



Universidade Federal
de São João del-Rei

MARIANA IANKAUSKAS DE MOURA PRIMOLAN

A sustentabilidade da indústria de plástico: Avaliação do ciclo de vida ambiental na conversão de embalagens de vidro em PET-PCR

Ouro Branco

2021

MARIANA IANKAUSKAS DE MOURA PRIMOLAN

A sustentabilidade da indústria de plástico: Avaliação do ciclo de vida ambiental na conversão de embalagens de vidro em PET-PCR

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Bioprocessos da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Bioprocessos.

Orientador: Prof. Igor José Boggione Santos

Ouro Branco

2021

MARIANA IANKAUSKAS DE MOURA PRIMOLAN

A sustentabilidade da indústria de plástico: Avaliação do ciclo de vida ambiental na conversão de embalagens de vidro em PET-PCR

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Biotecnologia da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Biotecnologia.

Orientador: Prof. Igor José Boggione Santos

Ouro Branco, 13 de dezembro de 2021.

Banca examinadora:

Profa. Isabel Cristina Braga Rodrigues

Gabriela Martins Paiva

Prof. Dr. Igor José Boggione Santos

RESUMO

A mudança do estilo de vida mundial, tem causado alterações no hábito do consumidor e aumentado a produção de resíduos sólidos, e com as consequências do consumo e descarte inapropriado desses resíduos cada vez mais perceptíveis no meio ambiente, a preocupação com as atividades que o envolvem se torna mais presente e importante para os interesses do consumidor e das empresas. Um exemplo de ação sustentável praticado pelas empresas é a reciclagem de seus resíduos sólidos, que podem ser comercializados através do mercado de resíduos, como embalagens pós-consumo. O vidro foi o primeiro material a ser utilizado como embalagem, porém essa indústria tem sido ameaçada pelo surgimento de novos materiais e pelos hábitos de consumo. É o caso do polietileno tereftalato (PET), que por ser termoplástico e poder ser reprocessado várias vezes, começou a ser utilizado na indústria de embalagens, substituindo embalagens de vidro. Por outro lado, o grande volume de plásticos descartados incorretamente, gerou um grande problema ambiental. Uma alternativa para diminuir os impactos causados pelas embalagens de PET descartadas, foi a criação do PET pós-consumo (PET-PCR). O estudo de avaliação do ciclo de vida (ACV), foi criado para quantificar os impactos ambientais causados por um bem ou serviço, desde a extração da matéria-prima até o seu destino final. O objetivo desse trabalho foi comparar os ganhos de sustentabilidade na conversão de embalagens de vidro em PET-PCR utilizando o método de avaliação de ciclo de vida (ACV) a partir *software* GaBi. Foram pesquisados no *software* os indicadores: energia primária não renovável; pegada de carbono; consumo de água; potencial de *smog* fotoquímico e ReCiPe, para as etapas de obtenção de matéria-prima, produção, distribuição, uso e disposição final. Para isso foram definidos parâmetros de peso das embalagens, porcentagem de perda durante a produção e porcentagem de embalagens recicladas pós-consumo. A partir dos dados obtidos no *software* foi possível concluir que há um ganho de sustentabilidade na conversão das embalagens de vidro em PET-PCR para os indicadores de energia primária não renovável, pegada de carbono, potencial de *smog* fotoquímico e ReCiPe. Para o consumo de água verificou-se aumento.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida. Embalagem de vidro. Embalagem de PET-PCR. Banco de dados GaBi.

ABSTRACT

The change in the world's lifestyle has caused changes in consumer habits and increased the production of solid waste, and with the consequences of consumption and inappropriate disposal of this waste, increasingly noticeable in the environment, the concern with activities that involve it becomes more present and important to the interests of consumers and companies. An example of sustainable action practiced by companies is the recycling of their solid waste, which can be sold through the waste market, such as post-consumer packaging. Glass was the first material to be used as packaging, but this industry has been threatened by the emergence of new materials and consumption habits. This is the case of polyethylene terephthalate (PET), which, as it is thermoplastic and can be reprocessed several times, began to be used in the packaging industry, replacing glass packaging. On the other hand, the large volume of incorrectly disposed plastic created a major environmental problem. An alternative to reduce the impacts caused by discarded PET packaging was the creation of post-consumer PET (PET-PCR). The Life Cycle Assessment (LCA) study was created to quantify the environmental impacts caused by a good or service, from the extraction of raw material to its final destination. The objective of this paper was to compare the sustainability gains in the conversion of glass packaging into PET-PCR using the life cycle assessment (LCA) method using GaBi software. The following indicators were researched in the software: non-renewable primary energy; carbon footprint; water consumption; potential for photochemical smog and ReCiPe, for the steps of obtaining raw material, production, distribution, use and final disposal. For this, parameters were defined for packaging weight, percentage of loss during production and percentage of post-consumer recycled packaging. From the data obtained in the software, it was possible to conclude that there is a gain in sustainability in the conversion of glass packaging into PET-PCR for the indicators of non-renewable primary energy, carbon footprint, photochemical smog potential and ReCiPe. There was an increase in water consumption.

