

CENTRO DE TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA SENAI: CENTRO DE TECNOLOGIA DA
INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL

Priscila Maria dos Santos Spata

Aplicação de Indicador de Circularidade na Indústria de Polímeros:

Um estudo de caso em garrafas PET.

Rio de Janeiro

2022

Priscila Maria dos Santos Spata

Aplicação de Indicador de Circularidade na Indústria de Polímeros:

Um estudo de caso em garrafas PET.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em engenharia química, da Faculdade de Engenharia Química SENAI CETIQT, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

Orientador(a): André Luiz Carneiro Simões

Rio de Janeiro

2022

Ficha Catalográfica

n. autor Spata, Priscila Maria dos Santos Spata

Aplicação de indicador de circularidade na indústria de polímeros: um estudo de caso em garrafas pet/ Priscila Maria dos Santos Spata, -2021 entrega.

nº. f. : il.

Orientador: André Luiz Carneiro Simões

Monografia Graduação Bacharel em Engenharia Química - Faculdade Senai Cetiqt, Riachuelo, Rio de Janeiro, 2021.

1. Economia Circular. 2. Indicador de circularidade. 3. MCI. 4. Garrafa PET. 5. Polímeros. I. Aplicação de indicador de circularidade na indústria de polímeros: um estudo de caso em garrafas pet.

CDD

Priscila Maria dos Santos Spata

Aplicação de Indicador de Circularidade na Indústria de Polímeros:

Um estudo de caso em garrafas PET.

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em engenharia química, da Faculdade de Engenharia Química SENAI CETIQT, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

Aprovada em:

Aprovado por:

Orientador: André Luiz Carneiro Simões

Banca Examinadora:

Leticia Quinello Pereira, Doutora em Ciências e Ciências de Polímeros, Senai Cetiq

Mauro de Cresta de Barros Dolinsky, Doutor em Química, Universidade Católica de Petrópolis

Michelle Reich, Mestre em Biologia, Senai Cetiq

Rio de Janeiro

2022

Dedico este trabalho a minha família, principalmente aos meus avós.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo apoio espiritual que me concedeu para chegar a este momento.

Aos meus pais Lucas e Denise; e a minha irmã Patricia, por todo o suporte para a realização de mais um sonho.

Aos meus amigos Mariana Mello, Ricardo Tarlé, Ana Carla Passeri e Alberto Queiroz que estiveram ao meu lado durante esse momento tornando tudo mais leve.

Aos professores do SENAI CETIQT, principalmente meu orientador André Simões, e a professora Michelle Reich que contribuíram com a minha trajetória acadêmica. Obrigada pela dedicação, compreensão e amizade.

À minha banca de defesa, por aceitarem o meu convite.

Por fim, deixo meus agradecimentos à todas as pessoas que de uma alguma forma me ajudaram a acreditar em mim para concluir mais uma etapa na minha vida.

“Nós somos uma maneira do Cosmos conhecer a si mesmo.”

(Carl Sagan)

RESUMO

A maior parte da fabricação de plásticos é proveniente de recursos não renováveis, tendo como exceção o PET verde que tem origem renovável. Desde 1960 a produção global de plásticos aumentou vinte vezes e com prospecção de aumentar ainda mais nos próximos 20 anos. Tal fato, ocasiona impactos ambientais negativos decorrentes da produção excessiva de resíduos e do seu descarte incorreto. Estudos recentes indicam que os resíduos plásticos são um dos principais problemas no excesso de lixo produzido pela população. Diante deste cenário, o presente trabalho tem como propósito a realização da aplicação do Indicador de Circularidade do Material (MCI) na Indústria de garrafas PET por meio do levantamento de referências bibliográficas, tendo como objetivo a medição e a quantificação do nível de circularidade do produto estudado, com o intuito de facilitar a transição para uma economia mais circular. Os resultados finais mostraram que a garrafa PET estudada possui o fluxo linear maior que o circular, tendendo a apontar que seu ciclo de vida acarreta maior linearidade do que circularidade. Entretanto, ao observar a cadeia produtiva, nota-se que este produto possui características abrangentes em relação a sua reutilização fazendo com que o material seja reciclado em diversos produtos e indústrias.

Palavras-chave: Economia Circular, Indicadores de circularidade, garrafa PET, Polímeros, MCI.

ABSTRACT

Most plastics manufacture comes from non-renewable resources, with the exception of green PET, which has a renewable origin. Since 1960 the global production of plastics has increased twentyfold and is expected to increase even more in the next 20 years. This fact, environmental impacts caused by the production of waste and its incorrect disposal. Recent studies indicate that plastic waste is one of the main problems in the excess of garbage produced by the population. In this scenario, the present work aims to achieve the objective of the Application Level Circularity Indicator (MCI) in the PET Bottle Industry through the survey of bibliographic references, having as a means of surveying references and a quantification of circularity of the product studied, in order to facilitate a transition to a more circular economy. The results attribute the linear trend to which the capacity for circular life has greater measurement than the linear trend is the greater capacity for circular life. However, when observing the production chain, it should be noted that this product has comprehensive resources in relation to its action made with the recycled material being reused in and from different products.

Keywords: Circular Economy, Circularity Indicators, PET bottle, Polymers, MCI.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fluxograma etapas da Economia Linear	18
----------	--------------------------------------	----

Figura 2	Fluxograma etapas da Economia Circular	19
Figura 3	Diagrama de sistemas de Economia Circular	21
Figura 4	Classificação dos indicadores de circularidade em nível	24
Figura 5	Mapa de micro indicadores	26
Figura 6	Fluxograma com as fórmulas utilizadas para o cálculo do MCI	28
Figura 7	Representação esquemática de fluxos de materiais e as variáveis correspondentes	31
Figura 8	Três estratégias para a transição para uma economia mais circular	34
Figura 9	Estrutura molecular do polímero PET	35
Figura 10	Esquema da produção do PET e das garrafas PET a partir de seu ciclo de vida	37
Figura 11	Esquema de parte do processo de moldagem por sopro	38
Figura 12	Reação química para formação do PET	39
Figura 13	Gráfico com a composição em % dos principais polímeros encontrados nos resíduos sólidos urbanos brasileiros	40
Figura 14	Etapas metodológicas propostas da pesquisa	42
Figura 15	Nuvem de palavras-chave	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Principais indicadores Micro encontrados na literatura	25
Tabela 2	Definições de todos os principais termos e variáveis	29
Tabela 3	Palavras-chave em inglês aplicadas para o levantamento bibliográfico	43
Tabela 4	Palavras-chave em português aplicadas para o levantamento bibliográfico	43
Tabela 5	Referencial da massa para execução do cálculo	47
Tabela 6	Dados de entrada para o Estudo de caso da Garrafa PET de 500ml	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CETIQT	Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
EC	Economia Circular
MCI	Indicador de Circularidade do Material
LFI	Índice do Fluxo Linear
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Poli(cloreto de vinila)
DMT	Dimetiltereftalato Cristalizado
MEG	Monoetilenoglicol
DHET	Dihidroxietileno Tereftalato

SUMÁRIO

1. CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	16
1.1.1. Objetivo Geral	16
1.1.2. Objetivos Específicos	16
1.2. JUSTIFICATIVA	16
1.3. DELIMITAÇÃO	17
2. CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. ECONOMIA CIRCULAR	18
2.2. INDICADORES DE CIRCULARIDADE	21
2.2.1. Conceito	21
2.2.2. Classificação por métricas	21
2.2.3. Indicadores de circularidade	22
2.2.4. Indicadores de circularidade em nível	23
2.2.5. Indicador de circularidade do material (MCI)	27
2.3. INDÚSTRIA DE POLÍMEROS E ECONOMIA CIRCULAR	32
2.4. POLI(TEREFTALATO DE ETILENO) (PET)	34
2.4.1. Características gerais	35
2.4.2. Ciclo de vida do PET	37
2.6. IMPACTO AMBIENTAL DAS GARRAFAS PET	39
3. CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	41
3.1. PROCEDIMENTOS METODOLOGICOS	42
3.1.1. Levantamento Bibliográfico - 1ª Etapa	42
3.1.2. Seleção de artigos e escolha do resíduo - 2ª Etapa	44
3.1.3. Identificação e determinação do indicador - 3ª Etapa	44
3.1.4. Estudo de caso através da aplicação do indicador - 4ª Etapa	44
4. CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1. RESULTADOS PARA O MCI	45
4.1.1. Estudo de caso Garrafa PET 500ml - Cálculo MCI	45
4.2 - Fatores que podem melhorar a maximização da transição para uma economia mais circular	51

5. CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO.....	55
5.1. CONCLUSÃO.....	55
REFERÊNCIAS	57

1. CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

A maioria dos recursos naturais, materiais e energéticos são fontes finitas para a produção e o desgaste desses recursos ocasionam uma instabilidade no mercado global, surgindo assim a busca por uma sociedade mais sustentável, necessitando repensar todos os processos da cadeia produtiva para buscar o equilíbrio entre economia e meio ambiente (GONÇALVES et al., 2019).

Dessa forma, a Economia Circular (EC) é um tópico que está em crescimento e é pertinente, pois promove o uso cíclico de recursos (MORAGA et al. 2019), ou seja, os resíduos são insumos para a produção de novos produtos. Esse modelo econômico baseia-se na restauração e regeneração (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017). Propõe complementarmente que os recursos naturais continuem gerando produtos, mas que os resíduos possam ser reciclados e reutilizados para que em combinação de outros possam gerar novos produtos. Diferente do modelo linear, onde após a extração dos recursos e a transformação em produtos (onde uma parte também vira resíduo), e depois do seu consumo é descartado, gerando inúmeras quantidades de lixo.

Com o crescimento demográfico e populacional, a produção global de plásticos aumentou cerca de vinte vezes desde 1960, e a tendência é a duplicação dessa produção para os próximos 20 anos. De acordo com a EUROPEAN COMMISSION, 2018; estima-se que 80% do lixo presente nos oceanos é acúmulo de resíduos plásticos, como consequência acaba gerando impactos negativos ao meio ambiente, como a poluição do solo, da água e do ar. As garrafas plásticas, que fazem parte significativa desses resíduos devido a sua expressiva produção, se tornaram um problema ambiental. Os princípios da Economia Circular são fundamentais para a gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos, onde possam ser reutilizados dentro do ciclo produtivo, e/ou a reciclagem com uma destinação final adequada. (MARMELO, 2019; GONÇALVES et al., 2019; DE LIMA, 2020; WELLE, 2011; PEREIRA, 2021).

Através dos indicadores de circularidade é possível quantificar e qualificar a circularidade de produtos, empresas, países, entre outros. Essas métricas são úteis para avaliar empiricamente os efeitos de uma Economia Circular em que diz respeito lucro, criação de empregos e impactos ambientais (ROSSI et al., 2020; LINDER et al., 2017). O Indicador de

Circularidade do Material (MCI) é uma métrica circular criada pela Fundação Ellen MacArthur e tem como objetivo quantificar a transição da economia linear para uma economia circular, através de uma série de conjuntos de dados de entrada, possibilitando que as empresas tenham uma visão do quanto distante ou perto estão da circularidade (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

1.1 - OBJETIVOS

1.1.1 - Objetivo Geral

Realizar a aplicação do Indicador de Circularidade do Material (MCI) da Economia Circular na Indústria de garrafas PET de 500ml por meio do levantamento de referências

bibliográficas para levantamento de dados a serem inseridos no cálculo dessa métrica, e como forma de analisar e medir o nível de circularidade do produto estudado.

