenças entre o polímero, plásticos, biopolímeros e bioplásticos. Os bioplásticos compõem uma família de plásticos que permitem diversas aplicações distintas. Os bioplásticos são aqueles fabricados a partir de uma fonte renovável, aqueles que são biodegradáveis ou aqueles que possuem

essas duas propriedades simultaneamente. As propriedades físico-químicas dos bioplásticos (por exemplo, peso molecular, flexibilidade e grupos mais funcionais) o tornam mais suscetível ao pré-tratamento do que o plástico tradicional (Abiplast, 2019). Os bioplásticos renováveis são um tipo de plástico derivado de fontes renováveis e biológicas, em contraste com os plásticos tradicionais que são fabricados a partir de recursos não renováveis, como petróleo. A produção e utilização de bioplásticos renováveis visam reduzir a dependência de recursos fósseis não sustentáveis e mitigar o impacto ambiental associado aos plásticos convencionais (Abiplast, 2018).

Os bioplásticos são produzidos a partir de insumos como beterraba, cana-de-açúcar e batata e possuem as mesmas propriedades dos plásticos convencionais. Os principais tipos de bioplásticos são o PE verde, Poliláctico (PLA), Polihidroxialcanoato (PHAs), Polihidroxibutirato (PHB) e Polihidroxivalerato (PHV). O PE é um polímero produzido por reação de polimerização convencional utilizando matérias-primas de origem renovável (sustentável) como o etanol da cana-de-açúcar (Al Hosni *et al.*, 2019). O PLA é obtido a partir do ácido láctico produzido pela fermentação do milho e é biodegradável (compostável). Plásticos biodegradáveis são aqueles que se decompõem naturalmente (Abiplast, 2019), ou seja, a biodegradabilidade está associada à decomposição e não à sua origem, como é o caso dos bioplásticos.

O PLA possui uso potencial na confecção de embalagens, itens de descarte rápido e fibras para vestimentas e forrações (Borschiver, *et al.* 2008; Al Hosni *et al.*, 2019). Já os PHAs, PHBs e PHVs são bioplásticos produzidos por micro-organismos ou bactérias modificadas geneticamente. Estes micro-organismos sintetizam polímeros que são extraídos e usados como plásticos e são biodegradáveis (Abiplast, 2010). Apesar de todo plástico biodegradável ser considerado bioplástico, o contrário não é válido. O material de origem renovável pode não ser biodegradável, ou seja, degradável por ação de organismos vivos. Como exemplo o PET que pode ser constituído pelo etanol (fonte renovável), porém não inicia sua decomposição apenas por processos biológicos. Quanto aos bioplásticos ou biopolímeros, entende-se que é o material constituído por fonte renovável e/ou biodegradável (Mohanty; Misra; Drzal, 2005; Godinho, 2021). Considerando a tendência preocupante no fornecimento de plásticos sintéticos, os biopolímeros e bioplásticos são opções biodegradáveis e de origem renovável.

Os biopolímeros são amplamente utilizados nas indústrias alimentícia, farmacêutica e agrícola e vem sendo desenvolvidos estudos a fim de recuperar ou extrair biopolímeros a partir de resíduos (Rosseto *et al.*, 2019).

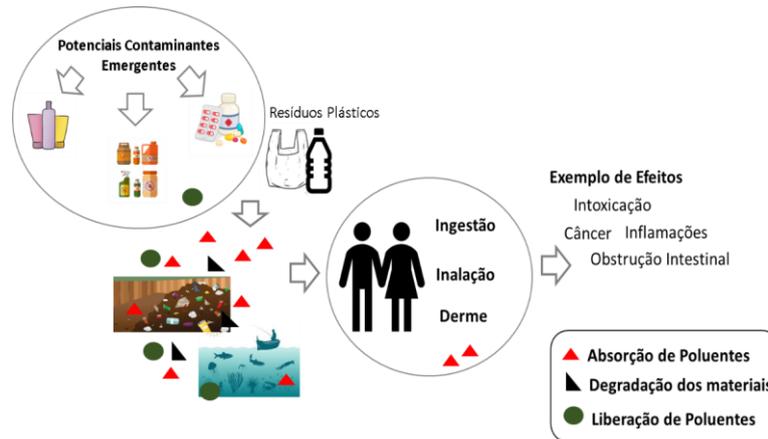
2.1.2 Cadeia de contaminação de materiais plásticos

Devido à sua prevalência e persistência, o plástico é considerado como um contaminante emergente (CE) de alta preocupação ambiental. A distribuição onipresente desses CEs em produtos derivados do plástico e em estudo de coletas de micro plásticos tem sido identificado como um dos tópicos mais atuais em avaliação de risco ambiental (Kroon *et al.*, 2020). Apesar dos estudos, ainda existem diversas lacunas de conhecimento sobre a acumulação e distribuição desses compostos no ecossistema (Miller *et al.*, 2018; Çolakoglu *et al.*, 2020).

Durante o processo de transformação do polímero em material plástico final há a adição de diversas substâncias químicas que promovem a durabilidade e resistência. Essas características, em conjunto com o descarte inadequado desse tipo de resíduos, promovem o acúmulo do plástico em diversos ecossistemas, absorve substâncias perigosas, sofre processo de radiação e degradam-se em micropartículas (Jambeck *et al.*, 2015; Geyer *et al.*, 2017; Pertussatti, 2020).

Estima-se que cerca de 60% de todo o plástico produzido entre 1950 e 2015 já foram descartados e estão acumulados em aterros irregulares ou estão dispersos no meio ambiente (WWF, 2019). Estima-se ainda que cerca de 1,5% a 4% da produção mundial de plástico têm como destino os oceanos todos os anos (WWF, 2019). A Figura 3 exemplifica o potencial contaminante dos RSP (Resíduos Sólidos Plásticos) de pós consumo por meio da cadeia de contaminação que esses materiais podem ocasionar.

Figura 4 - Cadeia de contaminação por meio de resíduos plásticos



Fonte: Autora (2023)

De acordo com a Figura 4, é possível visualizar que a contaminação ocorre concomitantemente à disposição inadequada de resíduos plásticos, que é uma das fontes de poluição emergente amplamente discutidas na atualidade. Os potenciais contaminantes emergentes da cadeia advêm das indústrias químicas, em especial, as indústrias farmacêuticas (Priya *et al.*, 2022), de cuidados pessoais (Rogowska *et al.*, 2020) e de pesticidas (Saha *et al.*, 2020) que incluem em sua composição elementos tóxicos, carcinógenos, desreguladores endócrinos entre outros, como exemplo os ftalatos, iopamidol, diclofenaco, triclosan, almíscares e ibuprofeno anteriormente mencionados.

Na cadeia de produção dos plásticos, diversos elementos tóxicos também são adicionados à sua estrutura polimérica como os ftalatos, retardadores de chama, aditivos, bisfenóis, entre outros (Caixeta *et al.*, 2022). Esses compostos funcionais desempenham papel crucial no que diz respeito à caracterização dos resíduos plásticos como contaminantes emergentes uma vez que promovem a sua toxicidade. A Tabela 3 evidencia diversos aditivos utilizados na indústria plástica assim como sua real necessidade e a razão pelos quais são considerados contaminantes emergentes.

Em paralelo, os materiais plásticos, quando sofrem a má gestão do fim de vida, passam por ações externas e internas de degradação. Essa degradação promove a formação de micro plásticos em ambiente marinho e/ou terrestres em micro e nano escala por meio da fragmentação progressiva desses materiais. Em geral, essa fragmentação dos plásticos ocorre por meio de produtos químicos

(UV, fotodegradação, alta disponibilidade de oxigênio etc.) e intemperismo mecânico (abrasão, turbulência etc.) facilitando o processo de oxidação dos materiais o que causa perda da integridade estrutural. A distribuição dos micros plásticos dá-se por meio de duas fontes: primária e secundária.

Tabela 3 - Aditivos e impactos

Aditivos	Necessidade	Impactos	Fonte
Retardantes de Chama	Prevenção da combustão dos polímeros	Materiais facilmente lixiviáveis no meio ambiente	Kitahara e Nakata (2020); Jiang <i>et al.</i> , (2021)
Tensoativos	Diminuem a tensão superficial dos líquidos	Ioniza a superfície plástica (melhora a ligação do plástico com metais)	Jiang <i>et al.</i> , (2021)
Plasticidas	Aumento de elasticidade dos materiais	Materiais geralmente smecodor e cor, facilmente ingeridos por animais	Vieira <i>et al.</i> , (2011); Bejgam <i>et al.</i> , (2015)
Estabilizantes	Diminuem e retardam a quebra do material	Atrasa ou previne a oxidação do plástico	Allen e Edge (2021)

Fonte: Autora adaptado de Sridharan *et al.* (2022)

Cabe ressaltar que a distribuição primária é a fonte que advém dos materiais acabados, como exemplo, produtos de limpeza esfoliantes com micropartículas, enquanto a distribuição secundária dá-se por meio do resultado da deterioração química e mecânica dos plásticos quando dispostos no meio ambiente e que ambas são fontes de poluição. Os resíduos advindos da distribuição secundária funcionam como vetores para absorção de poluentes químicos já encontrados na natureza além dos produtos químicos já adicionados na sua produção primária, ou seja, metais pesados, pesticidas, hidrocarbonetos, plasticidas, retardadores de chama etc. entre outros compostos desreguladores endócrinos. De acordo com Ziccardi *et al.* (2016) além desses compostos, outros contaminantes emergentes também funcionam como vetores de transmissão por meio de micro plásticos como é o caso dos *Persistent Organic Polutants* (POPs) e os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) que possuem como característica à biopersistência, pois favorecem ligações interações moleculares no ambiente terrestre e aquático.

Esses compostos foram relatados em diversos estudos em concentrações ambientais variando drasticamente entre ng/g (nanograma) à mg/g (miligrama) dependendo de sua relação com os micros plásticos e as amostras ambientais que constituir, o que descreve uma avaliação racional de identificação dos polímeros como contaminantes e suas designações eco toxicologias (Rochman *et al.*, 2013; Lohmann *et al.*, 2015; Rahman *et al.*, 2020).

Em 2020, o IPEN (*International Polutants Elimination Network*) resumiu o amplo impacto na saúde dos seres humanos que são contaminados por meio da exposição (derme), inalação e ingestão de plásticos. Rahman *et al.*, (2021) relatou que a exposição e inalação de MPs já associados a diversos contaminantes emergentes como BPA causam câncer, interrupção do metabolismo e são tóxicos para o sistema nervoso e reprodutivo. O consumo direto de alimentos marinhos (Rochman *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2019) e terrestres ingeridos por um longo período também causam disfunção endócrina nos seres humanos, uma vez que esses alimentos estão contaminados por micro e nano plásticos (IPEN, 2020).

De acordo com a OMS, há estudos que relatam que 15% da ingestão calórica de alimentos detém do consumo anual de 39.000 a 52.000 partículas de MPs. Indivíduos que bebem apenas água engarrafada podem estar ingerindo mais de 90.000 partículas de NP e/ou MPs (Cox *et al.*, 2019). Todos esses fatores associados caracterizam a cadeia dos plásticos e dos materiais de pós consumo como potenciais contaminantes emergentes. Estudos já apontam que o plástico está presente até no corpo humano por meio da ingestão de peixes contaminados. Como exemplo, Sa *et al.* (2014) descobriram que o *Pomatoschistus micros*, uma espécie de peixe da água doce, confunde microesferas de polietileno com alimento e que em um futuro não muito distante pode até causar a extinção da espécie devido à má nutrição.

2.2 A ECONOMIA CIRCULAR

O conceito de EC (Economia Circular) foi fundamentado em diversas escolas de pensamento, podendo ser considerada como uma combinação de princípios de dessas escolas, algumas das quais datam da década de 1960 (BSI, 2017). As influências teóricas mais relevantes que antecedem a EC são: Economia azul, Biomimética, Design regenerativo, Ecologia industrial, Cradle to cradle, Capitalismo natural e Simbiose industrial (EMF, 2015; Geissdoerfer *et al.*, 2017). Apesar de envolver antecedentes pautados em diferentes escolas, a EC aborda princípios comuns. No geral, esses princípios possuem como objetivo estender a vida de materiais e produtos, adotar métodos de pensamento sistêmico de toda cadeia, regenerar e restaurar sistemas e promover tributos e mecanismos de mercado que

encorajam políticas públicas e privadas (Cook, 2015). Por ser um conceito adotado e aplicado em diferentes países e organizações, instituições como a Fundação Ellen MacArthur conceituam a EC como um sistema industrial restaurador e regenerativo por intenção e design (EMF, 2013).

Em domínio mundial, a economia circular visa reduzir e otimizar a maneira como as organizações estão produzindo seus produtos (Ghisellini; Cialani; Ulgiati, 2016). Logo, de uma forma simplificada, baseia-se na capacidade de recuperar recursos no local que ainda estão circulando em vez de importá-los (Donia; Mineo; Sgrio, 2018). Uma economia circular bem-sucedida contribui para as três dimensões da sustentabilidade (Zabaniotou, 2018), a econômica, a social e a ambiental. Em suma, as principais abordagens da EC formam uma estrutura baseada em *inputs* circulares, modelos de negócio, design do produto, design do processo, fluxos circulares e capacitadores e aceleradores (Weetman, 2019).

Além disso, a definição conceitual da EC é embasada em quatro componentes relevantes como a recirculação de recursos e energia, minimização da demanda e recuperação de valor dos resíduos, abordagem em níveis (nano, micro, meso e macro), desenvolvimento sustentável e a relação entre a sociedade e a inovação (Prieto-Sandoval *et al.*, 2018). A economia circular não possui um único conceito formulado no meio acadêmico. As diferentes definições presentes na literatura a definem como um modelo emergente que se opõe ao modelo linear (extrair-produzir-consumir-descartar). A estrutura genérica da EC envolve discussões sobre o máximo aproveitamento de recursos de modo a prolongar a vida útil de materiais, transformar a cadeia pós consumo e promover sua eficiência energética.

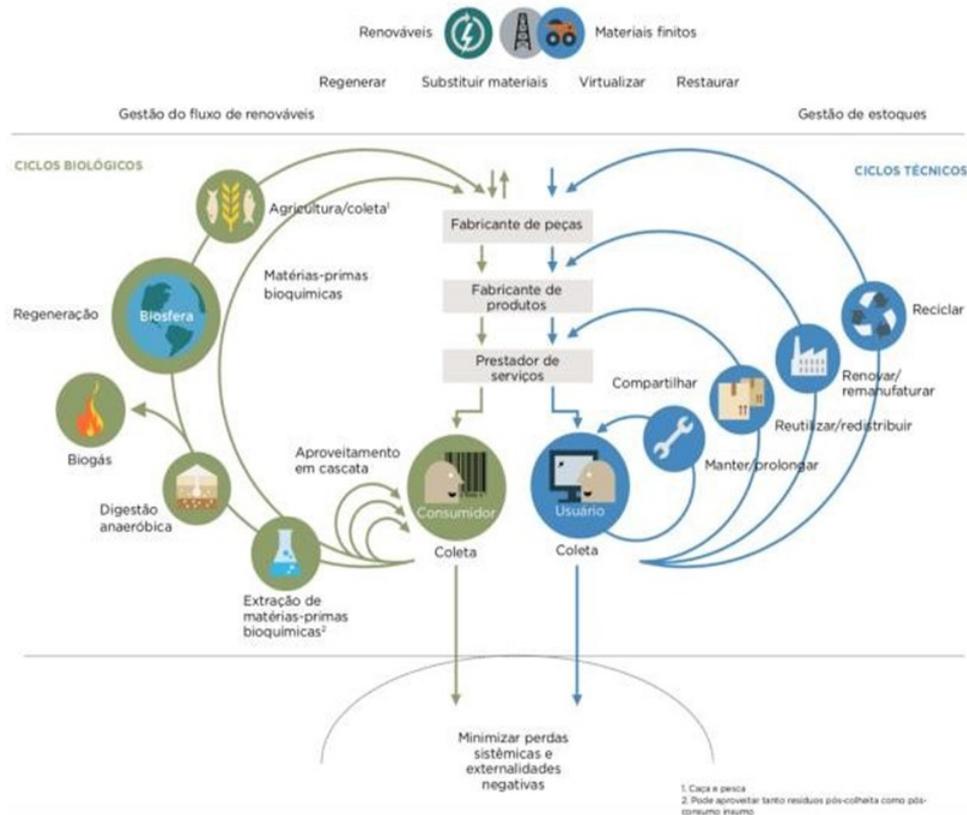
Em resumo, a Economia Circular oferece às organizações a oportunidade de aprimorar suas vantagens competitivas por meio de colaborações e reestruturação de seus negócios. Essa abordagem é bastante promissora, embora também gere preocupações. A transição das operações de um modelo econômico linear para um circular não é uma tarefa simples. No entanto, estão sendo exploradas alternativas que visam promover a Economia Circular, especialmente quando se considera o ciclo de vida de processos, produtos e atividades agrícolas. Essas alternativas em prol da Economia Circular têm o potencial de oferecer benefícios não apenas do ponto de vista ambiental, mas também em termos econômicos e sociais. Segundo a visão da Fundação Ellen MacArthur, a EC é entendida por dois grandes grupos de

produtos e seus respectivos ciclos de vida, o ciclo biológico e o ciclo técnicos. O ciclo biológico é definido por produtos biodegradáveis ou obtidos a partir de matéria prima vegetal, podendo facilmente retomar a sua forma original. O ciclo técnico é um grupo de produtos que passam por transformações químicas que dificilmente voltam a sua forma original ou natural, como exemplo o plástico que é o foco deste trabalho (EMF, 2013). De acordo com os conceitos entre os ciclos citados anteriormente, projetar produtos para o ciclo técnico significa garantir que o mínimo de componentes será utilizado e que podem ser desmontados facilmente, garantindo a qualidade para fabricação de novos produtos (Mcdonough; Braungart, 2010).

A Figura 5 apresenta o Diagrama da Borboleta, que é a figura mais utilizada para representar os dois ciclos da economia circular. Em suma, a EC possui como estratégia básica três pilares que são a “Redução”, a “Reutilização” e a “Reciclagem”. Conhecidos como os 3R’s, a redução trata da produção e consumo de materiais enquanto a reutilização abrange o máximo de uso possível de um produto, prolongando seu tempo de vida útil. Por último, a reciclagem pode reduzir a necessidade de extração de matéria prima para fabricação de novos materiais e pode manter os resíduos em novos ciclos de vida. Esse conceito 3R’s evoluiu ao longo do tempo para um conceito mais abrangente, o 6R’s, acrescentando itens como recuperação, remanufatura e *redesign* (Bradley *et al.*, 2018). Mas há outras visões e correntes a esse respeito. Buren *et al.* (2016), por exemplo, consideram que a EC possui nove pilares para a circularidade, ou seja, 9R’s, acrescentando ainda outros 3 pilares que são recuperar, reconceber e responsabilizar.