Keywords: Life cycle assessment. Glass packaging. PET-PCR packaging. GaBi database.

LISTA DE ABREVIACÕES

ABEPET - Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens de PET

ABIPET - Associação Brasileira da Indústria do PET

ABIVIDRO - Associação Brasileira das Indústrias de Vidro

ABRE - Associação Brasileira Embalagem

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ACV – Avaliação do ciclo de vida

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária

ESG - Governança Ambiental, Social e Corporativa

GRI - *Global Reporting Initiative*

PET - polietileno tereftalato

PET-PCR - polietileno tereftalato pós-consumo

VOC – compostos orgânicos voláteis

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVO	11
2.1 Objetivo Geral	11
2.2 Objetivos específicos	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Sustentabilidade ambiental	12
3.2 Aspectos gerais do setor de embalagens	14
3.3 Embalagens de vidro.....	15
3.4 Produção de embalagens de vidro.....	16
3.5 Reciclagem do vidro.....	18
3.6 Embalagens de PET	18
3.7 Produção de embalagens de PET	20
3.8 Reciclagem do PET.....	21
3.9 Embalagens de PET pós consumo (PET-PCR)	23
3.10 Avaliação do ciclo de vida (ACV)	24
3.10.1 Energia primária não renovável.....	25
3.10.2 Pegada de carbono	25
3.10.3 Consumo de água.....	26
3.10.4 Potencial de <i>Smog</i> fotoquímico	26
3.10.5 ReCiPe	26
4. METODOLOGIA	27
4.1 Banco de dados GaBi	27
4.2 Parâmetros utilizados para pesquisa de comparação das embalagens de vidro e PET-PCR.....	27
4.3 Etapas do ciclo de vida	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
6. CONCLUSÃO	35

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
-------------------------------------	----

1. INTRODUÇÃO

A mudança do estilo de vida mundial, tem causado alterações no tipo de consumo e aumentado a produção de resíduos sólidos. A gestão destes resíduos é um problema universal e é peça crítica para planejamento de sustentabilidade e saúde de cidades e países. A má gestão de resíduos tem contaminado oceanos, causado inundações, transmitido doenças a partir de vetores, aumentado problemas respiratórios, e gerado diversos outros problemas tanto ambientais, quanto para a saúde humana (KAZA, 2018).

Estima-se que no ano de 2020 a produção de resíduos sólidos no Brasil tenha sido de 79,1 milhões de toneladas segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). Isso equivale a uma média de consumo de 379,2 kg de resíduos sólidos por pessoa por ano no Brasil (ABRELPE, 2019)

Com as consequências do consumo e descarte de resíduos sólidos não apropriado cada vez mais perceptíveis no meio ambiente, a preocupação com as atividades que o envolvem se torna mais presente e importante. Em 1992, na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, celebrada no Rio de Janeiro, foi consolidado o conceito de desenvolvimento sustentável, relacionando meio ambiente e desenvolvimento (LIRA, 2014). Com isso, as empresas passaram a ter que se preocupar não só com seu desenvolvimento econômico, mas também com a preservação ambiental que passou a ser considerada uma importante variável de competitividade empresarial (FILHO *et al.*, 2016).

Foi então criado o *Global Reporting Initiative* (GRI), uma organização internacional que auxilia empresas na elaboração de seus relatórios de sustentabilidade com indicadores nas categorias sociais, econômicas e ambientais. Nesse documento também são indicadas as propostas das empresas para a minimização dos impactos causados por suas atividades. Um exemplo de ação sustentável praticado pelas empresas é a reciclagem de seus resíduos sólidos, que podem ser comercializados através do mercado de resíduos, como embalagens pós-consumo (Diretrizes G4).

Existem diversos tipos de materiais que podem ser usados como embalagens, e por isso a indústria de embalagens passou a ser vista como um setor estratégico

(PRADO, 2007). O primeiro tipo de embalagem que se tem conhecimento foi o vidro, porém, com o avanço de tecnologias, as embalagens de plástico difundiram-se rapidamente desde seu desenvolvimento, ocupando cerca de 41% do mercado de embalagens, enquanto embalagens de vidro ocupam 6% do total (ABRE, 2019).