1.1.2 - Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico da indústria de polímeros e do impacto ambiental de seus resíduos. Dando maior destaque em embalagens PET;
- Buscar dados de entrada a partir de referências bibliográficas utilizando o estudo dos fatores relevantes para o ciclo de vida do PET.
- Realizar o cálculo do MCI (Indicador de Circularidade do Material) para garrafas PET de 500ml.
- Analisar algumas estratégias e melhoria das variáveis do MCI que podem ser utilizadas para maximizar a transição para uma economia mais circular.

1.2 - JUSTIFICATIVA

O setor de plásticos é uma das maiores cadeias produtivas empregadoras do Brasil, contribuindo assim para o crescimento e progresso do país. Com o crescimento demográfico e populacional, houve o aumento da fabricação de artefatos provenientes de plásticos por se tratar de um material bastante versátil. Com o aumento da produção do setor de polímeros, surgiu consequentemente o aumento de material utilizado na produção e de resíduos descartados (SALES et al., 2019).

O polietileno (PE), o polipropileno (PP), o poliestireno (PS), o poli(cloreto de vinila) (PVC) e o poli(tereftalato de etileno) PET representam cerca de 90% do consumo nacional, sendo o PET um dos maiores índices de crescimento em consumo no País. Os principais polímeros encontrados nos resíduos sólidos urbanos são o polietileno de alta e baixa densidade, o PET, o PVC e o PP, sendo responsáveis por grande parte do impacto ambiental produzido pelas Indústrias de polímeros (SPINACÉ et al., 2004).

Com isso, torna-se conveniente aplicar os princípios de economia circular na Indústria de polímeros por meio dos indicadores de circularidade com o objetivo de quantificar e

qualificar a circularidade dos produtos e facilitar a transição para uma economia mais circular (MARMELO, 2019; GONÇALVES et al., 2019; DE LIMA, 2020; WELLE, 2011; PEREIRA, 2021).

1.3 - DELIMITAÇÃO

O presente trabalho delimita-se a apresentar e discorrer sobre um estudo de caso da circularidade de garrafas PET por meio da quantificação da utilização de um indicador de circularidade, aplicando dados de entrada de uma busca por sites na *internet* e referências bibliográficas utilizando o estudo dos fatores relevantes e uma pesquisa por dados de referência.

2. CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - ECONOMIA CIRCULAR

O atual modelo linear de economia e produção se tornou insustentável em longo prazo, pois a maioria dos recursos naturais, materiais e energéticos são fontes finitas, além do descarte incorreto de seus resíduos e da degradação ambiental causada pela extração desenfreada desses recursos. Ocorrendo assim uma instabilidade no mercado, resultando no

aumento dos preços, na volatilidade de *commodities* e de insumos (GONÇALVES et al., 2019).

A Figura 1 abaixo ilustra as etapas do modelo de Economia Linear, sendo constituído pela etapa da extração de elementos da natureza, ocorrendo posteriormente a transformação em produtos para consumo (onde uma parte vira produto e outra parte vira resíduo) e após o seu uso os produtos são descartados.

Figura 1 - Fluxograma etapas da Economia Linear.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na busca por uma sociedade mais sustentável e que vise a eficiência e eficácia do sistema produtivo global, se tornou necessário repensar em um novo modelo econômico, surgindo assim a Economia Circular, que desperta uma nova forma de utilização das matérias primas e de energia (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

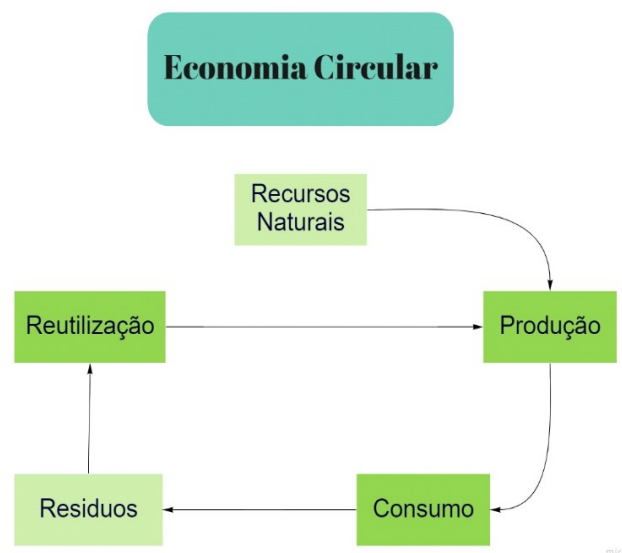
O modelo econômico circular de produção não sugere apenas o equilíbrio entre a economia e o meio ambiente, mas também a regeneração do valor do capital, causando a otimização de toda a cadeia produtiva. Todos os materiais retornam ao ciclo produtivo através da reutilização, redução e reciclagem (GONÇALVES et al., 2019).

A Economia Circular engloba três aspectos principais: a necessidade de uma economia eficiente de recursos econômicos, a necessidade de uma sociedade mais sustentável e a medição do impacto socioambiental de algum produto, empresa, entre outros. Formando

assim o tripé da sustentabilidade, “*People, Planet, Profit*” (Pessoas, Planeta, Lucro) (ELKINGTON, 1994). Como objetivo ambiental a EC tem a redução da utilização de insumos, matéria-prima, energia e consequentemente a diminuição de resíduos e as emissões. Já o objetivo econômico é reduzir custos, riscos e abordagem de criação de valor (ROSSI et al., 2020).

A Figura 2 abaixo ilustra as etapas do modelo de Economia Circular. Ela sugere que os recursos naturais continuem gerando produtos, mas que os resíduos também possam ser reutilizados com o acréscimo de outros recursos naturais e assim gerando novos produtos.

Figura 2 - Fluxograma etapas da Economia Circular.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Espera-se que a EC atenda os três pilares da sustentabilidade: ambiental, econômico e social. Pois ela impacta positivamente no crescimento da economia, na criação de empregos, no consumo de matéria-prima, nas emissões de carbono, e na circularidade e longevidade de produtos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

A EC procura diminuir o uso dos recursos naturais e do gasto de energia por meio de um modelo de desenvolvimento sustentável proporcionando o retorno dos materiais a cadeia produtiva por meio da sua reutilização, recuperação, reparação e reciclagem. Entretanto, para

ser efetivo dois principais parâmetros precisam ser considerados: a Longevidade e a Circularidade (FIGGE et al., 2018).

A Longevidade pode ser definida como o tempo em que um recurso é usado, e é medido em dias, meses, anos. Ou seja, quanto mais tempo um recurso for usado, maior será a sua contribuição na EC (FRANKLIN-JOHNSON et al., 2016).

Já a Circularidade busca retornar o produto para a cadeia de produção o maior número de vezes possível. Ela estuda o fluxo dos recursos que permitem implementar práticas que maximizem a utilização de materiais provenientes da reciclagem e da recuperação, ou seja, que minimizem o uso de recursos virgens (FIGGE et al., 2018).

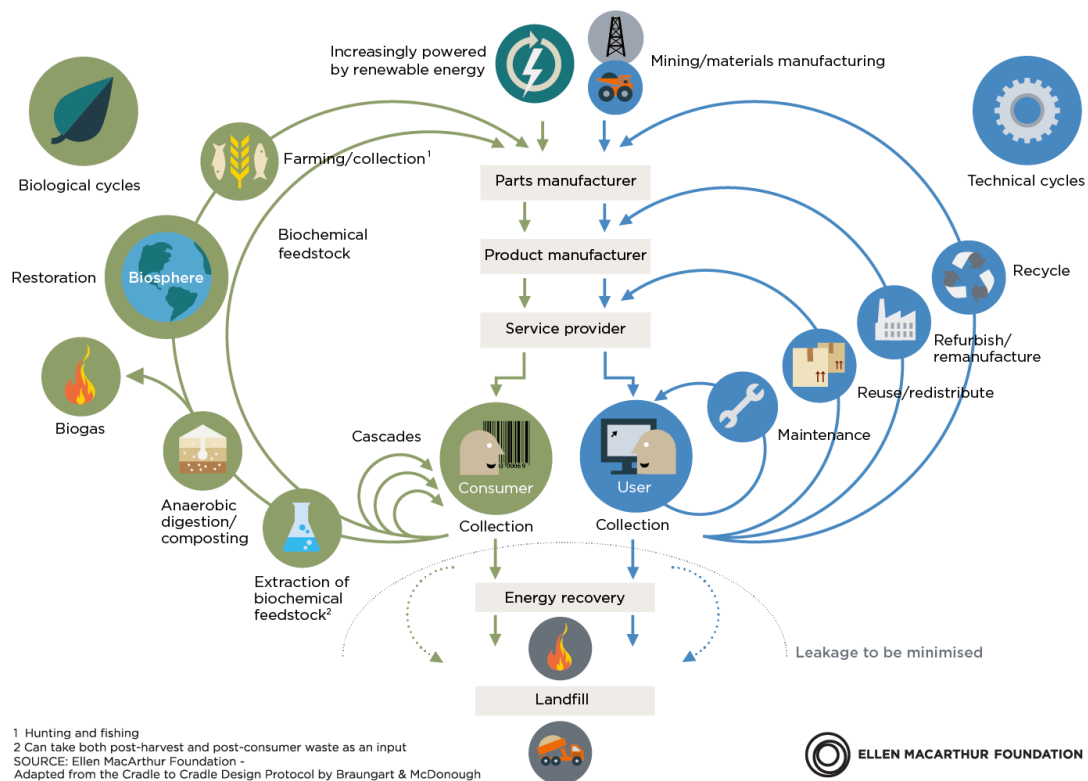
Esses dois parâmetros contribuem individualmente de maneira limitada na transição para uma EC. Pois, enquanto a Circularidade mostra o número médio de vezes que um recurso é utilizado, ela não indica a importância sobre o período de tempo em que são usados. E a Longevidade indica apenas o período de tempo que os recursos (em forma de produto) são utilizados mas não os trata de maneira circular. (FIGGE et al., 2018).

O modelo de economia circular diferencia dois tipos de ciclos:

1. Ciclos biológicos: Materiais não tóxicos são devolvidos à biosfera enquanto o capital natural é reconstruído depois de ser desdobrado em diferentes aplicações.
2. Ciclos técnicos: Produtos, componentes e materiais são restaurados no mercado com a mais alta qualidade possível e pelo maior tempo possível. Através de reparos, manutenção, reutilização, reforma, remanufatura e reciclagem (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015). Esses ciclos são ilustrados no Diagrama de sistemas de EC na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama de sistemas de Economia Circular

CIRCULAR ECONOMY - *an industrial system that is restorative by design*



Fonte: ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015.

Os modelos circulares dependem de quatro blocos de construção para serem bem-sucedidos:

1. Repensar o design do produto.

Facilitando assim a recuperação de componentes e materiais.

2. Modelos de negócios inovadores.

Dessa maneira permitindo mudanças de incentivos e a coleta de produtos.

3. Nova logística reversa.

Através da recuperação dos produtos de consumidores ou usuários na cadeia de suprimentos.

4. Condições do sistema que podem ajudar as empresas a fazerem a transição: educação, sistemas políticos, métricas, entre outros (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

O modelo de economia circular permite que as empresas capturem um valor adicional de seus produtos e materiais ao invés de serem descartado como lixo (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

2.2 - INDICADORES DE CIRCULARIDADE

2.2.1 - Conceito

A tentativa de medir ou quantificar os conceitos e o desempenho referentes a EC vem sendo pesquisado e calculado na forma de indicadores. Para alcançar uma implementação eficaz da EC se faz necessário definir os indicadores que servem como medida de desenvolvimento e gerar critérios de avaliação da eficiência dessa implementação. Eles também auxiliam empresas a melhorarem seu desempenho de circularidade comparando com o desempenho de outras empresas (KAYAL et al., 2019).