Ou seja, a economia circular é um sistema de economia regenerativa em que a entrada de recursos e saída de resíduos, emissões e perdas de energia são minimizados pela desaceleração, fechamento e estreitamento dos circuitos materiais e energéticos (Geissdoerfer *et al.*, 2017). Portanto, a abordagem da economia circular visa dissociar o desenvolvimento econômico do consumo de recursos finitos, eliminando as externalidades negativas da economia (EMF, 2017). Deste modo, a EC atua na maximização da eficiência dos recursos e na redução e/ou eliminação dos resíduos, mantendo os recursos em uso pelo maior tempo possível (Habib, 2019; Sassanelli *et al.*, 2019) e gerindo os estoques de ativos manufaturados, para mantê-los com a mais alta pureza e valor (Stahel, 2019).

Figura 5 - Diagrama da Borboleta (ciclo técnico x ciclo biológico)



Fonte: EMF, (2013)

O sistema de economia circular apoia-se em suas especificidades, tais como (EMF, 2015): solução para resíduos, diversidade, energia limpa, pensamento sistêmico e custos das externalidades negativas. A descrição destes cinco atributos é apresentada a seguir.

i. Solução para resíduos: em uma economia circular a ideia central é evitar qualquer tipo de desperdício, desde o início dos projetos. Isso envolve a classificação dos materiais em dois ciclos distintos: o biológico, que trata dos materiais orgânicos renováveis e não prejudiciais ao ambiente, que podem ser devolvidos à terra por meio de compostagem ou digestão anaeróbica; e o ciclo técnico, que lida com materiais finitos, como plásticos, ligas e outros materiais criados pelo homem. No ciclo técnico, a ênfase está na recuperação e reincorporação desses materiais, visando preservar a energia e maximizar o valor econômico e a conservação de recursos;

ii. Diversidade: a variedade de elementos é considerada essencial para conferir flexibilidade e capacidade de recuperação aos sistemas. Portanto, para

alcançar sucesso sustentável a longo prazo, as economias devem encontrar um equilíbrio entre a presença de pequenas empresas e grandes corporações;

iii. Energia limpa: a energia utilizada em modelos de negócios circulares deve vir de fontes renováveis;

iv. Pensamento sistêmico: para uma transição bem-sucedida para a Economia Circular, é necessário adotar uma abordagem de pensamento sistêmico, que implica em sempre considerar os sistemas complexos, suas interconexões e as consequências envolvidas;

v. Custos das externalidades negativas: os preços devem incorporar os custos reais, ou seja, é necessário revelar e levar em conta os custos totais das consequências negativas das atividades. A falta de transparência em relação a esses impactos prejudiciais representa um obstáculo para a adoção da Economia Circular.

Além do que já foi apresentado, vale destacar que a EC está dividida e classificada em três níveis: micro, meso e macro: no nível micro, o foco recai sobre uma única empresa ou consumidor, com pesquisas concentradas em áreas como produção mais limpa, consumo sustentável, contratos públicos ecológicos, reciclagem, reuso e inclusão dos catadores. No nível meso de implementação, a pesquisa se concentra em parques eco industriais, explorando sistemas tecnoindustriais, simbiose industrial em grupos e redes, bem como o mercado de comércio de resíduos e, por fim o nível macro, que retrata a consolidação do conceito da EC em cidades, regiões e nações. (Ghisellini *et al.*, 2016).

2.2.1 Associação da economia circular com os materiais plásticos

A relação entre economia circular e o plástico encontra-se na possibilidade de transformação de resíduos provenientes desses materiais em recursos, invertendo a tendência linear dominante. Isso pode propiciar a disponibilidade de matérias primas recuperadas, com o objetivo final de preservar os recursos naturais, minimizando assim os impactos ambientais (Ghisellini *et al.*, 2016). Uma abordagem circular para a produção e uso do plástico é preferível à economia linear, pois tem como resultado um ambiente sustentável com oportunidades econômicas e sociais (Willis *et al.*, 2018).

Em um Sistema Integrado de Gerenciamento de Resíduos (SIGR) há diversos processos para classificação e tratamento adequado de resíduos de acordo com suas características. Esse tipo de sistema ainda é equiparado com um sistema linear, pois não esgota o potencial de uso desse resíduo. Considerando os benefícios que a circularidade dos recursos pode promover, a questão que deve ser discutida é: como a sociedade e a indústria podem fazer uma transição bem-sucedida para um modelo econômico circular. Sob a ótica da engenharia, essa transição deve ocorrer por meio de um sistema circular de gestão de resíduos que liga o processamento de recursos e o tratamento, permitindo que o potencial dos resíduos seja totalmente explorado em todas as fases do processo (Cobo *et al.*, 2011).

Para Cramer (2017), evitar desperdícios e criar valor é fator crucial para o adequado SIGR. Com isso, o autor desenvolveu o conceito conhecido como “Escada da Circularidade” que é um conjunto de ferramentas de gestão e prevenção de resíduos com níveis “R” da economia circular. A hierarquia foi definida considerando dois aspectos principais: função antes da concepção do material e minimização de energia. O primeiro aspecto visa prolongar a vida útil do produto pelo maior tempo possível e o segundo aspecto visa a utilização do resíduo para outros fins com o menor consumo de energia possível (Horvath *et al.*, 2018).

De acordo com a escala proposta por Cramer (2017), recusar materiais possui maior prioridade na escala por ser aplicada tanto aos consumidores quanto aos recicladores de resíduos plásticos. Essa abordagem promove a prevenção do uso de matérias primas não renováveis para fabricação do plástico, e por parte do consumidor, a rejeição ou substituição do plástico por outros materiais menos poluentes e mais sustentáveis. Porém, Forgarassy *et al.* (2017) afirmam que a deficiência dessa escala é a visão estreita, com foco apenas na natureza de eliminação dos resíduos, desconsiderando a amplitude do gerenciamento de resíduos.

Na União Europeia, a ordem de prioridade para gerenciamento de resíduos sólidos foi incluída no WFD (*Waste Framework Directive* - (2008/98/EC) de forma ampla e menos individualizada. Essa ordem de prioridade das operações segue a prevenção, preparação para reutilização, reciclagem, outras valorizações (energética) e, por último, a eliminação dos resíduos (Pires *et al.*, 2019). Posteriormente, a estratégia para a economia circular da EU (COM/2015/0614)

defendeu que toda hierarquização do gerenciamento de resíduos necessitava conduzir o máximo de reaproveitamento de materiais em seus ciclos de vida como geração de valor e conseqüente redução dos resíduos (EU COMMISSION, 2015). Atualmente, o WFD está incluído na agenda 2030 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e contempla a prevenção, redução, reciclagem e reuso.

Além do poder público, iniciativas filantrópicas e setor privado têm discutido a relação ambiental entre resíduo plástico e a economia circular. A Fundação Ellen MacArthur desenvolveu o relatório “*New Plastics Economy – Rethinking the Future of Plastics*” com o intuito de evidenciar a visão geral sobre os fluxos globais dos plásticos, em especial, dos plásticos com ciclos de vida curtos e que são utilizados para a produção de embalagens. Para viabilizar as ações propostas no relatório, a Fundação desenvolveu uma nova iniciativa em parceria com instituições privadas denominada de “*The Global Commitment*” para auxiliar a transição para a EC por meio de estratégias sistêmicas e colaborativas.

Em comparação com a diretiva europeia, a legislação nacional não deixa expressa a responsabilidade direcionada pelo ciclo de vida do produto. Desta forma, há a necessidade de regulamentação das políticas públicas além da participação efetiva do poder público nas iniciativas de EC e envolvimento dos demais setores da sociedade brasileira (Azevedo, 2015). No Brasil ainda não há práticas eficazes para efetivar a EC nos sistemas; apesar da instauração da PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos) promovendo a logística reversa dos materiais, somente 23,1% dos resíduos plásticos de pós consumo retornaram à cadeia produtiva no ano de 2020 (ABIPLAST, 2021). Os modelos de negócios de economia circular estão em estágio embrionário no Brasil e as organizações ainda possuem dificuldades em adotar práticas de economia circular, contudo já existem alguns casos de sucesso (Sehnm *et al.*, 2019).

2.2.2 Revisão sistemática da literatura (RSL) sobre indicadores de Economia Circular

Os indicadores, de um modo geral, devem ser de fácil utilização para tornar a comunicação de informações mais simples (Bradley Guy; Kibert, 1998). Sua eficácia é maximizada quando estão em sintonia com os valores do público que se pretende

alcançar (Dahl, 2012). Os indicadores podem ser uma ferramenta importante para avançar em direção a um mundo mais sustentável. Inicialmente, a utilização de indicadores quantitativos é defendida como uma maneira de medir a circularidade de processos e organizações. Na literatura, vários pesquisadores têm se dedicado a explicar e questionar os indicadores de sustentabilidade (Saidani *et al.*, 2019; Senathirajah *et al.*, 2022; Baumer-Cardoso *et al.*, 2023). Os indicadores usados para avaliar a circularidade na economia ainda são limitados em número e ainda não há uma maneira amplamente aceita para mensurar a EC. Até o momento, não existe um método padronizado globalmente amplamente aceito para medir a circularidade de produtos (Di Maio & Rem, 2015; Linder *et al.*, 2017) e é resultante da interpretação variada do conceito de economia circular por diferentes stakeholders.

De acordo com Kirchherr *et al.* (2017), existem cerca de 114 definições sobre economia circular em artigos revisados por pares, documentos de política e relatórios de consultoria. Consequentemente, a variedade de métricas de circularidade desenvolvidas até o momento apresenta contradições e isso pode levar os profissionais a alcançar conclusões conflitantes sobre o mesmo conceito (Corona *et al.*, 2019; Moraga *et al.*, 2019; Saidani *et al.*, 2019). Atualmente, uma ferramenta amplamente empregada para auxiliar as organizações na transição para a EC é oferecida pela Ellen MacArthur Foundation e é aplicável aos níveis de produtos e empresas sendo conhecida como Indicador Circular de Material ou Material Circularity Indicator (EMF, 2015). Entretanto, de acordo com Linder *et al.*, (2017), essa métrica enfrenta desafios ao tentar distinguir entre os diferentes componentes dos produtos. A ferramenta utiliza um índice que varia de 0 a 1 com base em critérios de reutilização, reciclagem, origem e destino de materiais. No entanto, a crítica levantada ressalta que a insuficiência desse indicador é visível uma vez que não considera aspectos cruciais como modularidade, atualização, conectividade e desmontagem e o escopo do indicador é mais restrito do que o conceito abrangente de EC (Saidani *et al.*, 2017).

No caso do Indicador de Desempenho da Economia Circular (CEPI), seu cálculo envolve a avaliação da eficácia ambiental ideal, considerando as opções de tratamento de resíduos disponíveis em uma região específica (Huysman *et al.*, 2017). Esse indicador compara o benefício ambiental real obtido, resultante da opção de tratamento de resíduos, com o benefício ambiental ideal, levando em conta a qualidade do processo. O benefício ambiental real representa o impacto da opção

de tratamento de resíduos para a qual o fluxo deveria ser direcionado, assumindo-se que a reciclagem em circuito fechado é preferível à incineração de materiais. Já Paulik *et al.* (2017), adota uma abordagem estática do ciclo de vida do produto, o que o torna um indicador relacionado à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Em contraste, Circularity Material Cycles CIRC é concebido para avaliar a circularidade de materiais em um sistema de produtos, referindo-se a uma quantidade específica de material originalmente consumido em um produto dentro de um determinado período de tempo. O indicador conhecido como "Closed the Loop Indicator (CLC)", é uma métrica que avalia o quão bem um sistema ou processo fecha o ciclo de vida dos materiais, garantindo sua reintegração na cadeia. Por outro lado, Material Circularity Indicator – MCI foca na circularidade de um produto em relação aos materiais componentes, considerando a matéria-prima virgem, a geração de resíduos e a utilidade do produto.

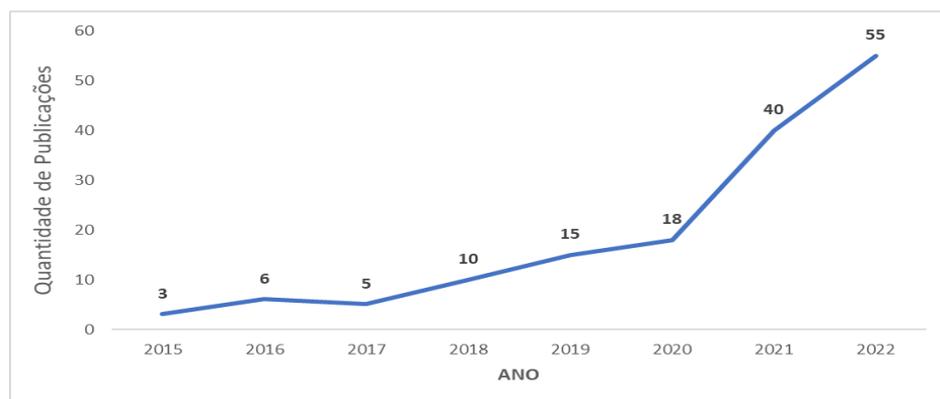
O indicador conhecido como Circular Economy Indicator Prototype (CEIP) é um dos indicadores projetados para avaliar o desempenho ambiental de produtos dentro do contexto da EC. Este indicador opera por meio de um questionário composto por 15 perguntas que abrangem cinco estágios do ciclo de vida do produto, desde a extração da matéria-prima até seu fim de vida útil onde os resultados são processados em uma planilha eletrônica, resultando em uma avaliação do desempenho ambiental do produto estudado. Porém, conforme apontado por Saidani *et al.* (2017), este sistema de pontuação não binário pode ser simplista em sua aplicação e as 15 perguntas fechadas também podem não abordar de maneira mais abrangente todos os aspectos relacionados a EC.

Com o protótipo similar ao CEIP, a Circular Economy Toolkit (CET) (Griffiths; Cayzer, 2016) é uma ferramenta de circularidade que avalia um produto e sua cadeia produtiva de forma mais acessível, gratuita e online. A ideia principal do kit é estabelecer um formulário que contém perguntas nas quais os respondentes podem escolher entre “sim”, “parcial” ou “não” onde as perguntas estão divididas entre sete categorias principais: design, fabricação e distribuição, uso, reparo e manutenção, reutilização, remanufatura, serviços e reciclagem no fim de vida útil. Entretanto, utilizar em formulários um modo de resposta ternário, como exemplo o “parcial”, acarreta ambiguidade, tendência e gera dificuldade na análise devido a menor precisão. Sendo assim, cada uma das ferramentas supracitadas possui pontos fortes e fraquezas no que diz respeito à sua criação e aplicação.

Uma revisão sistemática da literatura conduzida por Saidani *et al.*, (2019) identificou 55 métricas diferentes da economia circular. Já os autores Kristensen e Mosgaard (2020) identificaram cerca de 20 trabalhos sobre o tema que tratavam de índices, indicadores, conjuntos de indicadores compostos e ferramentas analíticas, onde a maioria emergiram nos últimos cinco anos e que demonstraram uma abordagem diversificada para medir economia circular. A maioria dos indicadores desse estudo se concentravam na reciclagem enquanto menos indicadores consideraram a desmontagem, extensão da vida útil, eficiência de recursos ou reutilização. De fato, os indicadores relacionados a EC parecem estar em estágios embrionários de desenvolvimento e compreensão, porém há uma constante evolução no que tange ao crescimento do tema.

A Figura 6 apresenta a quantidade de artigos publicados sobre indicadores de circularidade na base de Dados *Scopus* ao longo dos anos. A partir dos dados da Figura 5 observa-se que a crescente atenção e preocupação com a sustentabilidade e a gestão de recursos estão refletidas no notável aumento do número de artigos relacionados à economia circular.

Figura 6 - Quantidade de publicações ao longo dos anos



Fonte: Autora (2023) adaptado de Saidani et al. (2019)

Em 2015, apenas três artigos abordaram esse tópico, mas nos anos subsequentes, esse número experimentou um crescimento significativo. Em 2016, o volume de trabalhos dobrou para seis, e embora tenha diminuído ligeiramente em 2017, com cinco artigos publicados, a tendência geral de crescimento persistiu. Em 2022, testemunhamos um aumento impressionante para 55 artigos, refletindo a

crecente importância atribuída à economia circular como um paradigma econômico e ambiental. Esse aumento no interesse e na pesquisa nesse campo ressalta o reconhecimento da necessidade de abordar questões relacionadas à gestão sustentável de recursos e à minimização do desperdício, à medida que as sociedades buscam soluções para desafios globais de sustentabilidade.

A revisão sistemática da literatura identificou 11 indicadores de nível micro (produto/materiais), listados na Tabela 4. Os indicadores IEC_1, IEC_2 e IEC_3, apesar de estarem diretamente relacionados à economia circular, abordam aspectos diferentes sobre circularidade. O IEC_1, conhecido em inglês como *Material Reutilization Part* (C2C) avalia a reutilização de materiais em produtos ou componentes (C2C, 2014). Este indicador faz parte da abordagem “*Cradle to Cradle*” (C2C) que visa a sustentabilidade e a reutilização dos materiais. Por outro lado, o IEC_2, ou Índice de Economia Circular (CEI), se concentra em medir o valor econômico dos materiais em produtos de consumo, considerando aspectos estratégicos, econômicos e ambientais (Di Maio; Rem, 2015). No caso do IEC_3, ou Indicador de Desempenho da Economia Circular (CEPI), calcula-se a eficácia ambiental ideal, com base nas opções de tratamento de resíduos disponíveis em uma determinada região (Huysman *et al.*, 2017).

Tabela 4 - IEC_L mapeados

	NOME IEC_L	FONTE
IEC_1	Material Reutilization Part (C2C)	C2C, 2014
IEC_2	Circular Economy Index (CEI)	Di Maio & Rem, 2015
IEC_3	Circular Economy Performance Indicator (CEPI)	Huysman <i>et al.</i> , 2017
IEC_4	Circularity Material Cycles (CIRC)	Pauliuk <i>et al.</i> , 2017
IEC_5	Closed Loop Calculator (CLC)	Kingfisher, 2014
IEC_6	End-of-Life Recycling Rates (EoL-RRs)	Graedel <i>et al.</i> , 2011
IEC_7	Material Circularity Indicator (MCI)	EMF, 2015
IEC_8	Product-Level Circularity Metric (PCM)	Linder <i>et al.</i> , 2017
IEC_9	Resource Duration Indicator (RDI)	Franklin-Johnson <i>et al.</i> , 2016
IEC_10	Reuse Potential Indicator (RPI)	Park & Chertow, 2014
IEC_11	Recycling Rates (RRs)	Haupt <i>et al.</i> , 2017

Fonte: Autora (2023)

Este indicador é definido pela razão entre o benefício ambiental real obtido (ou seja, da opção de tratamento de resíduos) e o benefício ambiental ideal de acordo com a qualidade do processo. O último (benefício ambiental real) é o benefício da opção de tratamento de resíduos para a qual o fluxo deveria ser

direcionado de acordo com sua composição/qualidade, com um esforço mínimo requerido, como exemplo, assumindo que a opção reciclagem em circuito fechado é preferível a incineração de materiais. De acordo com Paulik *et al.* (2017), o IEC_1 adota uma perspectiva estática do ponto de vista do ciclo de vida do produto o que o caracteriza como indicador relacionado a ACV (Avaliação do Ciclo de Vida). Para incorporar a perspectiva da circularidade de materiais contrapondo o IEC_1, o IEC_4 (*Circularity Material Cycles CIRC*) foi elaborado baseado em materiais que se referem a uma quantidade específica de material originalmente consumido em um produto em um determinado tempo. Na literatura esse indicador está somente relacionado a materiais metálicos assim como o IEC_5 (*End of Life Recycling Rates – EOL RRs*), porém sua utilização também pode se estender aos materiais plásticos uma vez que as informações cruciais para o uso deste indicador referem-se a pureza, qualidade e capacidade de recuperação do material em fase de uso.