O vidro é o material mais inerte utilizado em embalagens de alimentos. Não é um material biodegradável ou combustível. Em sua maioria é constituído de cal, sílica e soda cáustica. Atualmente, as embalagens de vidro são produzidas em máquinas semi ou totalmente automáticas com fornos aquecidos a gás natural ou eletricidade. Porém, mesmo sendo pioneira, a indústria de embalagens de vidro tem sido ameaçada pelo aparecimento de novos materiais e pelos hábitos de consumo. Idealmente, as embalagens de vidro seriam recolhidas, reenchidas e enviadas ao mercado novamente, porém somente uma pequena parte das embalagens de vidro são reutilizadas, restringindo-se a indústria cervejeira e às garrafas de refrigerantes retornáveis (COELHO, 2017).

O polietileno tereftalato (PET) é um polímero termoplástico que pode ser reprocessado várias vezes pelo mesmo processo ou por processo de transformação (ABIQUIM, 2004). Com o desenvolvimento do processo de injeção, o PET começou a ser utilizado na indústria de embalagens, substituindo embalagens de vidro. Por ter um baixo desperdício de matéria-prima nas fases de produção e distribuição, além de ter um baixo peso, favorecendo a logística, as embalagens de PET têm ganhado preferência no mercado de embalagens (ABIPET, 2010; LANDIM *et al.*, 2016). Por esse fator, o grande volume de plásticos descartados incorretamente, gerou um grande problema ambiental.

Uma alternativa para diminuir os impactos causados pelas embalagens de PET descartadas, e diminuir o consumo de resina virgem produzida a partir do petróleo, foi a criação do PET pós-consumo (PET-PCR) grau alimentício. Esse tipo de resina passa por processamentos que o tornam seguro para entrar em contato com alimentos, devendo ser aprovada pela ANVISA (ANVISA, 2008). Para as empresas de transformação, a utilização do PET-PCR é vantajosa financeiramente, além de ter um apelo de conscientização ambiental (HENTOUX, 2018).

Com o grande número de empresas, cada vez mais preocupadas com sua imagem em relação à sua sustentabilidade, foi criado o estudo de avaliação do ciclo

de vida (ACV), que é uma metodologia norteadada pela ISO 14.000, para quantificar os impactos ambientais causados por um bem ou serviço, desde a extração da matéria-prima até o seu destino final. O estudo cobre temas de preocupação ambiental como: energia primária não renovável; pegada de carbono; consumo de água; potencial de *smog* fotoquímico e ReCiPe (um método para avaliação do ciclo de vida que transforma uma longa lista de indicadores em um limitado número de indicadores medidos por pontos).

A adoção da avaliação do ciclo de vida (ACV) de produtos é um bom estudo para divulgação de resultados de sustentabilidade, pois, em termos de mercado, é facilitada pelo seu reconhecimento e aceitação mundial (CAPELINI, 2007). Além disso, os resultados em ganho de sustentabilidade na escolha do material utilizado para embalagem influenciam na imagem da empresa passada ao consumidor.

A conversão de embalagens de vidro em PET-PCR se refere à escolha de empresas por substituir suas embalagens de vidro por PET-PCR, seja por ganho financeiro, ambiental, ou por boa imagem perante o consumidor. Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo analisar os ganhos de sustentabilidade na conversão de embalagens de vidro em PET-PCR a partir de informações obtidas no banco de dados GaBi.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

Avaliar, a partir de informações do banco de dados GaBi, a gestão de sustentabilidade ambiental no ciclo de vida da conversão de embalagem de vidro para PET-PCR no Brasil.

2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo proposto, os objetivos específicos são:

- Determinar os parâmetros utilizados para obtenção das informações no banco de dados;
- Especificar os indicadores analisados para avaliação do ciclo de vida (ACV);
- Comparar a avaliação do ciclo de vida (ACV) entre embalagens de vidro e PET-PCR;

- Avaliar os ganhos de sustentabilidade na conversão de embalagens de vidro em PET-PCR.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Educação e sustentabilidade ambiental

A reflexão sobre as práticas sociais, em um contexto marcado pela degradação permanente do meio ambiente e do seu ecossistema, envolve uma necessária articulação com a produção de sentidos sobre a educação ambiental. (JACOBI, 2003)

Segundo Nascimento (2008), a educação ambiental pode ocorrer por meio de um processo formal, nas escolas, ou informal, por meio de campanhas e ações práticas. O autor destaca que a educação ambiental é um processo de educação política e de formação de atitudes, com o objetivo de formar uma sociedade sustentável. Para isso, no Brasil, foi criada uma lei que identifica e caracteriza os setores em que a educação ambiental deve estar presente.