A falta de indicadores foi julgada como sendo uma das barreiras para a transição da economia linear para uma circular (KAYAL et al., 2019). Sem ter como utilizar uma métrica para mensurar o nível e a quantidade de circularidade de um determinado produto em uma empresa, muitas empresas são tomadas pela incerteza dessa transição e acabam desistindo por

estarem às cegas. Por isso é importante o uso de indicadores, a regulamentação e o incentivo dos mesmos, a fim das empresas adotarem uma transição quantitativa e qualitativa.

2.2.2 - Classificação por métricas:

Os indicadores podem ser classificados em três tipos de medição:

- EC direta com estratégias específicas: os indicadores se concentram em uma ou mais estratégias de EC identificáveis.
- EC direta com estratégias inespecíficas: os indicadores que sempre se concentram em mais de uma estratégia e não é possível explicitamente reconhecer as estratégias.
- EC indireta: Os indicadores podem avaliar aspectos das estratégias de EC, mas com o uso de abordagens auxiliares para avaliar a EC (MORAGA et al., 2019).

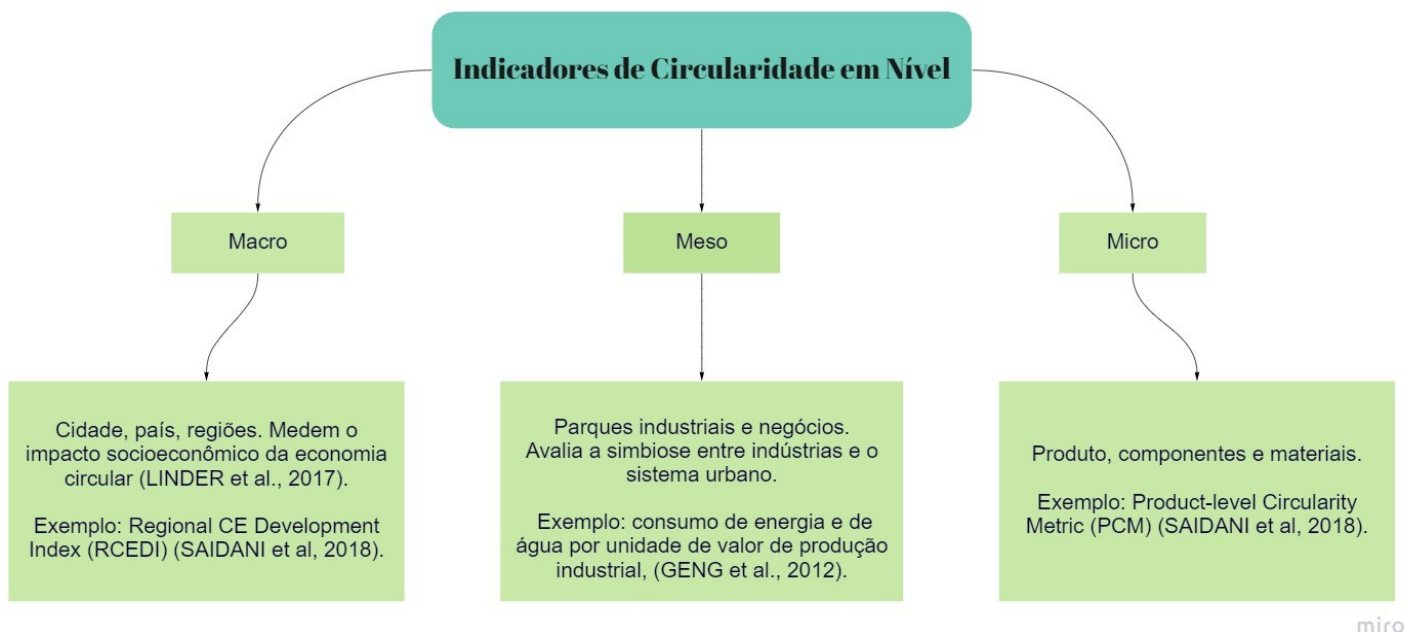
2.2.3 - Indicadores de Circularidade

Os indicadores de circularidade servem para quantificar e qualificar a circularidade de produtos, empresas, países, entre outros, e facilitar a transição para uma economia mais circular. Devem abordar questões relacionadas com a produção, consumo, recursos, fatores econômicos, problemas sociais (ROSSI et al., 2020). As métricas de circularidade são úteis para avaliar empiricamente os efeitos de uma EC em que diz respeito lucro, criação de empregos e impactos ambientais (LINDER et al., 2017).

2.2.4 - Indicadores de Circularidade em Nível

Na literatura, os indicadores de circularidade podem ser divididos em Nível abordando as divisões de Macro, Meso e Micro de acordo com a Figura 4 abaixo:

Figura 4 - Classificação dos indicadores de circularidade em nível.



Fonte: Adaptado de LINDER et al. (2017); SAIDANI et al. (2018); GENG et al. (2012).

Podem ser quantificados a partir de diferentes parâmetros (valor econômico, massa, energia) e em função de diferentes variáveis (fluxos, ações, mudanças de estoque) ou proporções (LINDER et al., 2017). A Tabela 1 abaixo mostra os principais indicadores Micro com abordagem quantitativa encontrados na literatura.

Tabela 1 - Principais indicadores Micro encontrados na literatura.

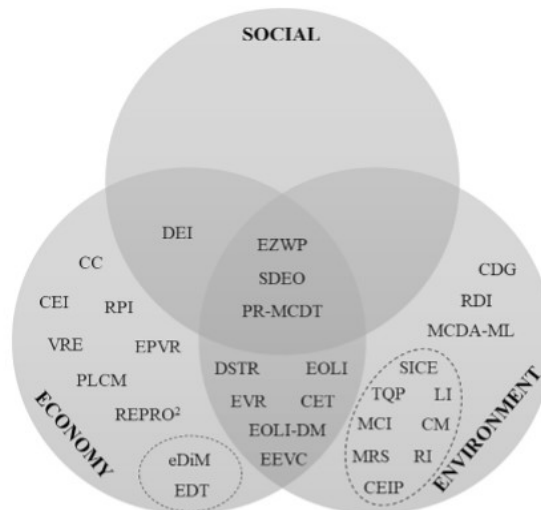
Nome	Autor	Características
MCI	Ellen MacArthur Foundation	Reciclagem, Matéria-prima reciclada, Eficiência de reciclagem
PLCM	Marcus Linder, Steven Sarasini e Patricia van Loon	Valor econômico de peças recirculadas, Valor econômico de todas as partes
RDI	Elizabeth Franklin-Johnson, Frank Figge, Louise Canning	Indicador de longevidade, Vida útil inicial, Ganho recuperado, Vida útil adquirida e reciclada.

RP	Zongguo Wen, Xiaoyan Meng	Produtividade de recursos, Eficiência de recursos medindo a produção do PIB por unidade de consumo de recursos
RPI	Joo Young Park, Marian R. Chertow	Indicador de potencial de reutilização, Recursos, Resíduos, Resíduos como recursos, Reciclagem, Taxas de recuperação
RRs	Melanie Haupt, Carl Vadenbo, and Stefanie Hellweg	Taxas de reciclagem, Indicador do comportamento da circulação de materiais, medida do grau de circularidade de uma economia, Recursos secundários disponíveis produzidos de processos de reciclagem.
CEI	Francesco Di Maio, Peter Carlo Rem	Taxa de reciclagem, Proporção do valor do material produzido pela recicladora (valor de mercado) pelo valor intrínseco do material

Fonte: Elaborado pelo autor.

Poucos são os indicadores que abordam os aspectos sociais, ambientais e econômicos juntos, ou seja, focado na sustentabilidade, completamente. Um exemplo que ilustra esse cenário é a Figura 5, onde possui alguns exemplos de Micro indicadores e suas categorias.

Figura 5 – Mapa de micro indicadores



Fonte: KRISTENSEN et al (2019).

A Figura 5 aborda o Mapa de micro indicadores na dimensão da sustentabilidade, onde estão situados os indicadores de circularidade que abordam o aspecto social, ambiental, econômico e também suas interseções.

2.2.5 - Indicador de Circularidade do Material (MCI)

O Indicador de Circularidade do Material (MCI) é uma métrica circular criada pela “*Ellen MacArthur Foundation*” que tem como objetivo quantificar a transição da economia linear para uma economia circular por meio de uma série de conjuntos de dados de entrada que são listados e diretamente ligados ao que se deve avaliar. Isso possibilita que as empresas tenham uma visão do quanto distante ou perto estão da circularidade (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

O MCI é constituído por uma combinação de três características básicas do produto:

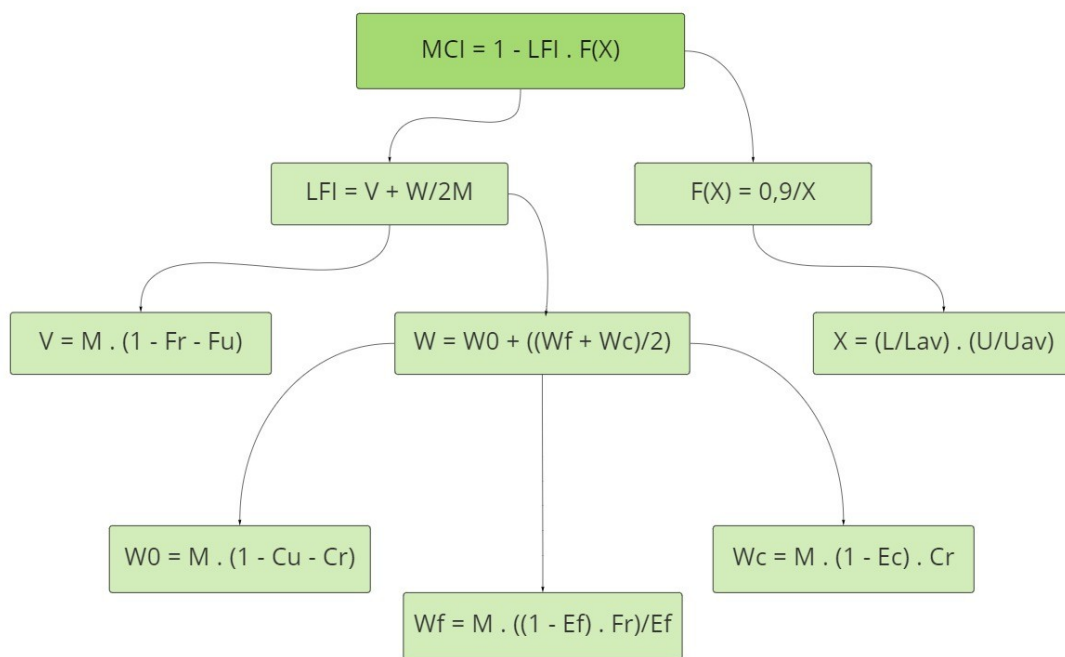
1. A massa da matéria-prima virgem utilizada na fabricação;
2. A massa de resíduos do produto que é irrecuperável;
3. Um fator de utilidade que é relacionado com a intensidade e o tempo de uso do produto, a Longevidade (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Nesta metodologia um produto totalmente linear é caracterizado como qualquer produto que é obtido apenas utilizando matéria-prima virgem e que ao final do seu ciclo de vida é descartado em aterro sanitário. Já um produto totalmente circular é caracterizado pelo seu oposto, um produto onde não contem matéria prima virgem, e é totalmente reciclado ou reutilizado. Na prática grande parte dos produtos flutuam entre esses dois extremos, e com isso o MCI mede o nível de circularidade utilizando um intervalo de 0 a 1 (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Essa métrica não exige que o ciclo seja fechado, ou seja, que a matéria-prima reciclada não precisa ser oriunda do mesmo produto, podendo ser adquirida no mercado aberto. Para a aplicação da metodologia pressupõe que para que o MCI seja calculado, é necessário conhecimento detalhado de um componente e de materiais do produto (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

Com o intuito de melhorar o entendimento da formulação básica, é importante qualificar os dados e as variáveis de entrada que influenciam e auxiliam para calcular a circularidade do material. A Tabela 2 e a Figura 6 ilustram as definições dos termos, variáveis e suas respectivas fórmulas utilizadas para o cálculo do MCI.