O IEC_6, ou “*Closed the Loop Indicator (CLC)*” (Indicador de Fechamento de Ciclo), é uma métrica que avalia o desempenho de sistemas ou processos utilizando o conceito de EC. O CLC mede o quão efetivamente um sistema ou processo fecha o ciclo de vida dos materiais (Kingfisher, 2014), garantindo que eles sejam reintegrados na cadeia. Além de um indicador, é uma ferramenta para avaliar o grau de circularidade em uma economia circular ou em um setor industrial específico apesar de focar somente no produto o que insere este indicador no nível micro. Em contrapartida, o IEC_7 (*Material Circularity Indicator – MCI*), apesar de avaliar o desempenho de sistemas e processos em relação à EC, possui como foco o grau de circularidade de um produto em relação aos materiais componentes considerando o uso da matéria prima virgem, a geração de resíduos que não podem ser reutilizados e a utilidade do produto (EMF, 2015). Ainda, o MCI (IEC_7) é um indicador que é comumente relacionado ao IEC_1 (SAIDANI *et al.*, 2019), mas sua diferenciação se concentra na abordagem mais ampla do C2C em busca de transformar o sistema de produção e consumo em algo regenerativo e sustentável, ou seja, o MCI e C2C possui como primordial diferença o foco e escopo de aplicação.

Já o foco de atuação do IEC_8 (*Product Level Circularity Metric – PCM*) está baseado no uso do valor econômico como a unidade básica para agregar partes de produtos em uma métrica de circularidade ao nível do produto, onde a circularidade é definida como a fração de um produto que provém de outros produtos usados (Linder *et al.*, 2017). A definição dessa fração é considerada como valor econômico

“recirculado” e varia em uma escala de 0 a 1 (ou de 0% a 100% de partes recirculadas). De acordo com Moraga *et al.* (2019), Saidani *et al.* (2020) e Bobba *et al.* (2023) as fragilidades desse indicador encontram-se em alguns aspectos:

- a) Simplificação excessiva: o PCM se concentra apenas na proporção de materiais reciclados ou reutilizados em um produto;
- b) Ênfase na quantidade e não qualidade: este indicador não considera a qualidade dos materiais reciclados ou reutilizados de um produto;
- c) Foco distorcido do produto individual: não se concentra na cadeia de suprimentos de um produto e sim no seu escopo final;
- d) Desconsideração dos aspectos sociais e econômicos: apesar de ser um indicador que retrata o uso do valor econômico, o PCM tende a se concentrar principalmente em aspectos técnicos e ambientais, não considerando considerações a respeito do aspecto social da circularidade;
- e) Complexidade de medição: a falta de dados detalhados sobre a cadeia produtiva de um determinado produto em análise evidencia negativamente a ferramenta uma vez que medir com precisão a circularidade de um produto é considerado uma tarefa complexa.

É válido ressaltar que o PCM não captura uma abordagem holística da EC uma vez que o conceito busca não apenas reciclar ou recuperar materiais, mas sim ter uma visão do todo da cadeia em busca de projetar produtos advindos de um processo restaurativo. Em especial, o IEC_9 (*Resource Duration Indicator – RDI*), mais conhecido na literatura como indicador de longevidade, foi desenvolvido para expressar a longevidade de recursos dentro de um conjunto de recursos agregados (Franklin-Johnson *et al.*, 2016).

Já o IEC_10, similar ao IEC_9, é um indicador que descreve sobre como a longevidade utiliza o tempo para medir a duração de um material dentro de um sistema de produtos, onde a retenção maior significa que o uso de recursos é maximizado. Com isso, o IEC_10 (*Reuse Potential Indicator – RPI*) é uma métrica de circularidade que representa a quantidade de um material que pode ser reutilizada por meio de tecnologias disponíveis fracionado com sua receita obtida pela venda de materiais processados. O IEC_10 busca abranger o tripé da sustentabilidade, focando na quantificação da usabilidade econômica de transformação de resíduos em materiais em termos de desenvolvimento tecnológico. Dos indicadores

analisados, apenas o IEC_11 (*Recycling Rates – RR*) foi o indicador encontrado que descreve a quantidade de material recuperada de um sistema de gerenciamento de resíduos de modo que seus rendimentos sejam quantificados. O *gap* deste último indicador está na necessidade de investigação do potencial rendimento do processo de reciclagem de modo a incutir metas individuais para cada material analisado levando em consideração a viabilidade técnica (Haupt *et al.*, 2017). A Tabela 5 a seguir apresenta um quadro comparativo resumido dos 11 indicadores apresentados anteriormente.

Tabela 5 - Características, vantagens e desvantagens dos IEC_L

	Característica Principal	Vantagens	Desvantagens
IEC_1	Avalia a reutilização de materiais em produtos ou componentes, com foco na perspectiva "Cradle to Cradle" (C2C) que visa a sustentabilidade e reutilização de materiais.	Avalia a reutilização de materiais em produtos ou componentes, o que promove a circularidade.	Perspectiva estática do ciclo de vida do produto e é limitado à avaliação de materiais reutilizados.
IEC_2	Mede o valor econômico dos materiais em produtos de consumo, considerando aspectos estratégicos, econômicos e ambientais, enfocando a circularidade de uma perspectiva econômica.	Mede o valor econômico dos materiais em produtos de consumo, considerando aspectos estratégicos, econômicos e ambientais.	Pode não refletir aspectos sociais e ambientais de forma abrangente.
IEC_3	Calcula a eficácia ambiental ideal com base nas opções de tratamento de resíduos disponíveis em uma região, comparando o benefício ambiental real com o ideal.	Calcula a eficácia ambiental ideal com base nas opções de tratamento de resíduos disponíveis.	Limitado à avaliação de eficácia ambiental e possui foco na gestão de resíduos somente.
IEC_4	Aborda materiais específicos e a quantidade de material consumido em um produto em um determinado tempo, aplicável a materiais metálicos e, potencialmente, a materiais plásticos.	Aborda materiais específicos e quantidade de material consumido em um produto em um determinado tempo e pode ser aplicado para materiais metálicos e plásticos.	Limitado à avaliação de materiais específicos.
IEC_5	Se concentra na reciclagem de materiais, mas é especificamente relacionado às taxas de reciclagem no final da vida útil dos produtos.	Permite medir a quantidade recuperada dos materiais em produtos, por meio da reciclagem, no final de sua vida útil.	Limitado à avaliação das taxas de reciclagem no final da vida útil dos produtos.
IEC_6	Avalia o desempenho de sistemas ou processos na perspectiva da circularidade, focando na reintegração efetiva de materiais na cadeia.	Avalia o desempenho de sistemas ou processos na perspectiva da circularidade e enfoca na reintegração de materiais na cadeia.	Limitado ao nível micro, focado apenas no produto.
IEC_7	Avalia o grau de circularidade de um produto em relação aos materiais componentes, considerando matéria-prima virgem, resíduos que não possam ser reutilizados e a utilidade do produto.	Avalia o grau de circularidade de um produto em relação aos materiais componentes e considera a matéria-prima virgem, resíduos que não possam ser reutilizados e a utilidade do produto.	Pode ter sobreposições com IEC_1 (C2C) em certos contextos.

IEC_8	Usa o valor econômico como base para medir a circularidade ao nível do produto, expressando a fração do produto que provém de outros produtos usados.	Usa o valor econômico como base para medir a circularidade ao nível do produto.	Simplificação excessiva, não considerando a qualidade dos materiais reciclados ou reutilizados e foco no produto individual em vez de na cadeia de suprimentos.
IEC_9	Expressa a longevidade de recursos dentro de um conjunto de recursos agregados.	Expressa a longevidade de recursos dentro de um conjunto de recursos agregados.	Pode não capturar outros aspectos importantes da circularidade, como a eficiência na utilização desses recursos ou a capacidade de recuperação e reutilização.
IEC_10	Representa a quantidade de um material que pode ser reutilizada, focando na usabilidade econômica de transformação de resíduos em materiais.	Representa a quantidade de um material que pode ser reutilizada.	Uma desvantagem potencial é que ele pode não abordar aspectos qualitativos da reutilização, como a qualidade dos materiais reutilizados, sua pureza ou seu desempenho em comparação com materiais virgens.
IEC_11	Descreve a quantidade de material recuperada de um sistema de gerenciamento de resíduos	Descreve a quantidade de material recuperada de um sistema de gerenciamento de resíduos.	Necessidade de investigação do potencial rendimento do processo de reciclagem.

Fonte: Autora (2023)

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Com o passar das décadas, as transformações dos polímeros conduziram o uso dos conhecidos materiais plásticos. Esses materiais tornaram-se cada vez mais baratos, leves e duradouros e, devido à diversidade de resinas e da versatilidade de suas propriedades, possuem inúmeras aplicações, destacando-se os setores de embalagens, construção civil e de higiene e limpeza. Porém, a demanda crescente por esses produtos resulta no significativo aumento da geração de resíduos. Nesse contexto, a PNRS instaurada no Brasil define que para qualquer resíduo descartado deve-se existir soluções técnicas ambientalmente corretas que vão desde a recuperação dos materiais, sua reciclagem ou reinserção na cadeia produtiva. Essas técnicas de tratamento mais adequadas para o resíduo plástico também são vistas em conceitos difundidos pela economia circular, como exemplo, o reuso, a redução, a reciclagem, a incineração e, por último, a disposição em aterros.

Entretanto, nota-se que ainda há a gestão inadequada, e por isso a maioria dos resíduos plásticos de pós consumo é enviada para aterros ou lixões ou estão dispostos irregularmente no ambiente, prejudicando a vida e a saúde dos animais e dos seres humanos, devido a durabilidade e toxicidade que esses materiais podem promover na natureza. Com isso, a ligação do adequado gerenciamento de resíduo e a difusão de uma economia mais circular de alguma forma impulsionam a busca

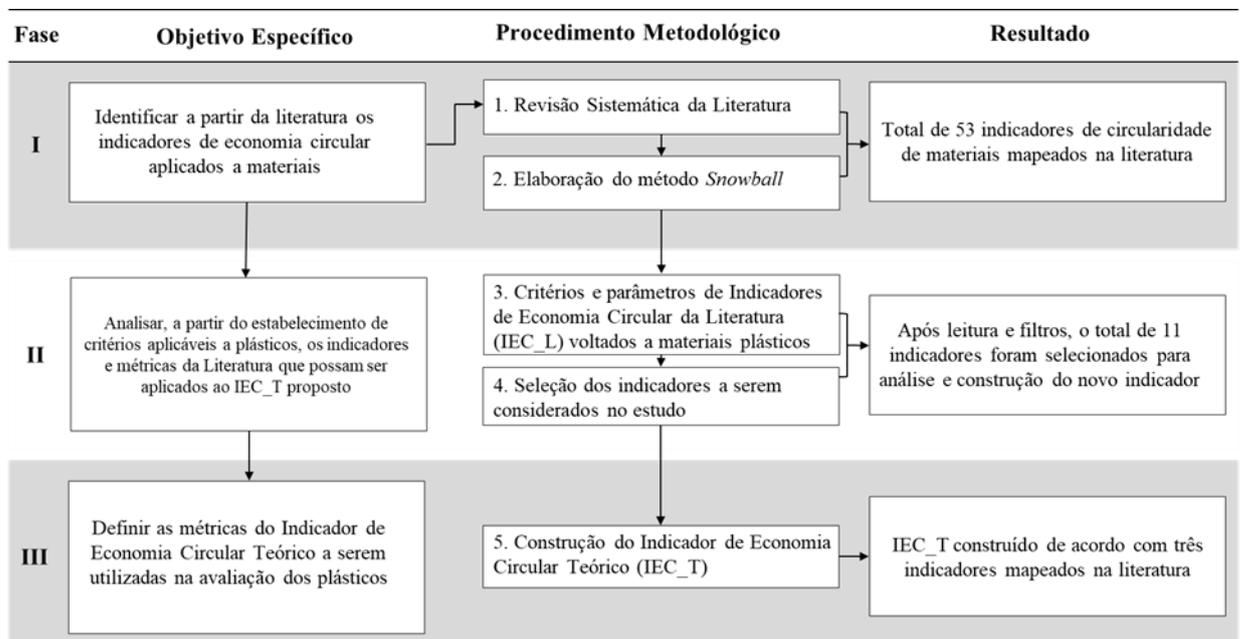
por indicadores capazes de avaliar a evolução dos resíduos plásticos. Em termos de pesquisas publicadas em periódicos de alto impacto, observa-se que essa busca é comumente visualizada em estudos de países europeus onde os conceitos de economia circular estão mais difundidos na prática. Pesquisadores que exploram o tema estão apontando caminhos e perspectivas de redirecionamento de resíduos plásticos além de leis estaduais capazes de potencializar a EC em diferentes setores.

Diante do que foi apresentado, percebe-se uma evolução no tema, visando aprimorar as maneiras de medir a circularidade nos níveis macro, meso e micro. A partir disso, o capítulo seguinte apresentará os procedimentos metodológicos cujo objetivo é a proposta de um Indicador de Economia Circular Teórico (IEC_T) que avalie a circularidade de materiais plásticos com base em indicadores existentes. Este indicador está baseado em uma fase teórica dentro do nível micro da EC, onde o material plástico é o tipo de produto a ser considerado para análise. Vale enfatizar que a parte relativa aos indicadores de circularidade teóricos não será abordada nesse capítulo 2 e sim no capítulo 4, pois entende-se o mesmo como parte dos resultados dessa dissertação.

3 DELINEAMENTO DA PESQUISA E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O objetivo geral deste trabalho é o de propor um indicador de economia circular aplicado a plásticos. Trata-se de um indicador teórico, pois o mesmo não será aplicado, por isso será denominado IEC_T (Indicador de Economia Circular Teórico). A ideia é que esse IEC_T, quando aplicado a situações reais, possa avaliar a circularidade de materiais, em especial os materiais plásticos. Vale ressaltar que esse IEC_T teve como base indicadores existentes na literatura. Com isso, esta pesquisa possui como abordagem metodológica a modelagem do tipo qualitativa, pois visa descrever e analisar parte do funcionamento do sistema de indicadores aplicados à circularidade de materiais plásticos e o que esse fenômeno pode causar (Berto; Nakano, 2002). Conforme Morabito (2010), esse tipo de metodologia permite ao leitor a compreensão do ambiente em questão a fim de identificar problemas, formular estratégias e até mesmo descrever oportunidades para apoiar tomada de decisões. A Figura 7 a seguir apresenta as Etapas da pesquisa.

Figura 7 – Etapas da pesquisa



Fonte: Autora (2023)

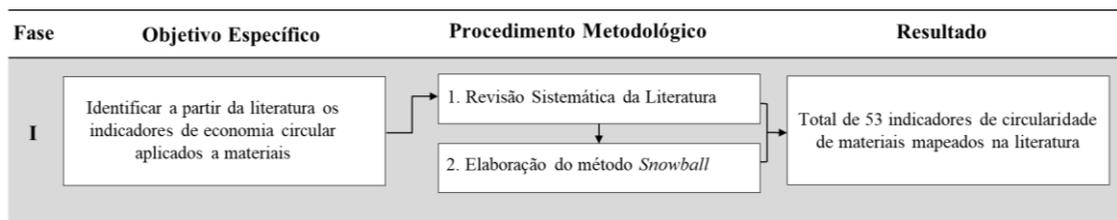
A Fase I possui como foco a análise da literatura existente e contemplou a identificação dos principais estudos relacionados a indicadores de circularidade de materiais, a partir de uma revisão da literatura. Para tal identificação, foi aplicado o

método de revisão sistemática da literatura em conjunto com o método bola de neve (descrita em maiores detalhes no item 3.1). Já a Fase II buscou reduzir o espaço amostral de indicadores e considerou somente os indicadores associados a materiais plásticos. Portanto esta Fase II possuiu como entrega os Indicadores de Circularidade da Literatura (IEC_L) que foram a base para a construção do novo indicador. Por fim, na Fase III, foi realizada a definição das métricas a serem aplicadas para construção do Indicador de Circularidade Teórico (IEC_T). Os tópicos a seguir detalham as fases da pesquisa.

3.1 FASE I – ANÁLISE DA LITERATURA

O processo de revisão sistemática da literatura (RSL) permite aos pesquisadores mapear e avaliar a literatura relevante a fim de elucidar uma questão de pesquisa e desenvolver a base de conhecimento científico. A pesquisa deve ser realizada de forma transparente e replicável, seguindo um rigor metodológico (Tranfield et al., 2003). Sendo assim, visando a amostra mais representativa para o método, a primeira fase da pesquisa consistiu na entrega do objetivo específico a) apresentado no capítulo anterior conforme Figura 8.

Figura 8 – Fase I da pesquisa



Fonte: Elaborado pela Autora com base em Tranfield et al., (2003)

A revisão sistemática da literatura compreendeu as seguintes atividades: definição da base de dados, definição da lógica de pesquisa, definição dos critérios para a busca, definição dos critérios para seleção dos artigos e análise descritiva e de conteúdo conforme segue:

- i. Definição da base de dados: Para esta atividade se procedeu com a busca e seleção dos artigos para a composição do portfólio foram

utilizadas duas bases de dados eletrônicas para localização dos artigos sementes: Scopus e Web of Science. As duas bases de dados foram escolhidas como fontes de pesquisa, pois possuem uma gama significativa de artigos conceituados e com qualidade aceitável pela academia.

- ii. Definição da lógica de pesquisa: A utilização dessas bases serviu como uma validação para garantir que todos os artigos relevantes que se enquadram nos critérios de busca fossem considerados para este estudo. Os termos definidos para a busca foram “circular economy” AND “indicators”, pois permitiram a definição do foco específico em indicadores associados a economia circular.
- iii. Definição dos critérios para a busca: Os critérios definidos para pesquisa na base de dados foram: (1) não há restrição quanto ao período de publicação; (2) foram considerados estudos do tipo artigo; (3) foram considerados artigos em estágio final de publicação e (3) foram considerados artigos somente em inglês.
- iv. Definição dos critérios para seleção dos artigos: O processo de exclusão de trabalhos mapeados seguiu os seguintes critérios: artigo sem o texto completo, resumo e/ou palavras chave sem relação com materiais plásticos e indicadores, textos em que a EC é usada somente como direção futura de estudo e, por fim, materiais plásticos e economia circular citados apenas como expressão.