A política Nacional de educação Ambiental, instituída pela Lei nº 9.795/99, entre outras providências, trata da educação ambiental como um componente essencial e permanente da educação nacional, para tanto, deve ser parte integrante de todo processo educativo de maneira transversal em todos os níveis de formação. Também define que caberá às empresas, entidades públicas e privadas a capacitação de trabalhadores, buscando a ampliação dos cuidados preventivos e outros controles para preservação ambiental (BRASIL, 1999).

Atualmente, um dos principais desafios das grandes empresas é o desenvolvimento econômico aliado à preservação ambiental, atendendo as necessidades do mercado atual sem comprometer as necessidades futuras. Com a população mais consciente e exigente, a preocupação das empresas em relação a boa imagem ambiental deixou de ser encarada somente como uma exigência legal e passou a ser considerada como uma importante variável dentro da competitividade empresarial (LINS, 2009).

Desde que a sustentabilidade passou a ser discutida nas empresas, diversas filosofias para intervenções vêm sendo criadas e aperfeiçoadas. A mais atual é a filosofia ESG, que busca incluir critérios ambientais (Environment – E), sociais (S) e

de governança corporativa (G) nas avaliações e decisões de negócio (HSM management, 2020).

Sandra Regina da Silva e Adriana Salles Gomes, em Sustentabilidade e o efeito bola de neve da revista HSM management (2020) dizem que “os investidores não começam a pensar em ESG para obter ganhos, mas para evitar perdas”. Neste sentido, foi criado o relatório anual de sustentabilidade da *Global Reporting Initiative* (GRI), que é uma iniciativa voluntária que empresas utilizam para apresentar seus indicadores em categorias sociais, econômicas e ambientais com maior transparência (GAVIOLI et. al., 2016).

De acordo com os princípios de diretrizes G4 para relato de sustentabilidade, a categoria social é dividida em quatro subcategorias: práticas trabalhistas e trabalho decente, direitos humanos, sociedade, e responsabilidade pelo produtor. Cada subcategoria envolve pontos a serem identificados e analisados para a apresentação eficaz do relatório.

Ainda de acordo com as diretrizes G4, a categoria econômica deve apresentar os aspectos de desempenho econômico, presença no mercado, impactos econômicos indiretos e práticas de compra. E, por fim, a categoria ambiental deve destacar materiais, energia, água, biodiversidade, emissões, efluentes e resíduos, produtos e serviços, conformidade, transportes, geral, avaliação ambiental, de fornecedores, mecanismos de queixas e reclamações relacionadas a impactos ambientais.

A divulgação dos impactos socioambientais e as estratégias para o desenvolvimento sustentável através do relatório de sustentabilidade podem influenciar as avaliações e decisões de *stakeholders* (qualquer indivíduo ou organização que, de alguma forma, é impactado pelas ações da empresa) onde a sociedade está inserida (GAVIOLI et al., 2016)

Um dos exemplos de ação sustentável mais praticado por empresas, é a reciclagem de seus resíduos. Esse tipo de ação pode até mesmo gerar lucro, uma vez que esses resíduos podem ser comercializados através do mercado de resíduos, como é o caso de embalagens (XAVIER, 2017).

3.2 Aspectos gerais do setor de embalagens

A indústria de embalagens começou a ser reconhecida como um setor estratégico para a sociedade devido suas características e importância para acondicionamento e logística de vários produtos, e por isso, tem sido alvo de altos investimentos tecnológicos (CLEMENTINO *et al.*, 2016).

Historicamente, antes da Segunda Guerra Mundial, eram poucos os produtos comercializados em embalagens, limitando-se a café torrado e moído, açúcar refinado, leite em garrafa, óleo de semente de algodão e vinagre. Após 1945, com os avanços tecnológicos advindos dessa época, foram desenvolvidos novos materiais para a indústria de embalagens, como o papel, o papelão e o plástico (ABRE, 2004).

As embalagens de plástico, no entanto, difundiram-se mais rapidamente que as demais, por serem mais leves, mais baratas e fáceis de produzir, além de permitirem maior oferta de formatos e tamanhos (ABRE, 2004). Esse tipo de embalagem reduz o desperdício nas indústrias, pois por ter elevada resistência mecânica e química, e garantir a conservação de alimentos, os custos com o transporte e a produção são menores, proporcionando um ótimo custo/benefício (LANDIM *et al.*, 2016).