Figura 6 - Fluxograma com as fórmulas utilizadas para o cálculo do MCI.



miro

Fonte: Adaptado de Slides Michelle Reich

Tabela 2 - Definições de todos os principais termos e variáveis.

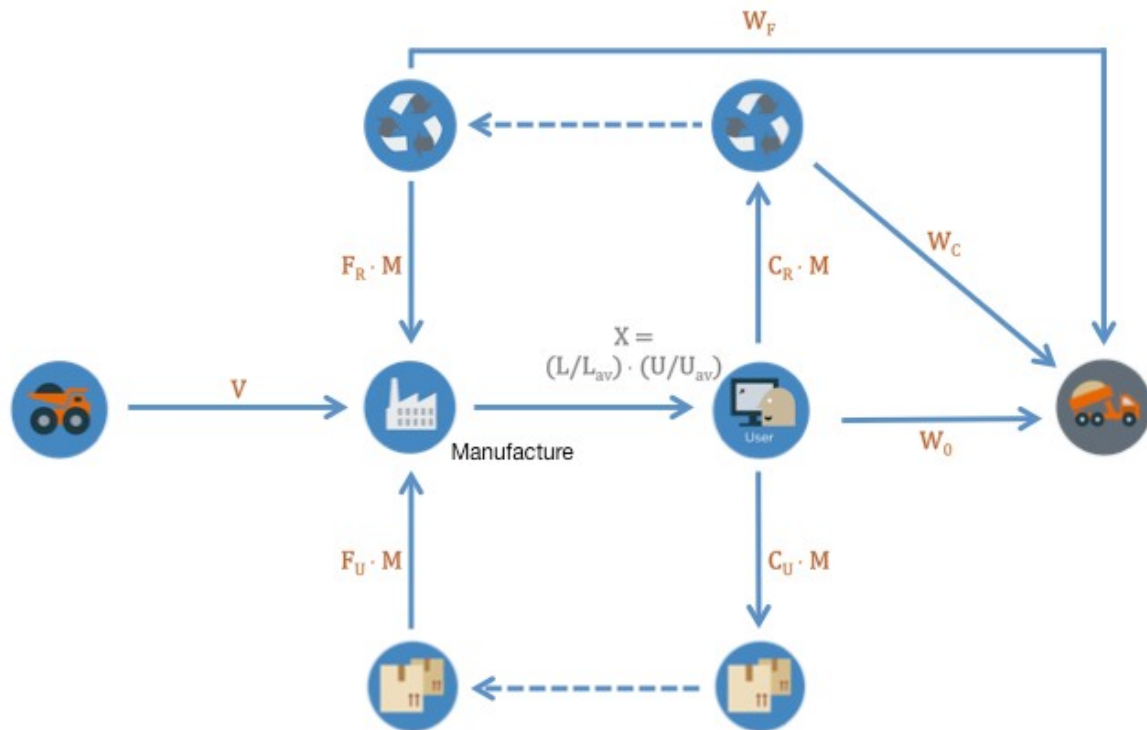
Símbolo	Definição
M	Massa do produto
F_R	Fração da massa da matéria-prima de um produto de fontes recicladas
F_U	Fração da massa da matéria-prima de um produto de fontes reutilizadas

V	Massa de matéria-prima virgem usada em um produto
C_R	Fração da massa de um produto sendo coletado para entrar em um processo de reciclagem
C_U	Fração da massa de um produto que vai para reutilização de componentes
E_C	Eficiência do processo de reciclagem utilizado para a parte de um produto coletado para reciclagem
E_F	Eficiência do processo de reciclagem usado para produzir matéria-prima reciclada para um produto
W	Massa de resíduos irrecuperáveis associados a um produto
W_0	Massa de resíduos irrecuperáveis através do material de um produto que vai para aterro, resíduos à energia e qualquer outro tipo de processo onde os materiais não são mais recuperáveis
W_C	Massa de resíduos irrecuperáveis gerados no processo de reciclagem de peças de um produto
W_F	Massa de resíduos irrecuperáveis gerados ao produzir matéria-prima reciclada para um produto

LFI	Índice de fluxo linear
F(X)	Fator de utilidade construído em função da utilidade X de um produto
X	Utilidade de um produto
L	Vida útil média real de um produto
L_{AV}	Vida útil média real de um produto médio do setor do mesmo tipo
U	Número médio real de unidades funcionais alcançadas durante a fase de uso de um produtos
U_{AV}	Número médio real de unidades funcionais alcançadas durante a fase de uso de um produto médio da indústria do mesmo tipo
MCI_P	Indicador de Circularidade do Material de um produto
MCI_C	Indicador de Circularidade do Material de uma empresa

Fonte: Adaptado de ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2015).

Figura 7 - Representação esquemática de fluxos de materiais e as variáveis correspondentes.



Fonte: ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2015).

A Figura 7 ilustra os fluxos de materiais, se iniciando no material virgem (variável V), passando pela produção (variáveis L e U), consumo, descarte (variável W_0) e por fim no ciclo de circularidade onde os componentes podem ser coletados para reuso (variáveis C_u e F_u), ou, coletados para a reciclagem (variáveis C_r , F_r , W_f e W_c).

O MCI é calculado a partir da matéria-prima virgem e dos resíduos irrecuperáveis, então agregando o fator de utilidade. Essa métrica é utilizada em produtos utilizando dados reais do que acontece no mercado. A entrada desses dados é baseada no conhecimento do produto avaliado, entretanto, quando a informação não estiver disponível, poderão ser usados dados gerais ou dados por aproximação obtidos através da indústria. A utilização dessa metodologia tem como objetivo o sistema restaurativo. Ou seja, utilizar a matéria prima de

fontes recicladas e/ou reutilizadas, colocando em evidência a reutilização da matéria ou do componente reciclado após a utilização do produto. Dessa forma, ocorre a estruturação do design regenerativo e do ciclo reverso através da prorrogação do tempo de vida útil do produto (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015).

2.3 - INDÚSTRIA DE POLÍMEROS E ECONOMIA CIRCULAR

Atualmente, no Brasil a Indústria de Polímeros é considerada o setor que mais emprega no país. No final de 2018, cerca de 117 mil empregos formais foram gerados, correspondendo a 53,37% do total de empregos em indústrias de embalagem (DE CARVALHO et al., 2019; ABRE, 2018).

Nos últimos anos a indústria de plásticos conquistou a primeira colocação no setor de embalagens, substituindo assim os materiais tradicionais como o vidro. (Fabris, Freire e Reyes, 2007; DE CARVALHO et al., 2019). Onde os plásticos correspondem a 40% do total do valor bruto da produção, isso representa a maior participação no valor total da fabricação (ABRE, 2018). Os produtos obtidos através dessa indústria são direcionados para diversos setores como por exemplo: eletrônicos, construção civil e consumo final (recipientes e embalagens de uma maneira geral) (HIRATUKA et al., 2007; DE CARVALHO et al., 2019).

A fabricação de plásticos a partir de fontes de recurso não renováveis, como é o caso do poli(tereftalato de etileno) (PET) ou do poli(cloreto de vinila) (PVC), acabam produzindo resíduos em excesso e muitas vezes descartados de maneira incorreta, ocasionando assim impactos ambientais e por consequência na saúde da população. Com o propósito de preservar o meio ambiente, como por exemplo, através da utilização de matérias-primas renováveis e biodegradáveis e da redução da quantidade de resíduos descartados, buscou-se por alternativas de modelos econômicos mais sustentáveis (SHARMA; JAIN, 2020; DE CARVALHO et al., 2021).

Estudos recentes indicam que os resíduos plásticos são um dos principais problemas no excesso de lixo produzido pela população, pois a maioria dos produtos vem se tornando cada vez mais obsoletos. (WORLD ECONOMIC FORUM, 2016; DE CARVALHO et al., 2021). Desse modo, os princípios da Economia Circular são fundamentais para a gestão e o gerenciamento dos resíduos sólidos, em que os resíduos possam retornar no ciclo produtivo após a sua utilização ou com uma destinação final adequada. Inserir a circularidade na cadeia produtiva traz como benefício a otimização de toda a cadeia produtiva, além do equilíbrio entre economia e o meio ambiente, e a regeneração do valor do capital da economia e dessa maneira melhorando o desempenho econômico (MARMELO, 2019; GONÇALVES et al., 2019; DE LIMA, 2020).

Segundo WORLD ECONOMIC FORUM; 2016, a Economia Circular almeja dispor melhores resultados econômicos e ambientais através da redução do aumento dos plásticos em sistemas naturais por meio de designs, tecnologias e sistemas atuais (DE CARVALHO et al., 2021). As aplicações das estratégias da EC dentro de indústrias variam de acordo com a necessidade de cada empresa (PIONTEK, 2019; DE CARVALHO et al., 2021).

A implementação da EC nos plásticos baseia-se em três grandes princípios:

1. Criar uma economia mais efetiva, com o objetivo de abranger a reciclagem, reuso e biodegradação após uso dos plásticos.
2. Reduzir o descarte de plásticos na natureza ao máximo, minimizando a poluição e melhorando o fechamento do ciclo do material.
3. Dissociar os plásticos das matérias primas fósseis explorando novas fontes renováveis para produção do plástico, diminuindo as perdas do ciclo e a devastação da natureza.

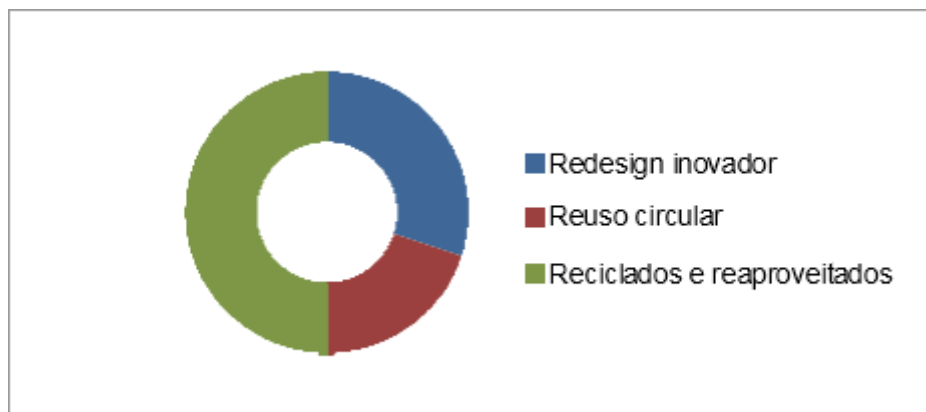
Além desses três princípios, tem também três estratégias para a transição para uma economia mais circular:

1. 30% dos plásticos devem passar por um processo de redesign inovador,
2. 20% dos materiais devem garantir o seu reuso circular,

3. 50% devem ser reciclados e reaproveitados em um sistema (WORLD ECONOMIC FORUM, 2017; DE CARVALHO et al., 2021).

A Figura 8 abaixo ilustra em forma de gráfico as três estratégias para a implementação da Economia Circular nos plásticos.

Figura 8 - Três estratégias para a transição para uma economia mais circular



Fonte: Adaptado de WORLD ECONOMIC FORUM (2017); SALES et al. (2019).