Ainda, para a construção da base de dados, foi utilizado o método denominado bola de neve ou snowball. De acordo com Atkinson e Flint (2001), o método bola de neve é uma abordagem de pesquisa para estudos sistemáticos da literatura utilizando uma lista de referência de um artigo ou as citações do artigo para identificar novas fontes. Assim, é visto como um método de rastreamento de referências que busca aproveitar a expertise dos principais autores de um tema para expandir as referências da pesquisa. Esse processo é baseado na suposição de que existe um vínculo entre a amostra inicial e outras na mesma população-alvo, permitindo que uma série de referências seja feita dentro de uma amostra de conhecimento (Atkinson; Flint, 2001).

Para a realização de uma amostragem em bola de neve é necessário que haja um intermediário inicial, também denominado de semente, que localiza ou aponta autores necessários para a pesquisa a ser realizada onde a semente pode, inclusive, ser um dos participantes. Os autores indicados são então estudados e consequentemente indicam mais autores de acordo com o tema proposto (Atkinson; Flint, 2001). Na presente pesquisa, da base de dados *Scopus*, o artigo dos autores Rizwan *et al.*, (2023) foi o selecionado e da base de dados *Web of Science* houve a seleção do artigo dos autores Bobba *et al.* (2023). Após a aplicação das etapas de revisão sistemática da literatura e a utilização do método de bola de neve, os resultados revelaram um total de 53 indicadores de circularidade identificados nos artigos selecionados. Inicialmente, a leitura completa dos 39 artigos, começando pelos mais recentes, permitiu a inclusão de mais 20 artigos à base por meio do método snowball. Isso demonstra a eficácia do método na ampliação da base de dados e na identificação de novas fontes relevantes para a pesquisa.

3.2 FASE II E III - INDICADORES DE ECONOMIA CIRCULAR

A segunda etapa dessa pesquisa partiu dos resultados da Etapa I e contempla duas partes, apresentadas respectivamente nos subitens 3.2.1 e 3.2.2. A primeira diz respeito à definição dos critérios e parâmetros de indicadores de EC da literatura (IEC_L) voltados a materiais plásticos; e a segunda à construção do modelo para a proposta do Indicador de Economia Circular Teórico (IEC_T).

3.2.1 Critérios e parâmetros de Indicadores de Economia Circular da Literatura (IEC_L) voltados para materiais plásticos

Os indicadores de EC podem ser categorizados em três níveis distintos: micro (que engloba aspectos relacionados a organização, produtos e consumidores), meso (que abrange parques industriais) e macro (abrangendo cidades, províncias, regiões e países) (KIRCHHERR *et al.*, 2017). Dentro do contexto dessa dissertação, optou-se por concentrar-se exclusivamente nos indicadores que se situam no primeiro nível da economia circular, uma vez que o enfoque deste estudo recai sobre produtos e materiais plásticos. Após análise dos 53 indicadores previamente identificados na Fase 1 apenas 11 se enquadraram no nível micro, sendo estes os selecionados para

serem empregados nessa pesquisa e exemplificados no capítulo posterior de resultados. A Figura 9 apresenta a listagem dos 53 indicadores e destaca em amarelo os indicadores selecionados e que possuem aplicação no nível micro. No intuito de avaliar a pertinência das métricas existentes em relação

Figura 9 - Lista de indicadores de circularidade encontrados (IEC_L)

	Nome IEC_L	Referência/Fonte
IEC_1	Building Circularity Indicators (BCI)	VERBENE, 2016
IEC_2	Circular Economic Value (CEV)	FOGARASSY <i>et al.</i> , 2017
IEC_3	Circular Economy Company Assessment Criteria (CECAC)	VBDO, 2015
IEC_4	Circular Economy Index (CEI)	DI MAIO & REM, 2015
IEC_5	Circular Economy Indicator Prototype (CEIP)	CAYZER <i>et al.</i> , 2017
IEC_6	Circular Economy Indicators for India (CEII)	TALWAR, 2017
IEC_7	Circular Economy Monitoring Framework (CEMF)	EUROPEAN COMMISSION, 2017
IEC_8	Circular Economy Performance Indicator (CEPI)	HUYSMAN <i>et al.</i> , 2017
IEC_9	Circular Economy Toolbox US (CETUS)	US CHAMBER FOUNDATION, 2017
IEC_10	Circular Economy Toolkit (CET)	EVANS & BOCKEN, 2013
IEC_11	Circular Impacts Project EU (CIPEU)	EUROPEAN COMMISSION, 2016
IEC_12	Circular Input Rate (CIR)	BOBBA <i>et al.</i> , 2023
IEC_13	Circular Pathfinder (CP)	RESCOM, 2017
IEC_14	Circularity Assessment Tool (CAT)	PGGM, 2015
IEC_15	Circularity Calculator (CC)	RESCOM, 2017
IEC_16	Circularity Index (CI)	CULLEN, 2017
IEC_17	Circularity Indicator Project (ICT)	VIKTORIA SWEDISH ICT, 2015
IEC_18	Circularity Material Cycles (CIRC)	PAULIUK <i>et al.</i> , 2017
IEC_19	Circularity Potential Indicator (CPI)	SAIDANI <i>et al.</i> , 2017
IEC_20	Closed Loop Calculator (CLC)	KINGFISHER, 2014
IEC_21	Eco-efficient Value Ratio (EVR)	SCHEPENS <i>et al.</i> , 2016
IEC_22	Economy-Wide Material Flow Analysis (EWMFA)	HAAS <i>et al.</i> , 2015
IEC_23	End-of-Life Recycling Rates (EoL-RRs)	GRAEDEL <i>et al.</i> , 2011
IEC_24	Environmental Protection Indicators (EPICE) in a context of CE	SU <i>et al.</i> , 2013
IEC_25	EU Resource Efficiency Scoreboard (RES)	EC, 2015b
IEC_26	Evaluation Indicator System of Circular Economy (EISCE)	ZHOU <i>et al.</i> , 2013
IEC_27	Evaluation of CE Development in Cities (ECEDC)	LI <i>et al.</i> , 2010
IEC_28	Evaluation of Regional Circular Economy (ERCE)	CHUN-RONG, 2011
IEC_29	Five Category Index Method (FCIM)	LI & SU, 2012
IEC_30	Hybrid LCA Model (HLCAM)	GENOVESE <i>et al.</i> , 2017
IEC_31	Indicators for Consumption for CE in Europe (ICCEE)	EEA, 2016
IEC_32	Indicators for Eco-design for CE in Europe (IECEE)	EEA, 2016
IEC_33	Indicators for Material input for CE in Europe (IMCEE)	EEA, 2016
IEC_34	Indicators for Production for CE in Europe (IPCEE)	EEA, 2016
IEC_35	Indicators of Economic Circularity in France (IECF)	MAGNIER, 2017
IEC_36	Industrial Park Circular Economy Indicator System (IPCEIS)	GENG <i>et al.</i> , 2012
IEC_37	Input-Output Balance Sheet (IOBS)	MARCO CAPELLINI, 2011
IEC_38	Integrative Evaluation on the Development of CE (IEDCE)	QING <i>et al.</i> , 2011
IEC_39	Material Circularity Indicator (MCI)	EMF, 2015
IEC_40	Material Reutilization Part (C2C)	C2C, 2014
IEC_41	Measuring Regional CE/Eco-Innovation (MRCEEI)	SMOL <i>et al.</i> , 2017
IEC_42	National Circular Economy Indicator System (NCEIS)	GENG <i>et al.</i> , 2012
IEC_43	Product-Level Circularity Metric (PCM)	LINDER <i>et al.</i> , 2017
IEC_44	Recycling Indices (RIs) for the CE	VAN SCHAİK & REUTER, 2016
IEC_45	Recycling Rates (RRs)	HAUPT <i>et al.</i> , 2017
IEC_46	Regional Circular Economy Development Index (RCEDI)	GUO-GAND & JING, 2011
IEC_47	Resource Duration Indicator (RDI)	FRANKLIN-JOHNSON <i>et al.</i> , 2016
IEC_48	Resource Productivity (RP)	WEN & MENG, 2015
IEC_49	Reuse Potential Indicator (RPI)	PARK & CHERTOW, 2014
IEC_50	Super-efficiency Data Envelopment Analysis Model (DEA)	WU <i>et al.</i> , 2014
IEC_51	Sustainable Circular Index (SCI)	AZEVEDO <i>et al.</i> , 2017
IEC_52	Value-based Resource Efficiency (VRE)	DI MAIO <i>et al.</i> , 2017
IEC_53	Zero Waste index (ZWI)	ZAMAN & LEHMANN, 2013

Fonte: Autora (2023)

Para tal, foi utilizado o estudo titulado “A vision of Circular Economy for Plastic” da Ellen MacArthur Foundation que preconiza seis critérios cruciais a serem considerados em estudos relacionados a materiais plásticos de forma a garantir a circularidade desse material (EMF, 2021). Este estudo foi utilizado devido à referência global da organização Ellen MacArthur em trabalhos sobre circularidade de materiais. Em especial, o estudo supracitado foi o primeiro material da fundação dedicado exclusivamente para materiais plásticos e que possuía como objetivo abordar todas as fases do plástico assim como definir critérios de estudo para esses materiais. Estes critérios adotados para avaliar os 11 indicadores pertinentes a materiais foram: recirculação, reutilização, reciclagem, eficiência energética, redução e substâncias perigosas (seção 4.2.1).

Ainda, para posterior criação do indicador, foi necessário reduzir o espaço amostral por meio da utilização de um Diagrama de Venn apresentado no Cap 4., seção 4.2.2. Os diagramas de Venn são representados por linhas fechadas, desenhadas sobre um plano, de forma a representar os conjuntos e as diferentes relações existentes entre conjuntos e elementos. Na definição estatística utilizam-se diagramas de Venn para visualizar o espaço de resultados e os acontecimentos associados a um fenômeno aleatório (Martins, 2014). A escolha pelo uso de um diagrama de Venn para esta pesquisa dá-se pela facilidade em definir critérios devido à sua capacidade de oferecer uma representação visual clara das relações entre conjuntos. Estes diagramas simplificam a identificação de sobreposições e diferenças entre conjuntos, facilitam a comparação entre critérios e permitem uma comunicação eficiente de conceitos complexos. Eles são especialmente úteis para a análise comparativa e a tomada de decisão, destacando áreas de prioridade e ajudando a equilibrar considerações diversas em qualquer contexto de avaliação ou seleção.

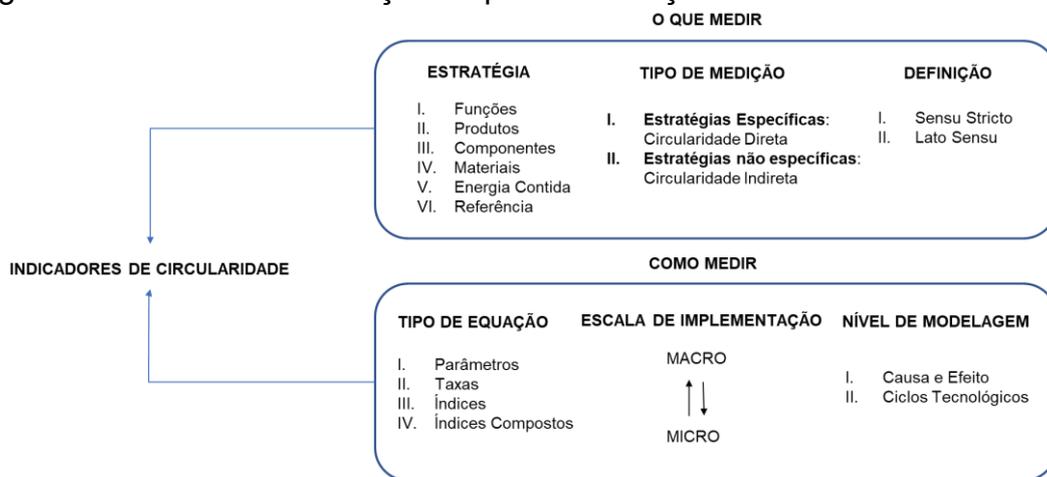
Logo, a restrição da amostra de indicadores com base nesses critérios pré definidos é justificada pela necessidade de assegurar a eficácia e a relevância da análise. Ao adotar esses critérios, direciona-se o foco aos aspectos mais críticos da circularidade de materiais plásticos. Com isso, permite-se concentrar recursos e esforços na avaliação dos indicadores que tem um impacto direto e significativo na promoção da sustentabilidade e redução do impacto ambiental. Além disso, a escolha por restringir a amostra de indicadores alinhados com esses critérios deu-se

pela necessidade de obter resultados mais direcionados e relevantes para análise do material escolhido para este estudo.

3.2.2 Construção do modelo para Indicador de Circularidade Proposto (IEC_T)

Para a criação de um indicador voltado a circularidade de materiais, foi utilizada a recomendação proposta por Moraga *et al.* (2019), que trata da avaliação do que se pretende medir de forma estruturada, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Modelo de avaliação de para construção de Indicadores de Circularidade



Fonte: Autora adaptado de Moraga *et al.*, (2019)

No que tange aos impactos da construção de indicadores de circularidade, a avaliação provém de dois tipos de medição (Potting *et al.*, 2018): Circularidade Direta e Circularidade Indireta. A medição indireta detém de dados previamente disponíveis enquanto a medição indireta provém de fonte de dados setoriais ou de resultados de pesquisa. Além disso, a avaliação dos indicadores de circularidade envolveu previamente a definição de medidas que podem ser categorizadas em dois enfoques, de acordo com Moraga *et al.* (2010): *Stricto Sensu* e *Lato Sensu*. A definição do *Stricto Sensu* concentra-se em fechar o ciclo dos produtos, estendendo sua vida útil assim como a de seus componentes.

De acordo com Bocken *et al.* (2016), esta abordagem é mais voltada aos aspectos tecnológicos dos produtos. Por outro lado, a definição *Lato Sensu* é mais abrangente, enfatizando a sustentabilidade e os impactos das estratégias circulares

na economia. Para esta dissertação de mestrado a definição do que medir foi baseada no *Stricto Sensu* uma vez que o foco de pesquisa tratou sobre materiais plásticos. Dentro do contexto de criação de indicadores, as diferentes formas de gerá-los a partir de variáveis individuais ou funções de variáveis (tipos de equação) podem ser definidas entre parâmetros, taxas, índices e índices compostos (Moldan *et al.*, 2012). Os parâmetros são medidos que representam uma característica ou um atributo particular de uma medição. As taxas envolvem a relação entre duas ou mais variáveis ao longo de um período. Os índices são valores agregados que resumem informações de diversas variáveis em uma única métrica.

Por fim, os índices compostos são uma forma mais complexa de indicadores que combinam variáveis em único valor usando uma fórmula ponderada. Em resumo, essas diferentes abordagens para gerar indicadores de circularidade permitiram medir e comunicar aspectos específicos de um fenômeno. Com isso, o tipo de medição mais adequado para esta pesquisa foi o tipo de equação por índices compostos, uma vez que a circularidade de materiais envolveu diversos aspectos dos materiais plásticos dentro da escala de implementação de nível micro (produtos e/ou materiais). De acordo com Arbolino *et al.* (2019), o nível de modelagem de causa e efeito refere-se à representação de relações entre variáveis, onde uma variável (causa) influencia ou contribui para o resultado ou efeito observado.

O caso do nível de modelagem de ciclos tecnológicos dentro do contexto da EC refere-se à compreensão de dinâmicas de como produtos e materiais perpassam pelos ciclos de produção-consumo-descarte. Em resumo, de acordo com Moraga *et al.* (2019), para prévia análise de IEC_L e posterior construção do IEC_T com base em indicadores da literatura foi necessária a definição do modelo direcionador fundamentado na definição *stricto sensu* uma vez que os dados foram conseguidos por meio dos trabalhos já existentes na literatura, portanto uma circularidade direta. As equações utilizadas para a construção do IEC_T foram índices que levaram a indicadores compostos por meio dos ciclos tecnológicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do trabalho contemplam a proposta de um indicador de Economia Circular Teórico (IEC_T) que possa avaliar a circularidade de materiais plásticos tendo como base indicadores existentes na literatura. Para tal, o presente capítulo foi segregado em três vertentes, como segue. A primeira seção (seção 4.1) evidencia os resultados da seleção IEC_L. Na seção 4.2 são apresentados os indicadores e métricas dos IEC_L que possam ser aplicados ao indicador proposto (IEC_T) e a seção 4.3 apresenta o IEC_T proposto com base nos indicadores pré-selecionados para a análise. A seção 4.4 apresenta um exemplo de utilização do IEC_T proposto e, por fim, a seção 4.5 retrata a discussão dos resultados.

4.1 SELEÇÃO DE IEC_L PARA CONSTRUÇÃO DO INDICADOR DE CIRCULARIDADE TEÓRICO (IEC_T)

4.1.1 Matriz de priorização de critérios para avaliação de IEC_L aplicados a materiais plásticos

A crescente conscientização sobre os impactos ambientais negativos associados ao uso excessivo e disposição inadequada de materiais plásticos gerou um imperativo global para abordar esses desafios de modo mais eficaz e abrangente. Para tal, foi utilizado como base o estudo “*A vision of a circular economy for plastic*” da Ellen MacArthur Foundation (EMF, 2021). A abordagem do estudo visou transformar radicalmente a relação humana e ambiental com os materiais plásticos, com o objetivo de minimizar o desperdício e maximizar a reutilização, reciclagem e compostagem. Com isso, os seis critérios elaborados pelo estudo foram utilizados para analisar quais indicadores de circularidade voltados ao produto estão mais associados a perspectiva desenvolvida pelo estudo. Os seis critérios utilizados para analisar os 11 indicadores de circularidade encontrados foram: recirculação, reutilização, reciclagem, redução, eficiência energética e substâncias perigosas. Abaixo segue a importância de cada critério utilizado, seus desafios e as implicações práticas de sua implementação (EMF, 2021):

i. Recirculação (C_1): o estudo propõe a eliminação prioritária de embalagens plásticas problemáticas ou dispensáveis por meio de redesenho, inovações e novos modelos de entrega. Reconhece-se que, embora o plástico ofereça diversos benefícios, há produtos no mercado que precisam ser eliminados para alcançar a EC. Além disso, em algumas situações, é possível evitar o uso de embalagens sem comprometer sua utilidade.

ii. Reutilização (C_2): modelos de reutilização são adotados quando relevantes, reduzindo a necessidade de embalagens de uso único. Embora o aprimoramento da reciclagem seja crucial, não é suficiente para resolver os problemas associados ao plástico. Portanto, sempre que possível, modelos de negócio baseados na reutilização devem ser explorados como uma opção preferencial, diminuindo a demanda por materiais descartáveis.

iii. Reciclagem (C_3): o objetivo desse critério é evitar que qualquer plástico seja descartado inadequadamente no meio ambiente. Nesse caso há a responsabilidade compartilhada entre empresas para projetar embalagens de maneira responsável de modo a contribuir com a coleta, reutilização, reciclagem e compostagem efetiva das mesmas.

iv. Redução (C_4): evitar que qualquer plástico seja descartado no meio ambiente, excluindo completamente os aterros sanitários, incineração e conversão de resíduos em energia por meio da redução do seu uso e busca de alternativas ambientalmente corretas que possam substituir o material plástico advindo do petróleo.

v. Eficiência energética (C_5): os recursos de matéria prima virgens devem migrar para fontes renováveis, desde que comprovada a eficácia ambiental e provenientes de fontes gerenciadas de maneira responsável. Além disso, a produção e reciclagem dos materiais plásticos devem ser alimentadas inteiramente por energia renovável.

vi. Substâncias perigosas (C_6): a eliminação do uso de produtos químicos perigosos na fabricação e reciclagem de embalagens é fundamental. É igualmente essencial para respeitar a saúde, segurança e direitos de todos os envolvidos com esses materiais. O plástico é considerado como um potencial contaminante emergente de alta preocupação ambiental e diminuir o potencial de contaminação das substâncias perigosas encontradas nesses materiais exigirá

esforços significativos de investimentos, bem como a perspectiva abrangente de ciclo de vida e sistemas.

4.1.2 Avaliação dos critérios por meio do Gráfico de Venn

A avaliação dos critérios relacionados a materiais plásticos, por ser considerada uma etapa crítica, foi utilizada nessa fase da pesquisa como direcionador para a construção de um indicador de circularidade. Para a realização da matriz de priorização foi utilizado o Diagrama de Venn. Esse diagrama proporcionou uma representação visual das interações entre os diferentes critérios levantados nessa etapa, o que permitiu a análise das inter-relações entre esses critérios. Além de examinar cada um desses critérios individualmente, fez-se essencial compreender como eles se entrelaçam e interagem entre si.

Para tal, essa interconexão é melhor ilustrada por meio do Diagrama de Venn, que permitiu visualizar de maneira clara como os critérios da Tabela 6 se sobrepõem e se complementam. A sobreposição refere-se à área onde dois ou mais conjuntos de critérios se encontram. Esta área representou os elementos que pertencem a todos os conjuntos que estão sendo comparados. Em um gráfico de Venn, a sobreposição é representada pela interseção das diferentes regiões ou círculos, onde eles se cruzam. No caso da complementação (união dos conjuntos) é a área que está fora da sobreposição. Essa área incluiu todos os elementos que pertencem a pelo menos um dos conjuntos, mas não fazem parte da sobreposição. Em outras palavras, é a união de todos os critérios que estão nos conjuntos individuais, mas não na interseção dos conjuntos.

Cada critério foi considerado como um conjunto distinto e as sobreposições entre eles representam as áreas onde esses critérios compartilham preocupações em comum ou influenciam diretamente uns aos outros. Este diagrama nos ajuda a compreender que a busca por um indicador de circularidade para plásticos não é uma abordagem isolada para cada critério, mas sim um esforço integrado que leva em consideração múltiplos fatores interdependentes. Como exemplo, ao explorar o primeiro critério (recirculação) percebe-se que ele se relaciona diretamente com o segundo critério (reutilização). Essa sobreposição no diagrama de Venn indicou que a eliminação de embalagens problemáticas pode ser facilitada por meio da adoção de modelos de reutilização.

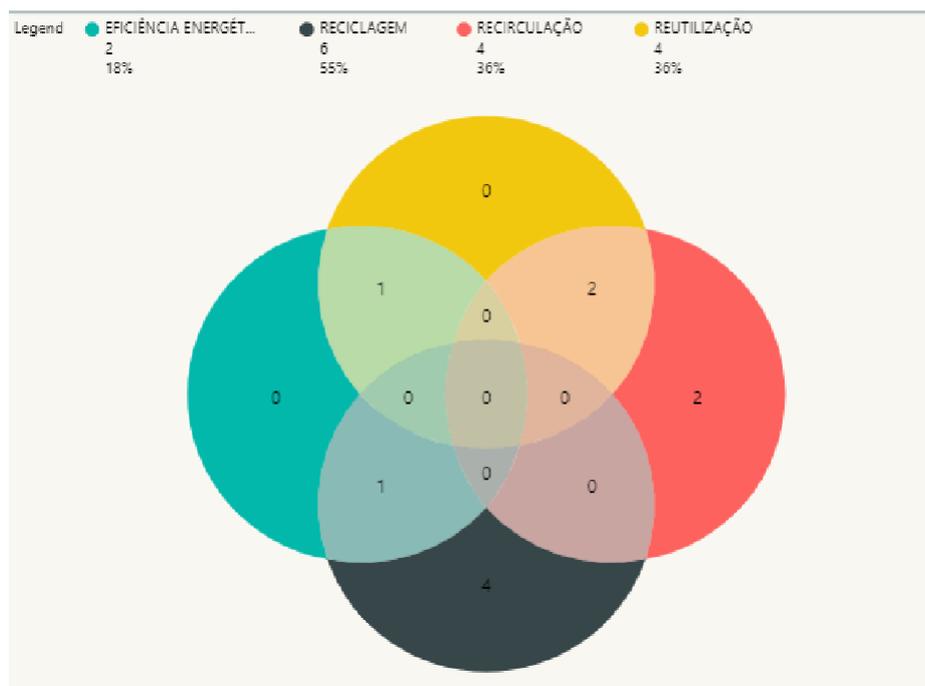
Tabela 6 - Matriz de critérios x IEC_L

NOME IEC_L		C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
IEC_1	Material Reutilization Part (C2C)	x	x		x		
IEC_2	Circular Economy Index (CEI)			x			
IEC_3	Circular Economy Performance Indicator (CEPI)			x		x	
IEC_4	Circularity Material Cycles (CIRC)			x			
IEC_5	Closed Loop Calculator (CLC)		x	x			
IEC_6	End-of-Life Recycling Rates (EoL-RRs)			x			
IEC_7	Material Circularity Indicator (MCI)	x					
IEC_8	Product-Level Circularity Metric (PCM)	x					
IEC_9	Resource Duration Indicator (RDI)	x	x				
IEC_10	Reuse Potential Indicator (RPI)		x			x	
IEC_11	Recycling Rates (RRs)			x			

Fonte: Autora (2023)

Com base na Tabela 6 apresentada, nota-se que os critérios “Reciclagem”, “Recirculação” e “Reutilização” são os mais correlacionados positivamente entre si devido a quantidade de indicadores que abordam esses critérios, enquanto “Redução” está relacionado positivamente com “Eficiência Energética”. No entanto, “Substâncias Perigosas” não apresentou nenhuma relação ou demonstração de relação nos indicadores encontrados.

Figura 11 - Gráfico Venn para critérios de avaliação de IEC_L



Fonte: Autora (2023)

A falta de correlação entre critérios de uma análise identificou também que o aspecto relacionado ao C_6 (Substâncias Perigosas) deve ser tratado de maneira isolada no contexto de análise para materiais plásticos. A Figura 11 demonstrou graficamente a correlação dos critérios de um modo visual gráfico conhecido como Diagrama de Venn. Os artigos selecionados foram escolhidos com base na sua capacidade de relacionar os critérios da pesquisa de forma mais abrangente e significativa. Essa abordagem destacou a importância de identificar trabalhos que apresentem uma integração coerente dos diferentes critérios estabelecidos, fornecendo insights mais profundos e abrangentes sobre o tema em questão.

4.2 INDICADOR DE CIRCULARIDADE TEÓRICO PARA MATERIAIS PLÁSTICOS (IEC_T)

Na seção 2.2.2 do trabalho, uma série de indicadores de circularidade, como o Circular Economy Performance Indicator (CEPI), o Resource Duration Indicator (RDI) e o Reuse Potential Indicator (RPI), foram identificados na literatura. Esses indicadores têm como objetivo medir diferentes aspectos da circularidade de materiais e processos. Na seção 4.1.2, foram analisados os critérios de "Reciclagem", "Recirculação" e "Reutilização", e foi determinado que esses critérios estavam mais fortemente correlacionados com os indicadores CEPI, RDI e RPI. Isso sugere que esses indicadores são os mais adequados para avaliar a circularidade dos materiais plásticos, uma vez que abordam aspectos relevantes de reciclagem, recirculação e reutilização. Portanto, com base nessa análise, foi decidido desenvolver um novo indicador, o Indicador Teórico de Circularidade (IEC_T), especificamente voltado para materiais plásticos. Esse novo indicador foi projetado para abranger de forma abrangente e teórica os aspectos-chave da circularidade na gestão dos plásticos, fornecendo uma métrica sólida e relevante para avaliar o desempenho sustentável nesse domínio. Essa seleção e priorização dos indicadores refletem a capacidade dos estudos em abordar múltiplos critérios de forma coesa, contribuindo para um avanço mais substancial no conhecimento da área de pesquisa em questão, no caso, a gestão sustentável de materiais plásticos dentro do contexto da economia circular.

4.2.1 Circular Economy Performance Indicator (CEPI)

Na busca por indicadores relevantes e aplicáveis à gestão de materiais plásticos dentro do cenário da EC, uma investigação criteriosa revelou que, entre os diversos indicadores analisados, o CEPI se destacou como o único com uma aplicação prática direta e significativa considerando os materiais plásticos. Este indicador, ao contrário de outros, oferece uma abordagem tangível para avaliar o desempenho e eficácia de estratégias de economia circular, destacando sua singularidade e relevância em relação aos demais indicadores.

Com isso, o CEPI é um indicador que trata da proporção entre o benefício ambiental real obtido, ou seja, aquele decorrente da opção de tratamento de resíduos em uso e o benefício ambiental ideal, levando em consideração critérios de qualidade específicos para o fluxo de resíduos em questão. Em essência, o CEPI busca informar uma métrica que avalie o quão eficaz e sustentável é o tratamento de resíduos, comparando o resultado obtido com um ideal baseado em critérios de qualidade ambiental conforme equação 1. No que tange ao tratamento de resíduo, a norma ISO 14044 faz uma distinção entre dois tipos de reciclagem: a reciclagem em circuito fechado (*closed loop*) ocorre quando 'um material de um produto é reciclado no mesmo sistema de produtos', a reciclagem em circuito aberto (*open loop*) ocorre quando 'um material de um sistema de produtos é reciclado em um sistema de produtos diferente'. No entanto, nessa classificação, a relação com a qualidade do material está ausente (Huysman *et al.*, 2017).

$$\text{CEPI} = \frac{\text{benefício atual}}{\text{benefício ideal (qualidade)}} \quad (1)$$

Portanto, o CEPI apresenta a seguinte classificação para as opções de tratamento de resíduos em relação ao plástico:

a) Se o plástico for de alta qualidade, pode ser utilizado para substituir o material virgem original em uma proporção de 1:1 (conhecido como reciclagem em circuito fechado, opção I);

b) Se a qualidade do plástico for menor, existem duas possibilidades: (1) O material reciclado ainda pode substituir o material virgem original, mas não na

mesma proporção 1:1; (2) uma vez que é necessário adicionar material virgem adicional para atender aos mesmos padrões de qualidade (referido como reciclagem em circuito fechado parcial, opção II);

c) O plástico reciclado pode ser utilizado somente em aplicações de baixa qualidade, onde substitui diferentes tipos de materiais (conhecido como reciclagem em circuito aberto, opção III);

d) No cenário mais desfavorável, se a qualidade do plástico for extremamente baixa, a única opção é a incineração para a recuperação de energia (incineração, opção IV).

O indicador CEPI apresenta algumas limitações a serem consideradas. Em primeiro lugar, ele adota uma abordagem simplificada, que se concentra na qualidade do material plástico e nas opções de tratamento, sem levar em consideração as nuances e complexidades do mundo real. Essa simplificação pode não refletir completamente a realidade, onde a qualidade dos materiais reciclados pode variar consideravelmente. Além disso, o CEPI é principalmente ambiental em sua avaliação e não aborda aspectos sociais e econômicos essenciais da economia circular. O indicador também não considera questões como custos, emprego na indústria de reciclagem, impactos econômicos e a justiça social na cadeia de valor.

Outra limitação é que o CEPI foi desenvolvido com foco no plástico e pode não ser facilmente aplicável a outros materiais, que podem ter requisitos de qualidade diferentes. Cada material possui suas próprias características e especificações que podem não se encaixar na estrutura do CEPI. Além disso, o indicador não leva em consideração a revalorização de materiais, como a reutilização de produtos ou a regeneração de materiais. Ele se concentra principalmente na reciclagem, deixando de fora estratégias importantes de economia circular. Por último, mudanças nas classificações de qualidade podem afetar significativamente os resultados do CEPI, o que pode tornar a comparação ao longo do tempo menos confiável. Portanto, é importante considerar essas limitações ao aplicar o indicador CEPI em contextos específicos.

4.2.2 Resource Duration Indicator (RDI)

Como uma avaliação de desempenho, o indicador de longevidade procura mostrar o período de tempo pelo qual um material é mantido em um sistema de produto. Essa retenção é um meio de maximizar a exploração de recursos no mesmo sistema de produto por meio do uso e reutilização do produto, bem como a reciclagem de materiais. Como indicador, a longevidade pode, portanto, ser considerada para adotar uma abordagem baseada em valores, não monetária (Franklin-Johnson *et al.*, 2016). O indicador de longevidade ou *Resource Duration Indicator (RDI)* tem como objetivo mostrar por quanto tempo um material permanece dentro de um sistema de produtos. Isso é importante para maximizar o uso de recursos no sistema, incluindo a reutilização e reciclagem de materiais.

A longevidade é expressa em unidades de tempo, não em valores monetários. Para calcular a longevidade, são realizados cálculos temporais e direcionais. Os cálculos temporais incluem a vida útil inicial do produto, a vida útil ganha por meio de reutilização e a vida útil ganha por meio de reciclagem. Os cálculos direcionais consideram a perda ou retorno de produtos e a reutilização ou reciclagem desses produtos. Em resumo, o indicador de longevidade ajuda a avaliar por quanto tempo os materiais são usados em um sistema de produtos, levando em consideração a reutilização e reciclagem. Ele é expresso em unidades de tempo, e os cálculos envolvem diferentes aspectos do ciclo de vida do produto conforme Equação 2.

$$RDI = A + B + C \quad (2)$$

Onde,

- (A): é caracterizado pela vida útil inicial que é o tempo total em que um produto é usado em seu estado original antes de ser reutilizado ou reciclado. Isso é medido em unidades de tempo, como meses;
- (B): é caracterizado pela vida útil recuperada que é a fórmula que leva em consideração a porcentagem de produtos que são devolvidos, a porcentagem desses produtos que são recondicionados e a duração da vida útil dos produtos recondicionados;
- (C): é caracterizado pela vida útil reciclada que calcula a vida útil que um produto ganha quando seus materiais são reciclados e usados em novos produtos (C). Isso também é expresso em unidades de tempo.

O indicador de longevidade é uma ferramenta útil para avaliar o tempo que os materiais permanecem em um sistema de produtos, mas também tem suas limitações. A simplificação da complexidade é uma delas, já que o indicador simplifica a realidade complexa do ciclo de vida dos produtos e materiais em um único valor, o que pode não capturar completamente todos os fatores relevantes, como variações nas taxas de reutilização e reciclagem. Além disso, o indicador se concentra principalmente no tempo de uso e não leva em consideração a qualidade do produto ou a eficácia da reciclagem, ignorando as variações na qualidade dos produtos reutilizados.

A sensibilidade aos parâmetros de cálculo também é uma limitação, pois a precisão do indicador depende dos parâmetros usados nos cálculos, como as taxas de retorno, recondicionamento e a duração da vida útil dos produtos reconicionados, o que pode resultar em resultados diferentes com pequenas variações. Além disso, a falta de dados precisos para calcular a longevidade no mundo real pode ser um desafio, devido à falta de sistemas de rastreamento adequados para a vida útil de produtos específicos e suas reutilizações e reciclagens. O indicador também carece de uma abordagem econômica, uma vez que se concentra principalmente em aspectos não monetários, não levando em consideração os custos associados à reutilização e à reciclagem, o que pode ser crucial para empresas e organizações. A longevidade não considera a qualidade ambiental dos materiais, deixando de avaliar os impactos ambientais da produção e reciclagem de materiais duráveis.

Por último, o foco limitado do indicador na perspectiva do produto e na extensão de sua vida útil deixa de fora considerações mais amplas, como o contexto social, político e econômico que afeta a reutilização e a reciclagem. Portanto, embora o indicador de longevidade seja útil, é importante reconhecer suas limitações e complementá-lo com outras métricas e abordagens para uma compreensão mais completa da sustentabilidade e eficiência dos sistemas de produtos.

4.2.3 Reuse Potential Indicator (RPI)

O *Reuse Potential Indicator* (RPI) é um indicador de potencial de reutilização que expressa a utilidade do material por um valor real entre 0 e 1. Ele é igual a 0

quando todos os materiais são descartados e igual a 1 quando todos os materiais podem ser reutilizados, conforme apresentado na Figura 12. Se um determinado material secundário tem um valor de potencial de reutilização de 0,45, isso implica que 45% dele pode ser reutilizado por meio das tecnologias atuais. Em outras palavras, o material é considerado 45% "parecido com um recurso" (*resource-like*) ou 55% "parecido com um resíduo" (*waste-like*) (Park; Cherton, 2013).

Figura 12 - Representação do Indicador de Reuso (RPI)



Fonte: Autora adaptado de Park & Cherton (2013)

De acordo com Park e Cherton (2013), embora o indicador de potencial de reutilização não analise diretamente as características físicas, químicas ou mineralógicas de um material, ele reflete indiretamente as características do material como uma função do desenvolvimento tecnológico. Se o potencial de reutilização for alto, significa que o material possui mais componentes que podem ser recuperados por meio da tecnologia disponível. Um baixo potencial de reutilização pode surgir tanto porque o material contém uma alta concentração de elementos tóxicos que são caros de serem removidos, quanto devido à falta de desenvolvimento tecnológico.

O RPI, devido à sua dependência do desenvolvimento tecnológico, é um conceito dinâmico e não inerente aos resíduos em si. Ele varia à medida que novas opções tecnológicas são desenvolvidas, permitindo uma maior recuperação de materiais. Isso significa que o potencial de reutilização é intrinsecamente ligado ao progresso tecnológico e evolui ao longo do tempo. Ele pode ser usado para rastrear como os materiais passam de resíduos a recursos potenciais, representando um processo de evolução ou até mesmo retrocesso. Além disso, o potencial de reutilização é influenciado pela delimitação geográfica, uma vez que a viabilidade da reutilização varia de região para região devido a diferenças na qualidade dos materiais e no nível de desenvolvimento tecnológico. Portanto, é essencial definir claramente o escopo temporal e geográfico ao calcular o potencial de reutilização. Por fim, o potencial de reutilização é afetado pelo volume de geração de resíduos. Se uma quantidade maior de um determinado material é gerada, outras coisas

sendo iguais, a necessidade de desenvolvimento tecnológico aumentaria, e o valor do potencial de reutilização diminuiria na ausência de novas tecnologias.