2.4 - POLI(TEREFTALATO DE ETILENO) (PET)

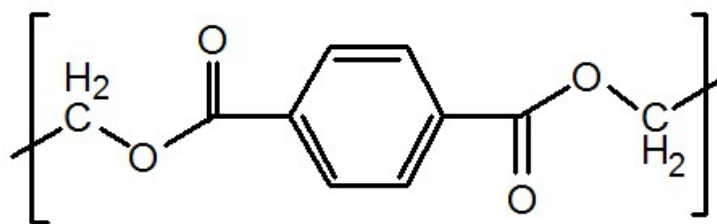
O PET é um polímero termoplástico da família dos poliésteres, patenteado em 1941 pelos químicos britânicos Whinfiel e Dickson. A principal matéria-prima é o petróleo, quando esse é aquecido se separa em diferentes componentes com diferentes temperaturas de ebulição. O composto que mais se destaca é a Nafta, que é utilizada para a produção de os etilenos: propenos, butadienos, benzenos, toluenos, entre outros; ou seja, os monômeros. Posteriormente, os monômeros são transformados no plástico PET, dentre outras coisas (DA SILVA, 2010; AKCELRUD, 2007; SILVA, 2009; LINO, 2011; KOSCHEVIC et al., 2016). Segundo a *Revista Plástico*, somente 4% da produção mundial de petróleo é destinada a produção de plástico (DA SILVA, 2010).

2.4.1 - Características gerais:

O PET é um poliéster, que possui anéis aromáticos bastante estáveis. Por essa característica dificilmente são rompidos e são inertes ao ataque de microorganismos, fazendo com que a sua degradação natural seja mais difícil e lenta no meio ambiente, podendo atingir mais de 100 anos (DA SILVA, 2010).

Suas características químicas e físicas são bastante abrangentes. É um plástico transparente, inquebrável, leve, de alta resistência mecânica (impacto), física (impermeabilidade) e química (odores e gases). Outras características desse material abrangem massa molecular de 15.000 a 42.000g/mol, densidade de 1,33 a 1,45 g/cm³, índice de refração de 1,65 a 1,66, tensão de alongamento entre 55 a 80 (MPa), módulo de Young de 2,1 a 3,1 (GPa), taxa de transparência em torno de 70 a 90 % de luz visível transmitida, temperatura de transição vítrea de 70 a 74 °C, e temperatura de fusão em torno de 250 a 270 °C. (OJEDA, 2008; OLIVEIRA, 2011; KOSCHEVIC, 2016; DA SILVA, 2010). Na Figura 9 se encontra a representação estrutural molecular do polímero PET.

Figura 9 - Estrutura molecular do polímero PET.



Fonte: https://www.crq4.org.br/quimicaviva_plasticos

Uma característica muito relevante para o processamento do material é a propriedade de higroscopia, ou seja, de absorver água/umidade. Pois o PET pode absorver aproximadamente 0,03% de umidade. Por esse motivo a secagem do material é extremamente

necessária para evitar erros em seu processo de fabricação (COELHO, 2013; KOSCHEVIC, 2016).

Por conta das suas características químicas e físicas, além de possuir uma barreira que reterem gases e impede a entrada de umidade, o PET é usado principalmente para embalar bebidas, refrigerantes e outros alimentos. Mas também está presente nas indústrias têxtil, alimentícia e em alguns setores da indústria de instrumentos domésticos e hospitalares (KOSCHEVIC, 2016).

2.4.2 - Ciclo de vida do PET:

O ciclo de vida começa na extração, destilação e refino da matéria-prima, ou seja, o petróleo. Posteriormente o petróleo é aquecido, se separando em subprodutos como a Nafta. Por meio de destilação a Nafta é convertida em monômeros como o etileno e o p-xileno. Esses monômeros são convertidos em dimetiltereftalato cristalizado (DMT) e monoetilenoglicol (MEG). Ocorre uma reação de transesterificação com a presença de catalisador com liberação de metanol, e gerando assim o monômero puro Dihidroxietileno Tereftalato (DHET). Esse monômero é ampliado em 80 vezes através de reações contínuas para a cadeia final do PET, até ser obtida a massa molecular ideal e o PET esteja formado (CANEVAROLO JR., 2006; DA SILVA, 2010; SILVA, 2009).

Após a fabricação da resina, o polímero pode passar pelo processo de extrusão para a obtenção de grãos de PET, onde após o resfriamento e a secagem esses grânulos seguem para o processo da obtenção das pré formas. No processo de pré formula os grãos sofrem o procedimento de plastificação para torna-los viscosos para a próxima etapa, a moldagem. O material amolecido é injetado em um molde através de elevada pressão, temperatura e velocidade. Esse material é resfriado por uma rápida troca de calor, e a pré forma se desprende e é levada para um engarrafador, onde um sopro de ar quente faz com que a resina se expande e forme a garrafa PET. A Figura 9 ilustra o esquema do processo de moldagem

por sopro (VALT, 2007; KOSCHEVIC et al., 2016). O material, então convertido em produto, atenderá o mercado até que atinja o consumidor doméstico. (DA SILVA, 2010). A Figura 10 ilustra o Esquema da produção do PET e das garrafas PET a partir de seu ciclo de vida, e a Figura 11 ilustra parte do processo de moldagem por sopro.

Figura 10 - Esquema da produção do PET e das garrafas PET a partir de seu ciclo de vida.

Fonte: KOSCHEVIC et al. (2016)

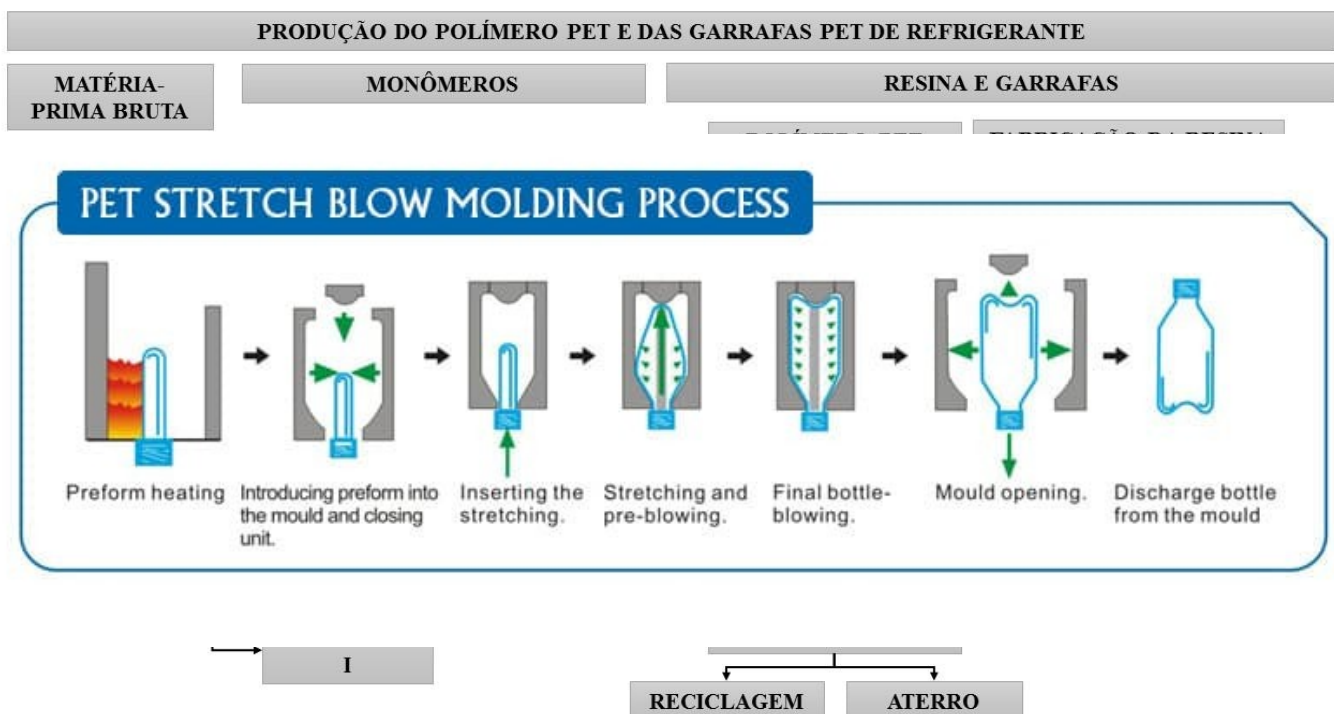


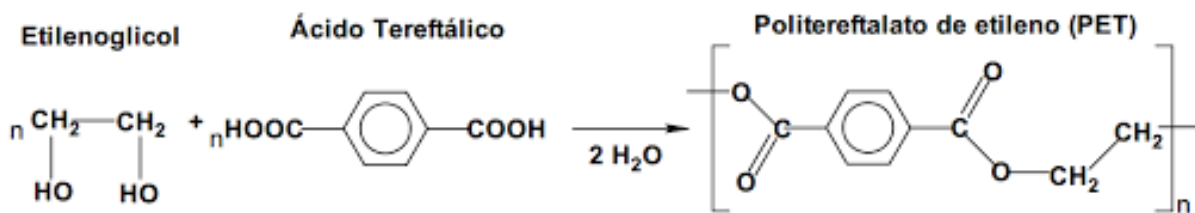
Figura 11 - Esquema de parte do processo de moldagem por sopro.

Fonte: <https://engenharia360.com/como-sao-feitas-as-garrafas-pet/>

A Figura 9 constitui as etapas de aquecimento das pré-formas, posteriormente elas são introduzidas no molde e na unidade de fechamento, são alongadas e pré sopradas antes do sopro final da garrafa. Depois o molde é aberto e a garrafa é desprendida.

Outra forma de obtenção do PET é através da polimerização entre um ácido dicarboxílico e um glicol ou bifenol. O modelo bastante comum é a reação química entre o ácido tereftálico e o etilenoglicol, por reunir as características ideais para uma reação gradual de policondensação (MANCINI, BEZERRA e ZANIN, 1998; MIRANDA e SILVA, 2004; JARA, 2007; LINO, 2011; SHIMAMOTO, et al., 2011; KOSCHEVIC, 2016). A reação química é exemplificada na Figura 12 abaixo .

Figura 12 - Reação química para formação do PET

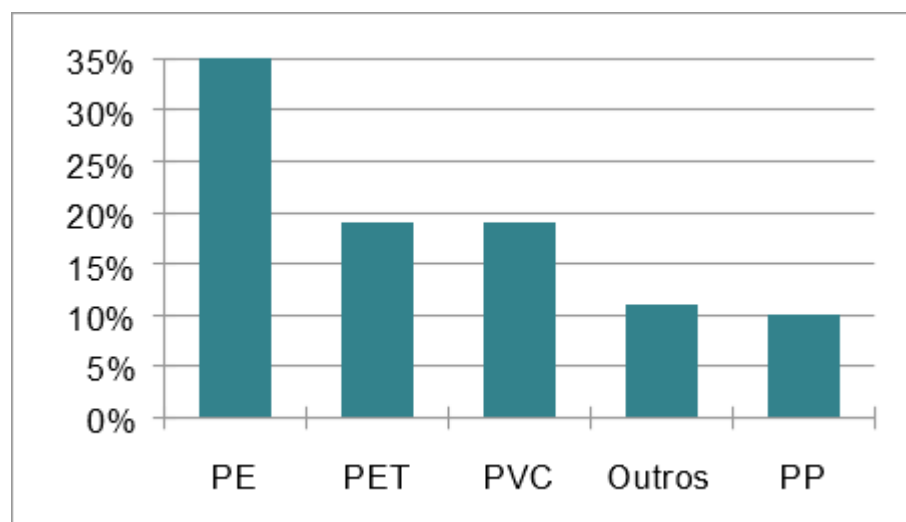


Fonte: KOSCHEVIC (2016).