4.3 FORMULAÇÃO PARA O INDICADOR DE ECONOMIA CIRCULAR TEÓRICO COM BASE NOS INDICADORES SELECIONADOS

Com base nos três indicadores finais pré-selecionados conforme tópico 4.1.2, o indicador proposto nesta pesquisa, chamado de IEC_T, foi introduzido com o propósito de abordar desafios específicos de sustentabilidade e reutilização dentro de um contexto particular. Este indicador proposto baseia-se principalmente nos indicadores CEPI, RDI e RPI. A fórmula foi ponderada para refletir a importância relativa dos componentes de acordo com os objetivos definidos. O IEC_T é um indicador desenvolvido especificamente para abordar questões relacionadas à sustentabilidade e reutilização dentro de um contexto particular, utilizando uma abordagem de economia circular e foi projetado para oferecer uma medida quantitativa do progresso de um material pós-consumo em direção à circularidade, ou seja, quanto efetivamente esse material está sendo reintroduzido na cadeia produtiva.

O Indicador de Economia Circular Teórico proposto tem como possível vantagem análises de sustentabilidade e reutilização. Sua capacidade de personalizar a ponderação dos componentes torna a fórmula flexível, adaptável a diferentes contextos, setores e prioridades específicas. Com isso, os aspectos críticos podem ser acentuados, como a reutilização de materiais, de acordo com objetivos variáveis. A formulação proposta para o Indicador de Economia Circular Teórico ou IEC_T está evidenciado na Equação 3.

$$IEC_T = \frac{CEPI * RPI}{RDI} \quad (3)$$

O indicador CEPI, encontrado na literatura, é definido como a razão entre o benefício atual e o benefício ideal, multiplicado pelo indicador RPI que será representado pela variável Y. O resultado dessa primeira parte da equação é então dividido pelo indicador RDI. Com isso, a equação 4 exemplifica o indicador final proposto. Mediante a aplicação da Equação (4), a organização pode apresentar uma circularidade variando entre 0 a 1 ou 0% a 100% de circularidade.

$$IEC_T = \frac{\text{benefício atual} / \text{benefício ideal} * Y}{A+B+C} \quad (4)$$

O benefício atual na equação é determinado pela taxa de reciclagem (%R) multiplicado pelo impacto evitado na produção de uma nova embalagem virgem, dividido pelo benefício seu ideal (V_{α}). Para Huysman *et al.*, 2017, o benefício ideal é o impacto evitado de energia para a produção virgem de um determinado material sendo representado em unidade de energia (MJ – Mega Joule). A fórmula para cálculo do *Circular Economy Performance Indicator* (CEPI) encontra-se na Eq. 5.

O valor da variável Y, que representa o indicador RPI varia numa escala de 0 a 1 e é um número que reflete a taxa de reuso de um determinado material. Se for igual a 1, não há ajuste na relação, mas se estiver entre 0 e 1, indica que a diferença entre o benefício atual e o ideal deve ser considerada como preponderante na fórmula. Em resumo, a multiplicação do CEPI pela variável Y é um modo para avaliar a eficiência ou desempenho ambiental de um sistema, considerando o benefício real em relação ao potencial de reutilização dos materiais no sistema. Isso pode ajudar a determinar quão bem o sistema está utilizando seus recursos e minimizando seu impacto ambiental. O resultado dessa primeira parte da equação é então dividido pelo RDI que é o somatório da vida útil inicial (A), recuperada (B) e reciclada (C) de um material plástico.

$$CEPI = \frac{\%R.V_{\alpha}}{V_{\alpha}} \quad (5)$$

Ao considerar a relação entre o benefício atual e ideal, multiplicado pelo fator de reutilização e dividido pelo somatório da vida útil do material, o IEC_T ofereceu uma abordagem ponderada para avaliar o desempenho ambiental e a eficácia das práticas de reciclagem e reutilização. Ao multiplicar o CEPI pelo fator de reutilização e dividir pelo somatório da vida útil do material, o IEC_T ofereceu uma maneira eficaz de avaliar a eficiência ambiental de um sistema em relação à reutilização de materiais. Isso não apenas ajuda a determinar quão bem o sistema está utilizando seus recursos, mas também a minimizar seu impacto ambiental, promovendo práticas mais sustentáveis ao longo do ciclo de vida dos materiais.

Algumas vantagens do indicador proposto remetem a sua aplicabilidade e mensuração em nível de processo e organizacional. O indicador proposto variante

representa o quão circular é o sistema em termos de reutilização de material pós consumo. Além disso, a aplicação está direcionada para distintos tipos e ramos de atuação de micro, pequena, média e grande organização. Ainda, a mensuração pretende apontar caminhos mais sustentáveis, atuando com base no planejamento estratégico sustentável, e facilitando assim, as tomadas de decisões. Por outro lado, algumas delimitações fazem parte de qualquer indicador de sustentabilidade. Neste caso, o indicador expressa exclusivamente a mensuração em material e energia e não mensura outras abordagens ambientais e econômicas que podem estar contidas na economia circular.

4.4 CONTEXTO E EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO INDICADOR DE ECONOMIA CIRCULAR TEÓRICO

Complementando os resultados do trabalho, o Indicador de Economia Circular Teórico proposto seguindo as Equações (3) e (4) descritos na seção 4.3 foi contextualizado e exemplificado. O cenário descrito foi meramente hipotético e não representa uma situação real, sendo utilizado apenas como exemplo para fins de discussão. Nesse sentido, foi considerado o processo de fabricação do material plástico denominado Polietileno (PE), que é de uma cadeia complexa e que envolve diversas etapas interligadas. Inicialmente têm-se a matéria-prima básica para a produção do PE é o eteno, que pode ser derivado do petróleo ou do gás natural. O eteno passa por um processo de polimerização, no qual as moléculas de eteno são combinadas para formar cadeias longas de polietileno. Esse processo pode ocorrer em condições de alta pressão e temperatura controlada, ou por meio de processos catalíticos.

Após a polimerização, o polietileno é formado em grânulos ou pellets, que são resfriados e solidificados para facilitar seu manuseio. Esses grânulos de polietileno são então transportados para instalações de processamento, onde são aquecidos e fundidos. Nesse ponto, o polietileno fundido pode ser moldado em diferentes formas e produtos por meio de processos como moldagem por injeção, extrusão ou sopro. No contexto da reciclagem do polietileno pós-consumo, o material utilizado é coletado de resíduos plásticos, como embalagens de alimentos, recipientes e sacolas plásticas. Esse polietileno pós-consumo é separado, triturado e lavado para

remover impurezas. Em seguida, é fundido e moldado novamente em novos produtos plásticos, como embalagens, tubos ou outros itens plásticos.

Esse processo de reciclagem do polietileno desempenha um papel importante na economia circular, pois reduz a necessidade de extrair novas matérias-primas, economiza energia e reduz os resíduos plásticos que acabam em aterros sanitários ou no meio ambiente. Portanto, a cadeia de fabricação e reciclagem do polietileno é um ciclo contínuo que envolve desde a obtenção da matéria-prima até a produção de novos produtos, contribuindo para a sustentabilidade e a redução do impacto ambiental. O processo de fabricação e reciclagem do PE pode ser dividido em dois principais sistemas: reciclagem de ciclo aberto e reciclagem de ciclo fechado.

No sistema de reciclagem de ciclo aberto, o polietileno pós-consumo é coletado, separado e processado em instalações de reciclagem. Nesse processo, o material é triturado, lavado e fundido para produzir grânulos ou *pellets* de polietileno reciclado. Esses grânulos podem então ser utilizados na fabricação de novos produtos plásticos, como embalagens, tubos ou utensílios, porém o material resultante geralmente é de qualidade inferior ao polietileno virgem (GU *et al.*, 2017). Como resultado, o polietileno reciclado pode ser utilizado em uma variedade de aplicações, mas nem sempre é adequado para as mesmas aplicações de alto desempenho do polietileno virgem.

Por outro lado, no sistema de reciclagem de ciclo fechado, o polietileno pós-consumo é coletado, separado e processado da mesma forma que no ciclo aberto. No entanto, a diferença chave ocorre no destino final do material reciclado. No ciclo fechado, o polietileno reciclado é reintroduzido na cadeia de produção do polietileno, sendo utilizado para fabricar novos produtos plásticos com as mesmas características e qualidade do polietileno virgem. Esse processo é chamado de "ciclo fechado" porque o material reciclado retorna diretamente à mesma cadeia de produção, evitando assim a necessidade de extrair novas matérias-primas e reduzindo significativamente o desperdício (GU *et al.*, 2017).

Considerando o uso do Indicador de Economia Circular Teórico (IEC_T) proposto neste estudo e o exemplo de uma embalagem plástica de PE pós consumo com massa (m) de 1 quilograma (kg) e um processo de reciclagem em circuito fechado, onde a proporção é de 1:1, ou seja, 1 quilograma (kg) de PE pós-consumo pode produzir 1kg da mesma embalagem de PE reciclado. Para identificar os valores da taxa de reciclagem e do benefício ideal do polietileno no Brasil foi

utilizado o relatório da Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST) do ano de 2022. De acordo como relatório a taxa de reciclagem do PE no Brasil foi de 32% (0,32) em relação ao total consumido no país no ano de 2022. A energia requerida para a reciclagem mecânica desse material foi igual a 80,95 MJ no mesmo ano (ABIPLAST, 2022).

Com isso, o valor final para o indicador CEPI é igual a 0,32 ou 32%. A fórmula para calcular o *Circular Economy Performance Indicator* (CEPI) pode parecer redundante em sua forma simplificada, pois o benefício ideal (V_{α}), está no numerador e no denominador da equação, resultando em uma divisão que leva ao valor de 1 ou 100%. Portanto, ao considerar a fórmula original, pode-se perceber que, embora matematicamente válida, a presença do benefício ideal tanto no numerador quanto no denominador não altera o resultado do CEPI, já que o benefício ideal é cancelado na divisão. De acordo com Huysman *et al.*, 2017, o valor entre o benefício atual versus benefício ideal só poderá diferir entre si somente se fatores externos da produção do material reciclado forem considerados na fórmula, como exemplo, a quantidade de material perdido durante a reciclagem do PE, taxa de resíduo gerado durante a reciclagem do material, etc. Como esta pesquisa não implica no estudo de caso aprofundado do processo de reciclagem do PE, fez-se necessário considerar a fórmula simplificada.

No que tange ao valor numérico de Y presente na fórmula do IEC_T, é possível salientar que a taxa de reuso de um indicador é uma medida que reflete a proporção entre o total produzido e o total reciclado no mesmo período de tempo, oferecendo uma visão clara da eficácia dos esforços de reciclagem em relação à produção. No contexto do Polietileno (PE), um dos plásticos mais comuns na indústria, a taxa de reuso representa a quantidade de material reciclado em relação à quantidade total produzida durante um determinado ano. No exemplo fornecido, a taxa de reuso do polietileno é calculada dividindo-se o total reciclado pelo total produzido no mesmo ano. No ano de 2022, o total reciclado de PE foi igual a 10,6% da produção total, enquanto a produção total de PE é de 16%, a taxa de reuso pode ser expressa como 10,6% dividido por 16%, resultando em uma taxa de reuso de aproximadamente 0,6625, ou 66,25% (Abiplast, 2022). Nesse caso, o PE é um material que está na escala de “waste like” uma vez que o valor de Y (0,6625) indica que aproximadamente dois terços do polietileno produzido são reciclados e

reutilizados no mesmo ano, enquanto o terço restante pode ser utilizado para outros fins ou pode acabar como resíduo.

O indicador de longevidade, ou *Resource Duration Indicator* (RDI) representado em IEC_T como $\sum A, B, C$, foi a ferramenta fundamental na avaliação do ciclo de vida dos materiais em um sistema de produtos. A longevidade, expressa em unidades de tempo, não monetárias, é calculada por meio de uma equação que leva em conta diferentes aspectos do ciclo de vida do produto. De acordo com o relatório anual sobre da European Commission (2020) denominado *Global Action for Plastics*, o componente (A) representa a vida útil inicial do produto, ou seja, o período total em que um produto é usado em seu estado original antes de ser reutilizado ou reciclado. Nesse caso, A é igual a 54 anos. Já o componente (B) corresponde à vida útil recuperada, que considera a porcentagem de produtos devolvidos, a porcentagem desses produtos que são reconicionados e a duração da vida útil dos produtos reconicionados. Aqui, B equivale a 17 anos. Por fim, o componente (C) representa a vida útil reciclada, ou seja, o tempo que um produto ganha quando seus materiais são reciclados e utilizados em novos produtos. No exemplo, C é igual a 12 anos (European Commission, 2020). Assim, para calcular o *Resource Duration Indicator* (RDI), somamos os valores de A, B e C o que nos trouxe um resultado igual a 83 anos de longevidade do material PE. Com isso, o resultado de IEC_T é igual a 0,25%.

O resultado de 0,25% para o indicador IEC_T, considerando o polietileno (PE) como exemplo, sugere que há desafios significativos relacionados à sustentabilidade e reutilização desse material apesar das limitações do estudo. Isso pode estar ligado a vários aspectos, como a eficiência da reciclagem do PE, que pode ser prejudicada por baixas taxas de reciclagem e dificuldades na separação e processamento do material reciclado. Além disso, a cadeia de suprimentos do PE pode enfrentar obstáculos, como a falta de infraestrutura para coleta e reciclagem adequadas. No entanto, o baixo resultado do indicador IEC_T também destaca oportunidades de melhoria. Identificar áreas específicas de baixo desempenho pode levar a investimentos em tecnologias de reciclagem mais eficientes, desenvolvimento de cadeias de suprimentos sustentáveis e educação do consumidor sobre a importância da reciclagem do PE. Em resumo, o resultado de 0,25% para o indicador IEC_T indica a necessidade de abordar desafios relacionados à sustentabilidade e

reutilização do PE, bem como explorar oportunidades para promover práticas mais sustentáveis ao longo de seu ciclo de vida.

4.5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

O resultado obtido para o Indicador de Economia Circular Teórico (IEC_T) em relação ao Polietileno (PE), que foi de 0,25%, revela uma situação desafiadora em termos de sustentabilidade e circularidade desse material. Esse valor representa uma baixa porcentagem de circularidade do PE, indicando que há uma série de obstáculos e limitações que afetam sua capacidade de ser reintroduzido de forma eficaz na cadeia produtiva. Primeiramente, o baixo resultado do IEC_T sugere que o PE enfrenta dificuldades significativas em termos de reciclagem e reutilização. Isso pode estar relacionado a uma série de fatores, incluindo limitações tecnológicas, falta de infraestrutura adequada, custos elevados de reciclagem e questões relacionadas à qualidade e pureza do material reciclado.

Além disso, o baixo desempenho do PE no IEC_T indica que há uma lacuna significativa entre o potencial de circularidade do material e sua aplicação prática. Embora o PE seja amplamente utilizado na indústria, sua capacidade de ser reciclado e reutilizado de forma eficaz ainda não está sendo totalmente explorada, o que resulta em um desperdício de recursos e um aumento do impacto ambiental associado à produção e descarte do material. Outro aspecto importante a se considerar é o impacto socioeconômico da baixa circularidade do PE. A falta de oportunidades de reciclagem e reutilização pode prejudicar a geração de empregos na indústria de reciclagem, limitar o acesso a materiais reciclados e restringir as oportunidades de inovação e desenvolvimento tecnológico no setor.

O baixo resultado do IEC_T para o PE destaca a necessidade urgente de implementar políticas e estratégias que promovam a economia circular e incentivem a adoção de práticas mais sustentáveis de produção e consumo. Isso inclui investimentos em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem, incentivos fiscais para empresas que adotam práticas sustentáveis, e campanhas de conscientização pública sobre a importância da reciclagem e da redução do desperdício de materiais. É fundamental que governos, empresas, organizações da sociedade civil e indivíduos trabalhem em conjunto para superar esses desafios e construir um futuro mais sustentável e equitativo para todos. Isso requer um

compromisso coletivo com a inovação, a colaboração e a ação decisiva para promover a circularidade dos materiais e garantir um planeta saudável e próspero para as gerações futuras.

A formulação do Indicador de Economia Circular Teórico (IEC_T), baseado nos indicadores CEPI, RDI e RPI, representou uma abordagem inovadora para avaliar a eficácia das práticas de economia circular e a sustentabilidade dos sistemas de produção e consumo. O IEC_T foi concebido com o propósito específico de abordar desafios relacionados à sustentabilidade e reutilização dentro de um contexto particular, oferecendo uma medida quantitativa do progresso de um material pós-consumo em direção à circularidade. Sua formulação flexível e adaptável, refletida na Equação (3), permite personalizar a ponderação dos componentes de acordo com os objetivos e contextos específicos, destacando aspectos críticos, como a reutilização de materiais.

A aplicação do IEC_T em um exemplo hipotético envolvendo o processo de fabricação e reciclagem do Polietileno (PE) oferece insights valiosos sobre a circularidade desse material. No contexto da reciclagem do PE, dois principais sistemas foram identificados: o de ciclo aberto e o de ciclo fechado. O ciclo aberto envolve a reciclagem do PE pós-consumo para produzir novos produtos plásticos de qualidade inferior, enquanto o ciclo fechado reintroduz o PE reciclado na cadeia de produção, mantendo suas características e qualidade originais. A análise do exemplo aplicado do PE revela um resultado de 0,25% para o indicador IEC_T, indicando desafios significativos relacionados à sustentabilidade e reutilização desse material.

Este resultado sugere a necessidade de abordar obstáculos, como baixas taxas de reciclagem, dificuldades na separação e processamento do material reciclado, além da falta de infraestrutura adequada para coleta e reciclagem. No entanto, também destaca oportunidades de melhoria, como investimentos em tecnologias de reciclagem mais eficientes e desenvolvimento de cadeias de suprimentos sustentáveis. A discussão dos resultados do IEC_T no exemplo do PE aponta para a importância de promover práticas mais sustentáveis ao longo do ciclo de vida dos materiais. Identificar áreas específicas de baixo desempenho pode orientar estratégias para superar desafios e maximizar os benefícios da economia circular. Além disso, o IEC_T pode servir como uma ferramenta poderosa para

orientar políticas públicas, práticas empresariais e iniciativas de desenvolvimento sustentável, contribuindo para um futuro mais resiliente e equitativo.

Em suma, a formulação do Indicador de Economia Circular Teórico representa um avanço significativo na avaliação da circularidade dos materiais e na promoção da sustentabilidade. Seu potencial de aplicação abrange uma variedade de setores e contextos, oferecendo uma abordagem ponderada e personalizável para medir o progresso em direção a práticas mais sustentáveis e circulares. A discussão dos resultados do IEC_T destaca a importância de enfrentar os desafios e explorar as oportunidades para construir uma economia mais circular e regenerativa.

Com base nos resultados obtidos através da formulação e aplicação do Indicador de Economia Circular Teórico (IEC_T), torna-se evidente a complexidade e a amplitude dos desafios enfrentados na promoção da sustentabilidade e da circularidade dos materiais. Nesse sentido, é essencial aprofundar a análise dos resultados, explorando diferentes perspectivas e considerando os impactos em diversos níveis da sociedade e da economia. Ao investigar mais detalhadamente o desempenho do IEC_T no contexto do exemplo do Polietileno (PE), é possível identificar uma série de aspectos que influenciam diretamente a circularidade e a sustentabilidade desse material. A começar pela taxa de reciclagem, que se revela como um indicador-chave para medir a eficácia dos esforços de reciclagem e reutilização do PE. Baixas taxas de reciclagem podem ser reflexo de uma série de fatores, como falta de infraestrutura, barreiras logísticas, e até mesmo questões culturais e comportamentais.

Além da taxa de reciclagem, a qualidade e a eficiência dos processos de reciclagem do PE também são determinantes para a sua circularidade. Processos inadequados de separação, limpeza e transformação do material reciclado podem comprometer a sua qualidade e aplicabilidade em novos produtos, reduzindo assim o potencial de reutilização e recirculação do material na economia. Outro aspecto relevante a ser considerado é a viabilidade econômica da reciclagem do PE. Custos elevados de coleta, transporte e processamento do material reciclado podem desestimular investimentos em infraestrutura e tecnologia, limitando assim a expansão da reciclagem e restringindo as oportunidades de circularidade do PE.

Além disso, é importante destacar os impactos ambientais associados à produção e ao descarte do PE. A extração e o processamento das matérias-primas, o consumo de energia, a geração de resíduos e emissões poluentes são apenas

alguns dos aspectos que devem ser considerados ao avaliar a sustentabilidade do PE ao longo de seu ciclo de vida. Diante desse cenário complexo, o papel das políticas públicas, dos incentivos governamentais e das estratégias empresariais se torna fundamental na promoção da economia circular e na mitigação dos impactos ambientais e sociais associados ao PE. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento, incentivos fiscais, regulamentações ambientais e campanhas de conscientização podem contribuir significativamente para a melhoria dos processos de reciclagem e para a promoção de práticas mais sustentáveis de produção e consumo.

A colaboração entre diferentes atores da sociedade, incluindo governos, empresas, academia e sociedade civil, é essencial para enfrentar os desafios e aproveitar as oportunidades de a transição para uma economia mais circular e regenerativa. A cooperação e o compartilhamento de conhecimento podem catalisar a inovação, promover a adoção de melhores práticas e acelerar a transição para um modelo de desenvolvimento mais sustentável e inclusivo. No âmbito empresarial, a adoção de práticas de gestão sustentável e a integração de critérios ambientais, sociais e de governança (ESG) nas estratégias de negócio são cada vez mais reconhecidas como imperativos para a competitividade e a resiliência das organizações. Investimentos em tecnologias limpas, design sustentável, cadeias de suprimentos responsáveis e programas de responsabilidade social corporativa podem não apenas reduzir os impactos negativos das atividades empresariais, mas também gerar oportunidades de inovação, diferenciação e criação de valor compartilhado.

Por fim, é importante ressaltar que os desafios e as oportunidades associados à promoção da economia circular e da sustentabilidade não se restringem ao contexto do PE, mas são pertinentes a uma ampla gama de materiais, produtos e setores da economia. Portanto, é fundamental adotar uma abordagem holística e integrada, que considere as interconexões e as externalidades ao longo de toda a cadeia de valor, buscando soluções inovadoras e colaborativas para os desafios globais de sustentabilidade e desenvolvimento sustentável.

Em resumo, os resultados obtidos através da formulação e aplicação do Indicador de Economia Circular Teórico oferecem insights valiosos sobre a complexidade e os desafios da transição para uma economia mais circular e sustentável. Ao analisar os resultados sob diferentes perspectivas e considerar os

impactos em diversos níveis, é possível identificar oportunidades de melhoria e definir estratégias eficazes para promover a sustentabilidade e a circularidade dos materiais em um mundo cada vez mais interconectado e interdependente.

5 CONCLUSÃO

A economia circular representa uma mudança significativa na abordagem tradicional de produção e consumo, em que os recursos são extraídos, usados e frequentemente descartados, resultando em desperdício e impactos ambientais substanciais. No paradigma da economia circular, o foco recai sobre a reutilização, reciclagem e maximização da vida útil dos materiais, criando um ciclo sustentável de recursos. Nesse cenário, a avaliação de produtos, processos e sistemas sob uma perspectiva de sustentabilidade torna-se imperativa. Os indicadores desempenham um papel fundamental nessa avaliação, fornecendo métricas que quantificam o desempenho ambiental e econômico.

No entanto, a complexidade da economia circular exige abordagens inovadoras para a criação e aplicação de indicadores que se adaptem a contextos variados e em constante evolução. É dentro deste contexto que a fórmula IEC_T proposta emergiu como uma contribuição, oferecendo flexibilidade e personalização na avaliação de sustentabilidade e reutilização de materiais com base em indicadores existentes na literatura. Apesar de ser uma validação teórica, esta dissertação explorou os aspectos-chave dessa fórmula, destacando seus benefícios, bem como a necessidade de validação empírica e direções futuras de pesquisa para consolidar seu papel na promoção de práticas sustentáveis em uma economia circular em constante transformação.

A fórmula criada ofereceu uma abordagem flexível, adaptável e altamente customizável para ponderar os componentes CEPI, RDI e RPI de acordo com os objetivos e necessidades do contexto. A flexibilidade para ajustar a ponderação dos componentes foi uma das características mais notáveis da fórmula. Ela permite que pesquisadores e profissionais personalizem a análise para atender às complexidades e nuances de diferentes cenários. Esta abordagem contextual é fundamental em um campo em constante evolução, onde a importância relativa de aspectos de sustentabilidade pode variar substancialmente. O IEC_T, conforme discutido, é um indicador proposto para avaliar a sustentabilidade e a reutilização dentro de um contexto específico.

Outro aspecto relevante a ser explorado em futuras pesquisas é a integração do indicador IEC_T em sistemas de certificação e avaliação de sustentabilidade. A inclusão desse indicador em certificações ambientais e padrões de desempenho

poderia impulsionar a adoção generalizada de práticas circulares e incentivar as organizações a melhorar seu desempenho ambiental. Além disso, é importante considerar a interoperabilidade do indicador IEC_T com outras métricas e sistemas de avaliação existentes. A integração harmoniosa com ferramentas de análise de ciclo de vida, certificações de produtos e sistemas de gestão ambiental pode facilitar a adoção e a implementação do indicador em diversos contextos organizacionais. Um aspecto crítico a ser abordado é a educação e conscientização sobre os princípios da economia circular e a importância da mensuração de seu impacto. Programas de capacitação e sensibilização podem ajudar a disseminar o conhecimento sobre práticas sustentáveis e promover uma cultura de responsabilidade ambiental em todos os níveis da sociedade e da indústria.

A colaboração entre setores público e privado, bem como o envolvimento de partes interessadas chave, são fundamentais para impulsionar a adoção e implementação de práticas circulares. Parcerias estratégicas entre governos, empresas, instituições de pesquisa e organizações da sociedade civil podem criar sinergias e catalisar a inovação em direção a uma economia mais circular e sustentável. A análise de custo-benefício do uso do indicador IEC_T também merece atenção especial. Avaliar os custos associados à coleta de dados, análise e implementação do indicador em comparação com os benefícios resultantes em termos de economia de recursos, redução de resíduos e melhoria da reputação pode ajudar a justificar o investimento em sua aplicação. Por fim, é fundamental considerar as implicações éticas e sociais da transição para uma economia circular. É necessário garantir que as práticas adotadas promovam a equidade, inclusão e justiça social, evitando impactos negativos sobre comunidades vulneráveis e promovendo o acesso igualitário aos benefícios da sustentabilidade.

No entanto, é importante notar que o indicador IEC_T proposto permanece teórico e não foi testado na prática, sendo essa a principal limitação da pesquisa. Portanto, para que essa abordagem avance, a validação empírica e a condução de estudos de caso são etapas cruciais. Além dessa limitação, destaca-se também a falta de casos práticos de uso de indicadores de economia circular aplicados a plásticos, que pudessem servir como referência a esse trabalho. No exemplo citado, o resultado de 0,25% para o indicador IEC_T indica que há desafios significativos em relação à sustentabilidade e reutilização dos materiais, particularmente no

contexto do polietileno (PE). Esse resultado sugere que, apesar dos esforços, a circularidade dos materiais, especialmente do PE, ainda está abaixo do ideal.

A análise do resultado sugere que há oportunidades de melhoria em termos de eficiência na reciclagem, cadeia de suprimentos, políticas ambientais e educação do consumidor. Identificar áreas específicas de baixo desempenho pode levar a investimentos em tecnologias mais eficientes, desenvolvimento de cadeias de suprimentos sustentáveis e sensibilização sobre a importância da reciclagem. Portanto, o resultado de 0,25% para o indicador IEC_T destaca a necessidade de abordar esses desafios relacionados à sustentabilidade e reutilização dos materiais, enquanto também aponta para oportunidades de promover práticas mais sustentáveis ao longo do ciclo de vida dos materiais, incluindo o polietileno.

Uma outra possibilidade seria a avaliação de impacto, ou seja, investigações sobre o impacto da fórmula IEC_T na tomada de decisões e na formulação de políticas ambientais que possam esclarecer como ela pode contribuir para a promoção de práticas sustentáveis em diferentes cenários. E uma última sugestão para trabalhos futuros seria a definição de diretrizes de aplicação, ou seja, a elaboração de diretrizes e boas práticas para a aplicação da fórmula em diversos contextos, pois essas são essenciais para garantir que o IEC_T seja usado de maneira consistente e eficaz. Em resumo, o indicador IEC_T representa uma abordagem para a avaliação de sustentabilidade e reutilização de materiais, em especial, a materiais plásticos.

No entanto, para atingir seu potencial pleno, é fundamental que pesquisadores, profissionais e partes interessadas se envolvam em estudos empíricos e colaborações contínuas para testar, validar e refinar essa inovadora métrica. À medida que a fórmula e o indicador amadurecem, aumenta-se o potencial de se tornar uma ferramenta útil para promover práticas sustentáveis e a economia circular em diversas áreas da indústria de materiais plásticos e da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST. **Perfil Plástico - Indústria brasileira de transformação de material plástico**, [S.1: s.n], 2015. Disponível em:

<https://www.Abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2015/>. Acesso em: 15 ago. 2021.

ABIPLAST. **Perfil Plástico - Indústria brasileira de transformação de material plástico**, [S.1: s.n], 2017. Disponível em: <https://www.Abiplast.org.br/wp-content/uploads/2019/03/Perfil-2017.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2021.

AL HOSNI, Asma S.; PITTMAN, Jon K.; ROBSON, Geoffrey D. Microbial degradation of four biodegradable polymers in soil and compost demonstrating polycaprolactone as an ideal compostable plastic. **Waste Management**, v. 97, p. 105-114, 2019.

ATKINSON, R.; FLINT, J. Accessing Hidden and Hard-to-Reach Populations: Snowball Research Strategies. **Social Research Update**, v. 33, p.1-4, 2001.

ARBOLINO, Roberta; BOFFARDI, Raffaele; IOPPOLO, Giuseppe. An insight into the Italian chemical sector: How to make it green and efficient. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, p. 121674, 2020.

AZEVEDO, S.G.; GODINA, R.; MATIAS, J.C.O. Proposal of a sustainable circular index for manufacturing companies. **Resources**, v. 6, p. 63, 2017.

BARBOSA, R. F. M.; KARL, A. A.; OLIVEIRA, N. P.; CAMPOS, L; M. de Souza. Análise do contexto da geração e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil após a instauração da PNRS. **XLI Encontro Nacional de Engenharia de Produção – ENEGEP**. Brasil, 2021.

BOCKEN, N. M.; DE PAUW, I.; BAKKER, C.; VAN DER GRINTEN, B. Product design and business model strategies for a circular economy. **Journal of industrial and production engineering**, v. 33, n. 5, p. 308-320, 2016.

BOS, Harriëtte L.; BROEZE, Jan. Circular bio-based production systems in the context of current biomass and fossil demand. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 14, n. 2, p. 187-197, 2020.

BRADLEY GUY, G.; KIBERT, C. J. Developing indicators of sustainability: US experience. **Building Research & information**, v. 26, n. 1, p. 39-45, 1998.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010)**. Brasília: Diário Oficial da União, 2010.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **Framework for implementing the principles of the circular economy in organizations-guide**. BSI, 2017.

BUSCH, J.; STEINBERGER, J. K.; DAWSON, D.A.; PURNELL, P.; ROELICH, K. Managing Critical Materials with a Technology-Specific Stocks and Flows Model. **Environmental Science & Technology**, v. 48, n. 2, p.1298-1305, 2014.

CAIXETA, D.; MORAIS, E.; CAIXETA, F.; CAIXETA, I. Microplásticos como indicadores de poluição ambiental e seus efeitos sobre os organismos. **Enciclopedia biosfera**, [S. l.], v. 19, n. 40, 2022.

CANGEMI, José Marcelo; SANTOS, Antonia Marli dos; CLARO NETO, Salvador. Biodegradação: Uma alternativa para minimizar os impactos decorrentes dos resíduos plásticos. **Química nova na escola**, v. 22, p. 17-21, 2005.

CAPELLINI, Marco. Measure the Circularity of a Public Lighting System. Sustainable Design & Consulting: 2015. Disponível em: <https://www.capcon.it/en/measure-the-circularity-of-a-public-lighting-system/> . Acesso em: 9 Out. 2023.

CAYZER, Steve; GRIFFITHS, Percy; BEGHETTO, Valentina. Design of indicators for measuring product performance in the circular economy. **International Journal of Sustainable Engineering**, v.10, n. 4-5, p. 289-298, 2017.

CHEN, Yuedong; CUI, Z.; CUI, X.; LIU, W.; WANG, X.; LI, X.; LI, S. Life cycle assessment of end-of-life treatments of waste plastics in China. **Resources, Conservation and Recycling**, v.146, p. 348-357, 2019.

CIRAIG. **Circular Economy: A Critical Literature Review of Concepts**. Centre for the Life Cycle of Products Processes and Services: Montreal, 2015.

COBO, Manuel J.; LÓPEZ-HERRERA, A. G.; HERRERA-VIDEIRA, E.; HERRERA, F. Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. **Journal of the American Society for information Science and Technology**, v. 62, n.7, p.1382-1402, 2011.

COOK, H. P. **Rethinking progress**. Bradford University, 2015.

CORONA, B.; SHEN, L.; REIKE, D.; ROSALES CARREON, J.; WORRELL, E. Towards sustainable development through the circular economy—a review and critical assessment on current circularity metrics. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 151, p. 104498, 2019.

COX, Kieran D.; COVERNTON, G. A.; DAVIES, H. L.; DOWER, J. F.; JUANES, F.; DUDAS, S. E. Human consumption of microplastics. **Environmental science & technology**, v. 53, n.12, p. 7068-7074, 2019.

CRAMER, Jacqueline. The raw materials transition in the Amsterdam metropolitan area: Added value for the Economy, Well-Being, and the Environment. **Environment: Science and Policy for Sustainable Development**, v. 59, n. 3, p. 14-21, 2017.

CULLEN, J.M. Circular economy: Theoretical benchmark or perpetual motion machine?. **Journal of industrial Ecology**, v.21, n.3, p.483-486, 2017.

DAHL, Arthur Lyon. Achievements and gaps in indicators for sustainability. **Ecological indicators**, v. 17, p. 14-19, 2012.

DE SÁ, Luís Carlos; LUÍS, Luís G.; GUILHERMINO, Lúcia. Effects of microplastics on juveniles of the common goby (*Pomatoschistus microps*): confusion with prey, reduction of the predatory performance and efficiency, and possible influence of developmental conditions. **Environmental pollution**, v.196, p. 359-362, 2015.

DI MAIO, F.; REM, P.C. A robust indicator for promoting circular economy through recycling. **Journal of Environmental Protection**, v. 6, n. 10, p.1095-1104, 2015.

DI MAIO, F.; REM, P.C; BALDE, K.; POLDER, M. Measuring resource efficiency and circular economy: a market value approach. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p.163, 2017.

DONIA, E.; MINEO, A. M.; SGROI, F. A methodological approach for assessing business investments in renewable resources from a circular economy perspective. **Land Use Policy**, v. 76, p. 823-827, 2018.

ESCOBAR HUERFANO, Francisco. **Embriotoxicidad y teratogenicidad inducida por fluconazol sobre Danio rerio**. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de México. 2022. Disponível em: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/137980>. Acesso em: 20 out.2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Towards a circular economy**: A zero waste programme for Europe. Brussels: European Commission, 2014. Disponível em: <https://ec.europa.eu/environment/pdf/circular-economy/circular-economy-communication.pdf> Acesso em: 21 mai. 2021.

EUROPEAN COMMISSION. **Closing the loop - an EU action plan for the circular economy**. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 2015. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>. Acesso em: 20 mai. 2021.

EUROPEAN COMMISSION. *Closing the loop - Global Action for Plastics* Brussels: European Commission, 2020. Disponível em: <https://ec.europa.eu/environment/pdf/circular-economy/circular-economy-communication.pdf> Acesso em: 7 Out. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Circular Impacts Project EU**. 2016. Disponível em: <http://circularimpacts.eu/start>. Acesso em: 8 Out.2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Eurostat: Circular Economy Overview**. 2017. Disponível em: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/overview>. Acesso em: 7 Out. 2023.

EUROPEAN COMMISSION. **Closing the loop – Global Action on Plastics**. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels, 2020. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>. Acesso em: 20 mai. 2021.

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY (EEA). **Circular Economy in Europe – Developing the Knowledge Base**. EEA Report No 2/2016. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/circular-economy-in-europe>. Acesso em: 7 Out. 2023.

EVANS, Jamie; BOCKE, N.. **Circular Economy Toolkit**. Cambridge Institute for Manufacturing, 2013. Disponível em: <http://circulareconomytoolkit.org>. Acesso em: 7 Out. 2023.

FOGARASSY, Csaba; KOVÁCS, A.; HORVÁTH, B.; BÖRÖCZ, M. The development of a circular evaluation (CEV) tool—case study for the 2024 Budapest Olympics. **Hungarian Agricultural Engineering**, v. 31, p. 10-20, 2017.

FRANKLIN-JOHNSON, Elizabeth; FIGGE, Frank; CANNING, Louise. Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance. **Journal of Cleaner Production**, v.133, p.589-598, 2016.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N.M.; HULTINIK, E.J. The circular economy - a new sustainability paradigm? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757-768, 2016.