2.6 - IMPACTO AMBIENTAL DAS GARRAFAS PET

O Polietileno (PE), o polipropileno (PP), o Poliestireno (PS), o poli(cloreto de vinila) (PVC) e o PET (poli(tereftalato de etileno)) representam cerca de 90% do consumo nacional, sendo o PET um dos maiores índices de crescimento em consumo no País. Os principais polímeros encontrados nos resíduos sólidos urbanos são o polietileno de alta e baixa densidade (PEAD e PEBD), o PET, o PVC e o PP, já os outros tipos correspondem a apenas 11% do total segundo levantamentos feitos em grandes cidades brasileiras, conforme ilustra a Figura 13 abaixo (SPINACÉ et al., 2004).

Figura 13 - Gráfico com a composição em % dos principais polímeros encontrados nos resíduos sólidos urbanos brasileiros



Fonte: Adaptado de SPINACÉ et al. (2004).

Com o crescimento demográfico e populacional, a produção global de plásticos aumentou cerca de vinte vezes desde 1960, e a tendência é a duplicação dessa produção para os próximos 20 anos. De acordo com a EUROPEAN COMMISSION, 2018; estima-se que 80% do lixo presente nos oceanos é plástico, pois em escala global, cerca de 5 a 13 milhões de toneladas de plásticos se tornam lixo marinho (PEREIRA, 2021). Esse acúmulo de resíduos plásticos acaba gerando impactos negativos ao meio ambiente, como a poluição do solo, da água e do ar. As garrafas plásticas, que fazem parte significativa desses resíduos devido a sua expressiva produção, se tornaram um problema ambiental (PEREIRA, 2021).

Desse modo, se fez necessário pensar em processos produtivos que visem o gerenciamento e a redução dos resíduos sólidos, onde possam ser reutilizados dentro do ciclo produtivo, e/ou a reciclagem com uma destinação final adequada. O PET é o material mais empregue na produção de embalagens tanto para água quanto para refrigerantes devido às suas propriedades, se comparadas ao vidro, de maior resistência e leveza (WELLE, 2011; PEREIRA, 2021).

3. CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Com relação aos procedimentos metodológicos utilizados, esta pesquisa pode ser classificada como: pesquisa de abordagem quantitativa; objetivos descritivos; pesquisa bibliográfica e estudo de caso.

As pesquisas de abordagem quantitativa procuram abordar exclusivamente o evento ou o contexto no qual a pesquisa foi empregada e não os valores, pois os dados avaliados são não-métricos (Métodos de pesquisa, 2009).

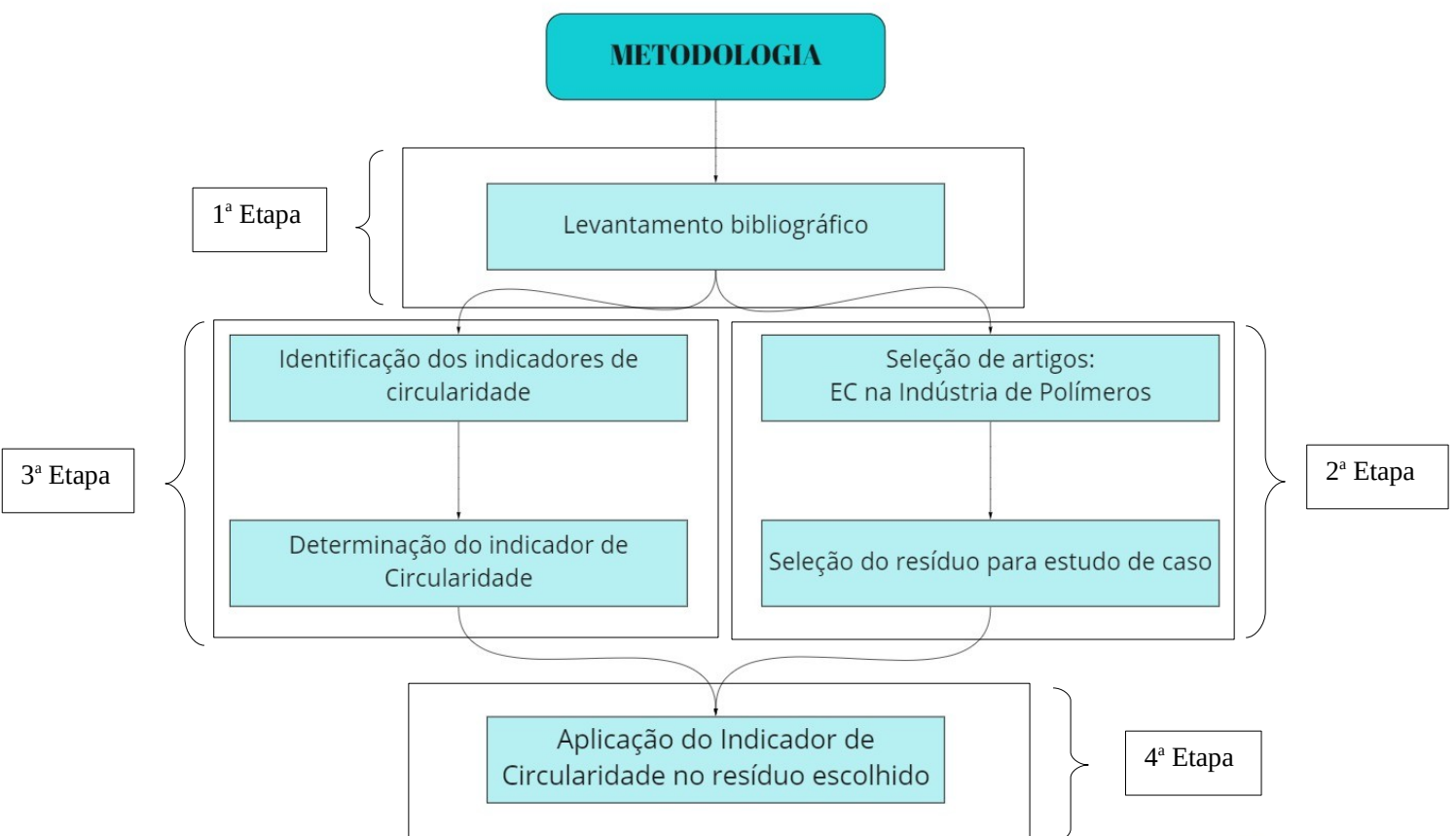
Já as pesquisas descritivas possuem como principal finalidade descrever as características de determinada população ou fenômeno, ou o estabelecimento de relações entre variáveis, por meio do uso de técnicas padrão para coleta, análise e interpretação de dados (Métodos de pesquisa, 2009).

A pesquisa bibliográfica é caracterizada por um conjunto de operações de busca baseada na coleta de informações e dados de material já produzido de diversos autores por

meios escritos e eletrônicos sobre determinado assunto ou tema, comparando tais fontes e analisando o objeto de estudo por meio dessas diferentes opiniões (AZEVEDO; MENDES, 2008; Métodos de pesquisa, 2009).

Aplicando-se as metodologias citadas, o trabalho foi dividido em 4 etapas detalhadas nos subcapítulos metodológicos a seguir através da Figura 14.

Figura 14 - Etapas metodológicas propostas da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1.1 Levantamento bibliográfico - 1ª Etapa

Inicialmente, buscou-se realizar a estruturação teórica sobre o tema através da busca por meio das plataformas eletrônicas *Google Scholar* e *ScienceDirect*. Este levantamento bibliográfico inicial teve como objetivo obter referências bibliográficas como: Artigos científicos, Teses, Trabalhos de Conclusão de Curso e informações de empresas; que levasse a compreensão sobre Economia Circular na Indústria de Polímeros e seus respectivos indicadores de circularidade.

Nesta etapa, foram determinadas e utilizadas palavras- chaves, isoladas e combinadas, em português e inglês para a busca de conceitos e definições através das fontes de pesquisas citadas anteriormente para maior precisão na busca, conforme ilustra a Tabela 3, Tabela 4 e a Figura 15 abaixo.

Tabela 3 – Palavras-chave em inglês aplicadas para o levantamento bibliográfico.

TERMOS DE BUSCA
<i>“circular economy” AND “polymer industry”</i>
<i>“circular economy” AND “circularity indicators”</i>
<i>“sustainability” AND “PET bottle”</i>
<i>“environmental impact” AND “polymer industry”</i>
<i>“circular economy” AND “linear economy”</i>
<i>“polymer” AND “PET”</i>

Fonte: Elaborado pelo autor

conforme os assuntos e títulos principais retratados pelos autores a partir da leitura dos documentos e por fim, a seleção das fontes de pesquisa adequadas com o tema do projeto.

3.1.2 Seleção de artigos e escolha do resíduo - 2ª Etapa

A partir da coleta dos dados nas bases bibliográficas escolhidas pela etapa anterior, foi realizada uma seleção dos artigos relevantes ao tema de “EC na Indústria de Polímeros” de acordo com o tema e assunto abordados nos mesmos. Onde, a partir disso houve a seleção e escolha do resíduo para ser usado como tema do estudo.

3.1.3 Identificação e determinação do indicador de circularidade - 3ª Etapa

A partir da escolha do resíduo determinado pela etapa anterior, foi realizada uma listagem dos indicadores em nível micro. Houve a identificação e caracterização dos indicadores. Posteriormente realizou-se a seleção e determinação de um indicador para ser usado como fonte de métrica de circularidade compatível com o tema do projeto.

3.1.4 Estudo de caso através da aplicação do indicador - 4ª Etapa

Após a escolha do resíduo e do indicador, foi realizado a aplicação desse indicador de circularidade no resíduo escolhido com o objetivo de metrificar e quantificar o nível de circularidade do produto estudado. O intuito desse estudo de caso é apresentar um resíduo derivado da indústria de polímeros e verificar a efetividade dos conceitos de economia circular na produção de polímeros e na sua longevidade. A análise da circularidade foi feita seguindo a análise dos parâmetros de fluxo de material, ou seja, o que pode ser recirculado de material nos processos, além da eficiência da reciclagem, do tempo de vida do material, composição dos produtos, entre outros.

4. CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo foi dedicado a apresentar e a discutir sobre a aplicabilidade do MCI através do cálculo do indicativo de circularidade pelo Estudo de caso da Garrafa PET de 500ml.

A garrafa PET foi selecionada para este estudo por se tratar de um produto muito presente no cotidiano das pessoas, e por consequência gerando muitos resíduos.

Já o MCI foi selecionado por se tratar de uma métrica abrangente, pois não considera apenas a reciclagem mas também o reuso, o Índice de Fluxo Linear (que reflete o nível da transição para uma economia mais circular), a eficiência de reciclagem e o aumento do tempo de vida do material. Permitindo assim avaliar ciclos abertos e fechados.

Serão abordados a seguir os dados utilizados e as etapas de cálculo referentes ao indicador.

4.1 RESULTADOS PARA O MCI

Para a aplicação do MCI, a primeira etapa foi realizar um levantamento bibliográfico dos dados de entrada mais relevantes, através referencias bibliográficas retiradas da *internet* em sites de empresas e revendedores, associações governamentais e dados estatísticos.

4.1.1 Estudo de caso Garrafa PET 500ml - Cálculo MCI

Para o estudo de caso sobre a garrafa PET de 500ml foi realizado um levantamento dos dados através de uma busca no site de pesquisa *Google* e referências na literatura.