GENG, Y.; SARKIS, J.; ULGIATI, S.; ZHANG, P. Measuring China's circular economy. **Science**, v. 339, n. 6127, p. 1526-1527, 2013.

GENG, Yong, et al. Towards a national circular economy indicator system in China: an evaluation and critical analysis. **Journal of cleaner production**, v. 23, n. 1, p. 216-224, 2012.

GENOVESE, Andrea; ACQUAYE, Adolf.A.; FIGUEROA, Alejandro; KOH, S.C.Lenny. Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications. **Omega**, v. 66, p. 344-357, 2017.

GEYER, R.; KUCZENSKI, B.; ZINK, T.; HENDERSON, A. Common misconceptions about recycling. **Journal of Industrial Ecology**, V. 20, p. 1010–1017, 2016.

GESAMP. **Guidelines for the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean** (eds Kershaw P.J., Turra A. and Galgani F.). London, UK, GESAMP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, 130pp. (GESAMP Reports and Studies, No. 99), 2020.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner production**, v. 114, p. 11-32, 2016.

GIURCO, Damien; MCLELLAN, B.; FRANKS, D.M.; NANSAI, K.; PRIOR, T. Responsible mineral and energy futures: views at the nexus. **Journal of cleaner production**, v. 84, p. 322-338, 2014.

GODINHO, Iasmin Ferreira da Cruz. **Ecotoxicidade do plástico em ambiente marinho—contributos para um modelo de impacte ambiental**. Instituto Politécnico de Leiria. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente. 2021.

GORNI, A. A. Introdução aos Plásticos. **Plástico Industrial**, São Paulo, v. 10, n. 09, 2003.

GRAEDEL, T. E.; ALLWOOD, J.; BIRAT, J. P.; BUCHERT, M.; HAGELÜKEN, C.; RECK, B. K.; SONNEMANN, G. What do we know about metal recycling rates?. **Journal of Industrial Ecology**, v.15, n. 3, p. 355-366, 2011.

GU, F.; GUO, J.; ZHANG, W.; SUMMERS, P. A.; HALL, P. From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. **Science of the total environment**, v. 601, p. 1192-1207, 2017.

GUAMÁ, FFM, et al. **Lixo Plástico-de sua produção até a madeira plástica**. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Anais..., RJ, Brasil, 2008, 13p.

GUOGANG, Jiang; JING, Chen. **Research on evaluation of circular economy development**. In: Proceedings of the 8th International Conference on Innovation & Management. Kitakyushu, Japan. p. 153-157, 2011.

C2C. **Impact Study**: Technical ReportdPilot Study Impact Study of the Cradle to Cradle Certified Products Program. Cradle to Cradle Products Innovation Institute: Oakland, CA, 2014. Disponível em: www.c2ccertified.org/impact-study. Acesso em: 12 Out. 2023.

HABIB, K. A product classification approach to optimize circularity of critical resources – the case of Nd-Fe-B magnets. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p.90-97, 2019.

HAAS, Willi; KRAUSMANN, F.; WIEDENHOFER, D.; HEINZ, M. How circular is the global economy?: An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European Union and the world in 2005. **Journal of industrial ecology**, v.19, n.5, p. 765-777, 2015.

HARTMANN, N.B.; HÜFFER; T., THOMPSON, R.C.; HASSELLOV, M.; VERSCHOOR, A.; DAUGAARD, A.E.; RIST, S.; KASSON, T.; BRENNHOLT, N.; COLE, M.; HERRLING, M.P.; HESS, M.C., IVLEVA; N. P.; LUSHER, A.L.; WAGNER, M. Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. **Environmental Science & Technology**. v.53, n.3, p.1039–1047, 2019.

HOUSE, OF COMMONS. Growing a circular economy: Ending the throwaway society. **HC-214. Londres: House of Commons/Environmental Audit Committee**, v. 18, p. 434A-441A, 2014.

- HUYSMAN, S.; DE SCHAEPMEESTER, J.; RAGAERT, K.; DEWULF, J.; DE MEESTER, S. Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. **Resources, conservation and recycling**, v.120, p. 46-54, 2017.
- JAMBECK, J. R.; GEYER, R.; WILCOX, C.; SIEGLER, T. R.; PERRYMAN, M.; ANDRADY, A.; NARAYAN, R.; LAW, K. L. Plastic waste inputs from land into the ocean. **Science**, v. 347, n. 6223, p. 768-771, 2015.
- KRAMM, Johanna; VÖLKER, Carolin. **Understanding the risks of microplastics: a social-ecological risk perspective**. Springer International Publishing, 2018.
- KINGFISHER. **The Business Opportunity of Closed Loop Innovation**: Closed Loop Innovation Booklet. Kingfisher: Westminster, UK, 2014. Disponível em: https://www.kingfisher.com/content/dam/kingfisher/Corporate/Documents/Sustainability/Reports_publications/2013/kingfisher_closed_loop_innovation.pdf. Acesso em: 7 Out. 2023.
- KIRCHHERR, Julian; REIKE, Denise; HEKKERT, Marko. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, conservation and recycling**, v. 127, p. 221-232, 2017.
- KRISTENSEN, H. S.; MOSGAARD, M. A.. A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability?. **Journal of Cleaner Production**, v. 243, p.11853, 2020.
- KROON, F.J.; BERRY, K.L.E.; BRINKMAN, D.L.; KOOKANA, R.; LEUSCH, F.D.L.; MELVIN, S.D. Sources, presence and potential effects of contaminants of emerging concern in the marine environments of the Great Barrier Reef and Torres Strait, Australia. **Science of the Total Environment**, v. 719, p. 135140, 2020.
- LI, H.; BAO, W.; XIU, C.; ZHANG, Y.; XU, H. Energy conservation and circular economy in China's process industries. **Energy**, v. 35, n.11, p. 4273-4281, 2010.
- LIEDER, Michael; ASIF, Farazee MA; RASHID, Amir. Towards Circular Economy implementation: an agent-based simulation approach for business model changes. **Autonomous Agents and Multi-Agent Systems**, v. 31, p. 1377-1402, 2017.
- LINDER, M.; SARASINI, S.; VAN LOON, P. A metric for quantifying product-level circularity. **Journal of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 545-558, 2017.
- LOHMANN, Rainer. Correction to critical review of low-density polyethylene's partitioning and diffusion coefficients for trace organic contaminants and implications for its use as a passive sampler. **Environmental Science & Technology**, v. 49, n. 6, p. 3985-3985, 2015.
- MACARTHUR, Ellen. Circularity indicators: An approach to measuring circularity. **Methodology**, v. 23, 2015.

MAGNIER, C., et al. **Key Indicators for Monitoring the Circular Economy**. The Monitoring and Statistics Directorate (SOeS): Paris, 2017. Disponível em: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/datalab-18-economie-circulaire-Edition-2017-anglais.pdf> . Acesso em: 8 Out. 2023.

MAY, Peter; LUSTOSA, Maria Cecília; VINHA, Valéria. **Economia do meio ambiente**. Elsevier Brasil, 2010.

MCDONOUGH, William; BRAUNGART, Michael. **Cradle to cradle: Remaking the way we make things**. North point press, 2010.

MILLER, T.H.; BURY, N.R.; OWEN, S.F.; MACRAE, J.I.; BARRON, L.P. A review of the pharmaceutical exposome in aquatic fauna. **Environmental pollution**, v. 239, p. 129-146, 2018.

MOHANTY, Amar K.; MISRA, Manjusri; DRZAL, Lawrence T. (ed.). **Natural fibers, biopolymers, and biocomposites**. CRC press, 2005.

MOLDAN, Bedřich; JANOUŠKOVÁ, Svatava; HÁK, Tomáš. How to understand and measure environmental sustainability: Indicators and targets. **Ecological indicators**, v. 17, p. 4-13, 2012.

MORAGA, G.; HUYSVELD, S.; MATHIEUX, F.; BLENGINI, G.A.; ALAERTS, L.; VAN ACKER, K.; DE MEESTER, S.; DEWULF, J. Circular economy indicators: what do they measure? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 146, p. 452–461, 2019.

PARCHOMENKO, A.; NELEN, D., GILLABEL, J.; RECHBERGER, H. Measuring the circular economy-A Multiple Correspondence Analysis of 63 metrics. **Journal of cleaner production**, v. 210, p. 200-216, 2019.

PAULIUK, Stefan; KONDO, Y.; NAKAMURA, S.; NAKAJIMA, K. Regional distribution and losses of end-of-life steel throughout multiple product life cycles—Insights from the global multiregional MaTrace model. **Resources, Conservation and Recycling**, v.116, p. 84-93, 2017.

PARK, Joo Young; CHERTOW, Marian R. Establishing and testing the “reuse potential” indicator for managing wastes as resources. **Journal of environmental management**, v. 137: p. 45-53, 2014.

PERTUSSATTI, Caroline Alvarenga. **Gestão ambiental de resíduos plásticos no Brasil: subsídios para uma diretriz nacional**. Escola Nacional de Administração Pública (Enap). Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Especialista em Gestão Pública. 2020. Disponível em: <https://repositorio.enap.gov.br/handle/1/5134>. Acesso em: 21 out. 2023.

PLASTICSEUROPE. **Plastics - the facts 2016**. An analysis of European plastics production, demand and waste data. Disponível em: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2016-Plastic-the-facts.pdf>. Acesso: 14 dez. 2021.

PLASTICSEUROPE. **Plastics - the Facts 2018**. An analysis of European plastics production, demand and waste data. 2018. Disponível em: <https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/10/2018-Plastics-the-facts.pdf> . Acesso em: 12 dez. 2021.

PLASTICSEUROPE. **Plastics - the facts 2019**. An analysis of European plastics production, demand and waste data. 2019. Disponível em: <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/1804-plastics-facts-2019>. Acesso em: 24 mai. 2023.

PLASTICSEUROPE. **How plastics are made**. [s.n, 20-]. Disponível em: <https://plasticseurope.org/plastics-explained/how-plastics-are-made/>. Acesso em: 19 maio.2023.

POTTING, J.; HANEMAAIJER, A.; DELAHAYE, R.; GANZEVLES, J.; HOEKSTRA, R.; LIJZEN, J. Circular economy: what we want to know and can measure. **Framework and baseline assessment for monitoring the progress of the circular economy in the Netherlands**, v. 92, 2018.

PRIETO-SANDOVAL, Vanessa; JACA, Carmen; ORMAZABAL, Marta. Towards a consensus on the circular economy. **Journal of cleaner production**, v. 179, p. 605-615, 2018.

QING, Yang; QIONGQIONG, Gao; MINGYUE, Chen. Study and integrative evaluation on the development of circular economy of Shaanxi province. **Energy Procedia**, v. 5, p.1568-1578, 2011.

RAJENDRAN, Saravanan, et al. A critical review on various remediation approaches for heavy metal contaminants removal from contaminated soils. **Chemosphere**, v.287, p. 132369, 2022.

RESCOM, Resource Conservative Manufacturing Project. **The ResCoM platform and tools**. Disponível em: <https://www.rescoms.eu/platform-and-tools.html>. Acesso em: 10 Out. 2023.

ROCHMAN, C.M; MANZANO, C.; HENTSCHEL, B. T.; SIMONICH, S. L. M.; HOH, E. Polystyrene plastic: a source and sink for polycyclic aromatic hydrocarbons in the marine environment. **Environmental science & technology**, v.47, n. 24, p. 13976-13984, 2013.

ROOS LINDGREEN, Erik; SALOMONE, Roberta; REYES, Tatiana. A critical review of academic approaches, methods and tools to assess circular economy at the micro level. **Sustainability**, v. 12, n. 12, p. 4973, 2020.

- ROSSETO, Marieli; KREIN, D.D.C.; BALBÉ, N.P.; DETTMER, A. Starch–gelatin film as an alternative to the use of plastics in agriculture: a review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n.15, p.6671-6679, 2019.
- ROGOWSKA, Justyna; CIESZYNSKA-SEMENOWICZ, M.; RATAJCZYK, W.; WOLSKA, L. Micropollutants in treated wastewater. **Ambio**, v. 49, p.487-503, 2020.
- SAIDANI, M.; YANNOU, B.; LEROY, Y.; CLUZEL, F.; How to assess product performance in the circular economy? Proposed requirements for the design of a circularity measurement framework. **Recycling**, v. 2, n. 1, p. 6, 2017.
- SAIDANI, M.; YANNOU, B.; LEROY, Y.; CLUZEL, F.; KENDALL, A. A taxonomy of circular economy indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 207, p. 542–559, 2019.
- SASSANELLI, C.; ROSA, P.; ROCCA, R.; TERZI, S. Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 229, p.440-453, 2019.
- SEHNEM, S. Circular business models: babbling initial exploratory. **Environmental Quality Management**, v. 28, n. 3, p. 83-96, 2019.
- SENATHIRAJAH, A.B.; KEMP, A.; SAARIST, M.; ISHIZUKA, S.; PALANISAMI, T. Polymer prioritization framework: A novel multi-criteria framework for source mapping and characterizing the environmental risk of plastic polymers. **Journal of Hazardous Materials**, v. 429, p. 128330, 2022.
- SCHEEPENS, Arno E.; VOGTLÄNDER, J. G.; BREZET, J. C. Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: Making water tourism more sustainable. **Journal of cleaner production**, v.114, p. 257-268, 2016.
- SENYEK, M.L. **Isoprene polymers**. In: MARK, H.F.(Ed.). Encyclopedia of Polymer Science and Technology. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, New Jersey, 2008.
- SHAH, Aamir Ishaq; DAR, M. U. D.; BHAT, R. A.; SINGH, J. P.; SINGH, K.; BHAT, S. A. Prospectives and challenges of wastewater treatment technologies to combat contaminants of emerging concerns. **Ecological Engineering**, v.152, p. 105882, 2020.
- SHIELDS, Deborah J.; ŠOLAR, Slavko V.; MARTIN, Wade E. The role of values and objectives in communicating indicators of sustainability. **Ecological Indicators**, v. 2, n. 1-2, p. 149-160, 2002.
- SMOL, Marzena; KULCZYCKA, Joanna; AVDIUSHCHENKO, Anna. Circular economy indicators in relation to eco-innovation in European regions. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v.19, p. 669-678, 2017.
- STAHEL, Walter R.. **The Circular Economy: a user's guide**. Routledge, 2019.

SU, Biwei; HESHMATI, A.; GENG, Y.; YU, X. A review of the circular economy in China: moving from rhetoric to implementation. **Journal of cleaner production**, v. 42, p. 215-227, 2013.

TALWAR, S. **Circular Economy indicators for India: a scientific macro assessment of 5 circular economic measures, and their comparative performance to global industrial hubs.** In: ISIE-ISSST 2017 Conference: Science in Support of Sustainable and Resilient Communities. Chicago, USA. 2017.

US Chamber Foundation. **Measuring Circular Economy.** Circular Economy Toolbox: USA, 2017. Disponível em: <https://www.uschamberfoundation.org/circular-economytoolbox/about-circularity/measuring-circular-economy>. Acesso em: 10 Out. 2023.

VAN BUREN, Nicole; DEMMERS, M.; VAN DER HEIJDEN, R.; WITLOX, F. Towards a circular economy: The role of Dutch logistics industries and governments. **Sustainability**, v.8, n. 7, p. 647, 2016.

VAN SCHAİK, Antoinette; REUTER, Markus A. Recycling indices visualizing the performance of the circular economy. **World Metall. Erzmetall**, v. 69, n. 4, 2016.

VAN EYGEN, Emile; LANER, David; FELLNER, Johann. Integrating high-resolution material flow data into the environmental assessment of waste management system scenarios: The case of plastic packaging in Austria. **Environmental science & technology**, v. 52, n. 19, p.10934-10945, 2018.

VBDO. **Circular Economy.** Company Assessment Criteria: Utrecht, Netherlands, 2015.

VIKTORIA SWEDISH, I. C. T. **Measuring business model circularity as a means to promote resource productivity.** Viktoria Swedish ICT, 2015.

WANG, Sunan; NIE, Shaoping; ZHU, Fan. Chemical constituents and health effects of sweet potato. **Food Research International**, v. 89, p. 90-116, 2016.

WANG, L.; WU, W.; BOLAN, N.S; TSANG, D.C.W; LI, Y.; QIN, M.; HOU, D. Environmental fate, toxicity and risk management strategies of nanoplastics in the environment: Current status and future perspectives. **Journal of hazardous materials**, v. 401, p. 123415, 2021.

WANG, F.; WANG, Q.; ADAMS, C.A.; SUN, Y.; ZHANG, S. Effects of microplastics on soil properties: current knowledge and future perspectives. **Journal of Hazardous Materials**, v. 424, p. 127531, 2022.

WEN, Zongguo; MENG, Xiaoyan. Quantitative assessment of industrial symbiosis for the promotion of circular economy: a case study of the printed circuit boards industry in China's Suzhou New District. **Journal of Cleaner Production**, v. 90, p. 211-219, 2015.

WEETMAN, C. **Economia Circular: conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa.** conceitos e estratégias para fazer negócios de forma mais inteligente, sustentável e lucrativa. São Paulo: Autêntica Business, 2019. 512 p.

WILLIS, K.; MAUREAUD, C.; WILCOX, C.; HARDESTY, B.D. How successful are waste abatement campaigns and government policies at reducing plastic waste into the marine environment?. **Marine Policy**, v. 96, p. 243-249, 2018.

WORLD WILDLIFE FUND (WWF). **Brasil é o 4º país do mundo que mais gera lixo plástico.** Publicado em 4 de março de 2019. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?70222/Brasil-e-o-4-pais-do-mundoque-mais-gera-lixo-plastico>. Acesso em: 29 jan.2020.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED). **Our Common Future**. Chapter 2: Towards Sustainable Development. 1987. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/milestones/wced>. Acesso em: 16 jun. 2021.

WU, H.Q.; SHI, Y.; ZHU, W. D.Effectiveness of the policy of circular economy in China: A DEA-based analysis for the period of 11th five-year-plan. *Resources, conservation and recycling*, v. 83, p. 163-175, 2014.

ZABANIOTOU, A. Redesigning a bioenergy sector in EU in the transition to circular waste-based Bioeconomy-A multidisciplinary review. **Journal of Cleaner Production**, v.177, p.197-206, 2018.

ZHOU, Zhifang; CHEN, Xiaohong; XIAO, Xu. On evaluation model of circular economy for iron and steel enterprise based on support vector machines with heuristic algorithm for tuning hyper-parameters. **Applied mathematics & information sciences**, v. 7, n. 6, p. 2215, 2013.

ZICCARDI, Linda M.; EDGINGTON, A.; HENTZ, K.; KULACKI, K. J.; KANE DRISCOLL, S.. Microplastics as vectors for bioaccumulation of hydrophobic organic chemicals in the marine environment: A state-of-the-science review. **Environmental toxicology and chemistry**, v. 35, n. 7, p.1667-1676, 2016.