Os dados encontrados foram filtrados através da literatura e utilizados como base de cálculo para os dados de entrada. De acordo com o recomendado por Ellen MacArthur Foundation (2015), os dados que não são possíveis de serem coletados por falta de disponibilidade, foram substituídos por dados gerais ou estipulados por aproximação através de dados de empresas, indústrias e etc.

- Dados de entrada:

A base de cálculo referente a massa do produto, foi de 1000 garrafas seguindo a referência do trabalho de Soeneo e tal. (2003), que utilizou 1000 garrafas para a base de cálculo de seu estudo.

Para **M** (massa do produto) na fórmula foi utilizado o valor de 16,7kg. A massa da garrafa PET de 500ml foi obtida através do site da empresa “Cristalina” de água mineral, mostrada na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 - Referencial da massa para execução do cálculo

Garrafas	350ml PET	500ml PP	500ml PET	1,5L PET
Peso Garrafa	17,8g	20,3g	16,7g	33,5g
Peso Garrafa + Água	407,0 g	539,6g	545g	1.549,54g
Pacotes com 06 unids peso (6 unids no de	4.884g	6.468g	6.540g	9.297,24g

1,5L)				
Largura pacote	18cm	19cm	19cm	18cm
Altura pacote	18cm	22,5cm	21cm	31cm
Comprimento pacote	25cm	25cm	26cm	25,5cm

Fonte: <https://cristalina.com.br/produtos.php>

1 unidade - 16,7g

1000 unidades - X g

X = 16.700 g

X = 16,7 kg

Para o cálculo de **Fr** (Fração de matéria-prima derivada de reciclado) foi considerado um valor hipotético de 60% de matéria-prima proveniente de material reciclado, pois foram encontrados vários valores relacionados em plataformas eletrônicas a essa variável, considerando assim uma média deles. O valor utilizado em **Fu** (Fração de matéria-prima derivada de reuso) foi de 0%, pois não é utilizado matéria prima oriunda de reuso devido ao risco de contaminação.

Na Fração de massa do produto coletada para reciclagem no fim de vida (**Cr**) foi utilizado o valor de 55% obtido através de uma busca pelo site da ABIPET. Esse valor corresponde a pesquisa de 2019, onde descreve que o Brasil reciclou 55% das embalagens de PET descartadas, ou seja, 311 mil toneladas deixaram de ir para os aterros. Para o dado de entrada na Fração de massa do produto coletada para reuso no fim de vida (**Cu**) foi estipulado o valor de 0% por falta de dados.

Para o dado da Eficiência no processo de reciclagem (**Ec**) foi considerado de acordo o estipulado por Soeneo et.al. (2003), que relatou que esta eficiência é de cerca de 69,4%. E para o **Ef** (é a eficiência no processo de reciclagem, para produzir matéria-prima reciclada de

qualidade e que possa ser reinserida no produto) foi considerado um ciclo fechado, pois os dados sobre o quanto de PET reciclado seria adequado para a produção de uma garrafa nova, não foram localizados. Então, neste caso, é considerado que 100% de todo o material é adequado. Dessa forma, admite-se que $E_f = E_c$.

Na Frequência de uso real (U) e na Frequência de uso esperado (U_{av}) os dados de entrada adotados também foram no valor de 1, pois a garrafa é utilizada somente 1 vez como embalagem, considerado pela indústria.

Para os dados de tempo de vida real (L) e tempo de vida esperado (L_{av}) foi considerado o valor de 1 para ambos. Pois esses tempos não podem ser estendidos devido as características de uso do material considerado pela indústria.

- Cálculo das variáveis para obtenção do MCI:

As variáveis V (Massa de matéria-prima virgem usada em um produto), W (Massa de resíduos irrecuperáveis associados a um produto), W_0 (Massa de resíduos irrecuperáveis através do material de um produto que vai para aterro), W_c (Massa de resíduos irrecuperáveis gerados no processo de reciclagem de peças de um produto), W_f (Massa de resíduos irrecuperáveis gerados ao produzir matéria-prima reciclada para um produto), X (Utilidade de um produto), $F(X)$ (Fator de utilidade construído em função da utilidade X de um produto) foram calculadas manualmente utilizando as fórmulas da ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2015), afim de encontrar o valor do Indicador de Circularidade do Material (MCI) e o Índice de fluxo linear (LFI) para a Garrafa PET de 500ml e compará-los.

.

1. Cálculo de V :

$$V = M \cdot (1 - Fr - Fu) \quad (\text{Equação 1})$$

$$V = 16,7 \cdot (1 - 0,6 - 0)$$

$$V = 6,68 \text{ kg}$$

2. Cálculo de W_c :

$$W_c = M \cdot (1 - E_c) \cdot Cr \quad (\text{Equação 2})$$

$$W_c = 16,7 \cdot (1 - 0,694) \cdot 0,55$$

$$W_c = 2,81 \text{ kg}$$

3. Cálculo de W_f :

$$W_f = M \cdot ((1 - E_f) \cdot Fr) / E_f \quad (\text{Equação 3})$$

$$W_f = 16,7 \cdot (1 - 0,694) \cdot 0,6 / 0,694$$

$$W_f = 4,42 \text{ kg}$$

4. Cálculo de W_0 :

$$W_0 = M \cdot (1 - Cu - Cr) \quad (\text{Equação 4})$$

$$W_0 = 16,7 \cdot (1 - 0 - 0,55)$$

$$W_0 = 7,51 \text{ kg}$$

5. Cálculo de W :

$$W = W_0 + (W_f + W_c) / 2 \quad (\text{Equação 5})$$

$$W = 7,51 + (4,42 + 2,81) / 2$$

$$W = 11,76 \text{ kg}$$

6. Cálculo de X:

$$X = \frac{L}{L_{av}} \cdot \frac{U}{U_{av}} \text{ (Equação 6)}$$

$$X = \frac{1}{1} \cdot \frac{1}{1}$$

$$X = 1$$

7. Cálculo de F(X):

$$F(X) = \frac{0,9}{X} \quad \text{(Equação 7)}$$

$$F(X) = 0,9$$

8. Cálculo de LFI:

$$LFI = V + W/2 M \text{ (Equação 8)}$$

$$LFI = 6,68 + 11,76/2 \cdot 16,7$$

$$LFI = 0,55$$

9. Cálculo de MCI:

$$MCI = 1 - LFI \cdot F(X) \quad \text{(Equação 9)}$$

$$MCI = 1 - 0,55 \cdot 0,9$$

$$MCI = 0,505$$

$$MCI = 0,51$$

Os dados de entrada encontrados e/ou estipulados estão dispostos na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 - Dados de entrada para o Estudo de caso da Garrafa PET de 500ml

Variáveis	Dados
Base de cálculo = Número de Garrafas PET	1000,00
V	6,68 kg
W	11,76 kg
W ₀	7,51 kg
W _c	2,81 kg
W _f	4,42 kg
M	16,70 kg
C _u	0,00
F _u	0,00
C _R	0,55
F _R	0,60
E _C	0,69
E _F	0,69
LFI	0,55
L	1,00
L _{AV}	1,00
U	1,00

U_{AV}	1,00
X	1,00
F(X)	0,90
MCI	0,51

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da seleção das referências dos dados de entrada descritos e calculados a cima, foi possível fazer os cálculos das variáveis das fórmulas e chegar a um valor final do Indicador de Circularidade de Materiais e do Índice do Fluxo Linear do material estudado. Os resultados finais encontrados foram de um LFI de 55% e de um MCI de 51%, representando a medição da transição para a EC de uma EL para este caso. Esse resultado tende a ressaltar a influência da eficiência da reciclagem e a utilização eficaz da aplicação dos conceitos dessa metodologia para maximizar o fluxo regenerativo e por consequência minimizar o fluxo linear.

A utilização do MCI tem como propósito colocar em prática o sistema restaurativo. Onde se faz uso da matéria-prima de fontes recicladas e/ou reutilizadas para melhorar a eficiência de reciclagem e maximizar o fluxo regenerativo de toda a cadeia do produto. Tendo como estratégias para isso, a reutilização de componentes ou materiais de reciclagem após a utilização do produto (dessa maneira o design regenerativo e ciclo reverso são estruturados), aumentar o tempo de vida útil do produto, reutilizar/redistribuir e intensificar a utilização do produto/dos produtos na qual possam ser atingidas através da estruturação dos fatores viabilizadores e das condições de sistema mais favoráveis e novos modelos de negócio (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2015). Com os dados fornecidos por essa métrica, empresas são possibilitadas de verificar sua transição de “linear” para “circular”, e verificar o quão distantes estão dessa possibilidade, analisando e executando estratégias da metodologia para maximizar essa transição.

4.2 - Fatores que podem melhorar a maximização da transição para uma economia mais circular

Desta forma, podemos destacar algumas estratégias e melhoria das variáveis que podem ser utilizadas para maximizar a transição para uma economia mais circular, são elas:

Com relação as variáveis referentes ao aumento da utilização de matéria-prima derivada de fontes recicladas, tenderia a redução nos impactos ambientais associados quando é considerado o uso da maior quantidade de componentes reciclados e por consequência seria possível notar um aumento na circularidade. Mas isso só seria possível potencializando e incentivando a quantidade de produtos coletados para a reciclagem no fim de vida útil dos mesmos, pois utilizando 100% de conteúdo reciclado geraria a circularidade máxima para as peças plásticas. Entretanto observamos que no Brasil a sua viabilidade ainda é um pouco limitada devido à investimentos.

É importante salientar a importância da qualidade do material reciclado apresentar a mesma qualidade do material virgem. Isso só seria possível melhorando a eficiência no processo de reciclagem para produzir matéria-prima reciclada de qualidade e que possa ser reinserida no produto PET reciclado, tornando-o mais adequado para a produção de uma garrafa nova e dessa maneira, diminuindo o tempo de obsolescência e maximizando o fluxo regenerativo do produto. Isso impactaria diretamente na frequências de uso e do tempo de vida da garrafa, incentivando o aumento da vida útil do produto ou dando uma maior intensidade do uso.

Com relação a matéria-prima derivada de reuso não é interessante a maximização, pois se tratando do uso em garrafas PET para transportar bebidas diretamente ao consumidor, existe um risco de contaminação.

Logo, quanto maior a quantidade e a qualidade de componentes reciclados na cadeia produtiva e também depois dela, por meio da maximização da eficiência do processo de

reciclagem, do aumento do uso de componentes reciclados, do aumento do tempo de vida útil das garrafas, melhor tenderia o desempenho ambiental e maior seria o grau de circularidade do produto.

5. CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

5.1 - CONCLUSÃO

No levantamento bibliográfico realizado, observou-se a indústria de plástico sendo a terceira indústria mais poluente no Brasil, perdendo apenas para a indústria têxtil e alimentícia. Enfatizando que a maior preocupação a nível global vem sendo primeiramente a poluição marinha, pois estima-se que 80% dos resíduos marinhos sejam constituídos de plásticos. Estudos apontam que os impactos ambientais negativos são decorrentes da presença de microplásticos, sendo 33,3% oriundos do polietileno.

Nos resíduos sólidos brasileiros coletados, os plásticos só perdem a colocação do topo do ranking para o papel, sendo que 19% do total dos principais polímeros encontrados nos resíduos sólidos urbanos brasileiros se referem ao PET. Esses dados tendem a sinalizar a urgência pela implementação de medidas mais circulares e sustentáveis na indústria de polímeros, pois o PET é um material extremamente relevante e muito presente no cotidiano das pessoas.

No desenvolvimento do cálculo aplicando o MCI foram encontrados os resultados finais de um Índice do Fluxo Linear (LFI) de 55% e de um Indicador de Circularidade do Material (MCI) de 51%. Onde o fluxo linear é 4% maior que o fluxo circular deste material, isso tende a apontar que o PET não tem muitos processos circulares na sua produção, como matérias-primas provenientes de fontes recicladas/reutilizadas. Entretanto, ao observamos a cadeia produtiva do PET notamos um aspecto muito positivo por possuir características abrangentes em relação a sua reutilização, isso faz com que ele seja reutilizado em diversos produtos e

indústrias, variando desde a indústria têxtil onde é utilizado na produção de fibras para confecção de roupas, entre outros; até a indústria automobilística que reutiliza a resina do PET na fabricação de revestimentos, pára-choques e etc. O cálculo aponta para a necessidade de um aperfeiçoamento no sistema restaurativo e regenerativo do ciclo produtivo do PET, ou seja, utilizar mais matéria-prima de fontes recicladas, colocando em evidência a eficiência no processo de reciclagem como sendo o fator principal para que isso ocorra, e o componente reciclado após a utilização do produto. Aumentando o uso de resíduos como um recurso, acaba por impactar a sua circularidade final.

Desta maneira, os dados podem ser aplicados na quantificação e medição da transição de uma economia linear para uma mais circular. Fazendo-se necessário que seus conceitos, metodologia e otimização das variáveis sejam empregados em toda a cadeia de produção e assim resultando em processos de fabricação mais circulares e se aproximando de uma sociedade mais circular e sustentável.

REFERÊNCIAS

ABIPET (2018) - **Décimo Censo da Reciclagem do PET no Brasil**. Disponível em: <www.abipet.org.br>

AKCELRUD, Leni. **Fundamentos da Ciência dos Polímeros**. Barueri/SP: Manole, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS – ABRE. **Estudo ABRE macroeconômico e de tendências**. 2018. São Paulo. Disponível em: <<http://bit.ly/2WwQFG0>>

CANEVAROLO Jr., Sebastião V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

COELHO, Alberta Augusta Santos. **Desenvolvimento morfológico sob deformação de nanocompósitos de PET e nanotubos de carbono**. 2013, 141fl. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Polímeros). Universidade do Minho. Braga, Portugal.

DA SILVA, George Amaro. A descoberta do plástico e uma imersão no pet (politereftalato de etileno). **Jornal Eletrônico - Faculdades Integradas Vianna Junior**, Juiz de Fora, v. 2, ed. 2, Setembro, 2010.

DE CARVALHO, Taís Soares; SALES, Gabriel Fernandes. **Propostas da economia circular aplicadas a uma indústria de embalagens plásticas no oeste paranaense**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

DESING, Harald; BRUNNER, Dunia; TAKACS, Fabian; NAHRATH, Stéphane; FRANKENBERGER, Karolin; HISCHIER, Roland. **A circular economy within the planetary boundaries: Towards a resourcebased, systemic approach**. 2020.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017. **Building blocks of a circular economy**. Available through. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/building-blocks>.

EUROPEAN COMMISSION. **A European Strategy For Plastics In A Circular Economy**. 2018. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/plastics-strategy-brochure.pdf>>

Ellen MacArthur Foundation, Granta, 2015. **Circularity indicators: an approach to measuring circularity.** Available through. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/resources/apply/circularity-indicators>

ELKINGTON, J. Towards the Sustainable Corporation: Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development. **California Management Review**, v. 36, p. 90-100, 1994.

FABRIS, Samanta; FREIRE, Maria Teresa de A. REYES, Felix G. **Embalagens plásticas:** tipos de materiais, contaminação de alimentos e aspectos de legislação. *Brazilian Journal Of Toxicology*, São Paulo, v. 2, n. 19, p.59-70, 24 ago. 2007.

GENG, Y., Fu, J., Sarkis, J., Xue, B., 2012. **Rumo a um sistema circular de indicadores de economiana China: uma avaliação e análise crítica.**

HIRATUKA, Célio. et al. **Relatório de acompanhamento setorial transformados plásticos.** Campinas: Unicamp e Agencia Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2007. 21 p.

JARA, Alícia Maria Andrade Torres. **Biofilmes e enzimas sintetizados no processo de degradação do tereftalato de polietileno por bacillus subtilis e phanerochaete chrysosporium.** 2007, 88 f. Dissertação Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais - Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2007.

KAYAL, Bassam; ABU-GHUNMI, Diana; ABU-GHUNMI, Lina; ARCHENTI, Andreas; NICOLESCU, Mihai; LARKIN, Charles Larkin; CORBET, Shaen. **An economic index for measuring firm's circularity: The case of water industry.** 2019

KRISTENSEN, Heidi Simone; MOSGAARD, Mette Alberg. A review of micro level indicators for a circular economy e moving away from the three dimensions of sustainability?. **Journal of Cleaner Production**, Dinamarca, 2019.

KOSCHEVIC, Marivane Turim; BITTENCOURT, Paulo Rodrigo Stival. Meio ambiente e materiais poliméricos: Breves considerações com ênfase ao Politereftalato de Etileno (PET) e processos de degradação. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, Paraná, v. 2, ed. 14, p. 60-80, 2016.

LINDER, Marcus; SARASINI, Steven; VAN LOON, Patricia. **A Metric for Quantifying Product-Level Circularity.** 2017

LINO, Hélio Francisco Corrêa. **A Indústria de Reciclagem e a Questão Ambiental.** 2011. 291 f. Tese Programa de Pós-Graduação em História - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

MANO, E. B.; Mendes, L. C; **Introdução a polímeros**, 2a ed., Edgard Blücher Ltda: São Paulo, 1999.

MANRICH, Silvio. **Processamento de Termoplástico**. São Caetano: Artliber, 2005. 429 p.

MARMELO, Mariana Faria. **A economia circular na indústria têxtil e vestuário em Portugal**. 2019. Dissertação (Mestrado em Empreendedorismo e Internacionalização) - instituto superior de contabilidade e administração do porto politécnico do porto, Portugal, 2019.

MANCINI Sandro D.; BEZERRA, Maxwell N.; ZANIN, Maria. **Reciclagem de PET Advindo de Garrafas de Refrigerante Pós-Consumo. Polímeros: Ciência e Tecnologia**. Abr/Jun. 1998.

MORAGA, Gustavo; HUYSVELDA, Sophie; MATHIEUX, Fabrice; BLENGINIC, Gian Andrea; ALAERTSD, Luc; ACKERD, Karel Van; DE MEESTERB, Steven, DEWULFA, Jo. **Circular economy indicators: What do they measure?** 2019

Métodos de pesquisa / [organizado por] Tatiana Engel Gerhardt e Denise Tolfo Silveira; coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

OJEDA, Telmo Francisco Manfron. **Biodegradabilidade de materiais poliméricos**. 2008. 128 f. Tese Doutorado em Ciência do Solo - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2008.

OLIVEIRA, Anie Karina da Rosa. **Modificação superficial do PET (poli tereftalato de etileno) para beneficiamento na reciclagem**. 2011. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

PAOLI, Marco-Aurélio De. **Degradação e estabilização de polímeros**. 2ª ed. 2008.

PEREIRA, Bianca Galdino. **Logística Reversa: estudo de caso em relação a garrafas PET pós-consumo reciclado (PET-PCR) de água mineral**. 2021. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), CAMPO MOURÃO, 2021.

PIATTI, Tânia Maria; RODRIGUES, Reinaldo Augusto Ferreira. **Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais**. Série: Conversando sobre Ciências em Alagoas. Maceió: EDUFAL, 2005.

PIONTEK, W. **The circular plastics economy and the instruments to implement it**. *Ekonomia i Srodowisko*, n. 70, p. 18–33, 2019.

ROSSI, Efigenia; BERTASSINI, Ana Carolina; FERREIRA, Camila dos S.; DO AMARAL, Weber Antonio N.; OMETTO, Aldo Roberto. **Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electroelectronic cases.** Brasil, 2020.

SAIDANI, Michael; YANNOU, Bernard ; LEROY, Yann , CLUZEL, François; KENDALL, Alissa. **A taxonomy of circular economy indicators.** 2018

SOENO, Y.; INO, H.; SIRATORI, K.; HALADA, K. 2003 **Exergy Analysis to Evaluate Integrated Environmental Impacts.** Materials Transactions. Special Issue on Growth of Ecomaterials as a Key to Eco-Society. The Japan Institute of Metals. Vol. 44, nº 7. p. 1244 - 1250.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics.** 34 p. Geneva, Switzerland, 2016.

SPINACÉ, Márcia Aparecida da Silva; PAOLI e Marco Aurelio De. **A tecnologia da reciclagem de polímeros.** Química Nova, Vol. 28, No. 1, 65-72, 2004.

SILVA, Kethlen Rose Inácio da. **Biodegradação de Polietileno Tereftalato (PET) por fungos ligninolíticos.** 2009, 193 f. Dissertação Ciência de Alimentos - Faculdade de Engenharia de Alimentos - Universidade Estadual de Campinas. Campinas/SP. Brasil, 2009.

SALES, Gabriel Fernandes et al. **Desenvolvimento da economia circular no Brasil:** a aplicabilidade na indústria e nas demais organizações. In: II Congresso Sul-Americano de resíduos sólidos e sustentabilidade, 2019, Foz do Iguaçu. Anais IBEAS, 2019.

VALT, Renata Bachmann Guimarães. **Ciclo de vida de embalagens para bebidas no Brasil.** Brasília: Thesaurus, 2007.

WELLE, Frank. Twenty years of PET bottle to bottle recycling—An overview. **Journal Elsevier, Freising**, v.55, p. 865-875, 2011.



Datas e horários baseados no fuso horário (GMT -3:00) em Brasília, Brasil
Sincronizado com o NTP.br e Observatório Nacional (ON)
Certificado de assinatura gerado em 05/07/2022 às 13:48:21 (GMT -3:00)

TCC PRISCILA SPATA - FINAL att 04.07.docx

 ID única do documento: #9195b895-bd96-4697-a3df-258f4817e475

Hash do documento original (SHA256): b2ee35abf5c0091e6b8a88e99d63b8722ecd696edc551155ea57e6a2ba12435e

Este Log é exclusivo ao documento número #9195b895-bd96-4697-a3df-258f4817e475 e deve ser considerado parte do mesmo, com os efeitos prescritos nos Termos de Uso.

Assinaturas (4)

- ✓ Michelle Reich (Participante)
Assinou em 05/07/2022 às 16:39:34 (GMT -3:00)
- ✓ Mauro Cresta (Participante)
Assinou em 05/07/2022 às 17:40:19 (GMT -3:00)
- ✓ Leticia Quinello (Participante)
Assinou em 05/07/2022 às 14:10:35 (GMT -3:00)
- ✓ André Simões (Participante)
Assinou em 05/07/2022 às 14:09:34 (GMT -3:00)

Histórico completo

Data e hora

05/07/2022 às 13:48:21
(GMT -3:00)

05/07/2022 às 17:10:35
(GMT -3:00)

Evento

Priscila Spata solicitou as assinaturas.

Leticia Quinello (Autenticação: e-mail lquinello@cetiqt.senai.br; IP: 189.95.22.114) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10º, §2.



Data e hora

05/07/2022 às 17:09:34
(GMT -3:00)

Evento

André Simões (Autenticação: e-mail alsimoes@cetiqt.senai.br; IP: 177.38.98.162) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.

05/07/2022 às 19:39:34
(GMT -3:00)

Michelle Reich (Autenticação: e-mail mreich@cetiqt.senai.br; IP: 177.38.97.174) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.

05/07/2022 às 20:40:19
(GMT -3:00)

Mauro Cresta (Autenticação: e-mail mauro.dolinsky@ucp.br; IP: 189.92.224.36) assinou. Autenticidade deste documento poderá ser verificada em <https://verificador.contraktor.com.br>. Assinatura com validade jurídica conforme MP 2.200-2/01, Art. 10o, §2.