Em 2019, a ABRE (Associação Brasileira de Embalagens), apresentou indicadores e afirmou que o material plástico representa a maior participação no valor de produção, correspondente a 41% do total, seguido pelo mercado de papel, com papelão ondulado, cartolina/papel cartão e papel, somados em 30%, embalagens metálicas com 19%, vidro com 6%, têxteis para embalagens com 3% e madeira com 1% (Figura 1).

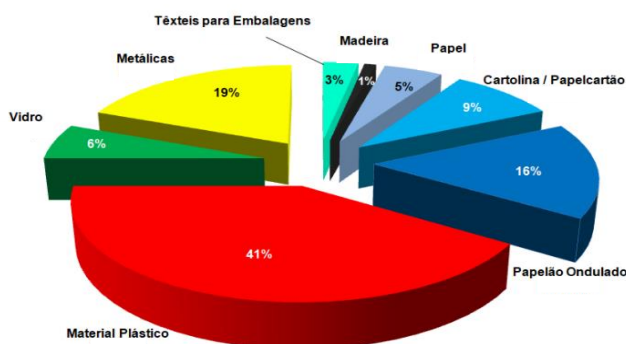


Figura 1 - Porcentagem de valor bruto da produção de embalagem por seguimento
Fonte: Adaptado de ABRE, 2019

Segundo Gonçalves *et al.* (2009), os aspectos ecológicos na escolha do material das embalagens têm um apelo importante ao consumidor, mesmo que o fato de a embalagem não ser ambientalmente correta ainda não seja um fator que o faça trocar de produto. Entretanto, visto que é crescente o número de pesquisas relacionadas à reciclagem de embalagens, há a expectativa de mudança deste hábito.

3.3 Embalagens de vidro

Estima-se que o conhecimento do vidro remonte ao ano de 4.000 a.C. Descobertas de adornos em túmulos no Egito, sugerem que o vidro tinha pouca utilidade até 1.500 a.C., quando iniciou-se a produção de recipientes feitos com moldes de argila. Porém, por ser de difícil obtenção, os recipientes de vidro eram acessíveis somente aos mais ricos (AKERMAN, 2000).

Somente por volta de 300 a.C., com a descoberta da técnica de sopro, que consiste em colher uma pequena porção da massa vítrea fundida e soprar na outra extremidade dando formato ao frasco, é que os recipientes de vidro se tornaram mais acessíveis (AKERMAN, 2000).

Vinda para o Brasil, através da invasão holandesa, a indústria do vidro teve início no nordeste em 1810, sendo a produção através de processos de sopro e de prensagem. Quinze anos após, sofrendo com a concorrência de produtos estrangeiros, a indústria foi fechada por dificuldades financeiras. (DUDAS, 2003).

O vidro é um dos mais antigos materiais que se tem conhecimento, sendo o material mais inerte utilizado para embalagens de alimentos. Esse material pode ser considerado totalmente impermeável a gases e totalmente reciclável, sem nenhuma perda das suas características originais. Não é um material biodegradável ou combustível (BARÃO, 2011).

Trata-se de uma substância inorgânica, amorfa e fisicamente homogênea, obtida por resfriamento de uma massa em fusão que endurece pelo aumento contínuo de viscosidade até atingir a condição de rigidez, mas sem sofrer cristalização (MOURAD *et al.*, 2007).

Apesar de muitas formulações desenvolvidas, os principais materiais componentes do vidro são a cal (óxido de cálcio), a sílica (dióxido de silício) e a soda

cáustica, constituindo cerca de 90% de todo o material utilizado na fabricação do vidro (SHEREVE, 1997 citado por PRADO, 2004).

Entretanto, é importante considerar que, há limitação para produção de embalagens de vidro devido às suas propriedades, portanto, a indústria sofre constante ameaça concorrencial de outros materiais ou até mesmo de hábitos de consumo. (COELHO, 2017).

3.4 Produção de embalagens de vidro

As embalagens de vidro são, em uma visão simplificada, produzidas a partir de sílica, soda cáustica, calcário, vidro reciclado e outras matérias primas que são introduzidas de forma contínua em um forno aquecido a gás natural e eletricidade. Em seguida o vidro é moldado em máquinas automáticas, dando forma ao produto (COELHO, 2017).



Figura 2 - Fases do processo produtivo de embalagem de vidro.
Fonte: Adaptado de COELHO, 2017.

Na figura 2, é indicado as fases de produção de embalagens de vidro segundo OSE (2016), citado por Coelho (2017).

Fase 1: Composição do vidro

Nesta fase, as matérias-primas que farão parte da composição das embalagens são dosadas e misturadas. Nessa etapa também podem ser incorporados resíduos de vidro moído proveniente de reciclagem interna ou externa.

Fase 2: Fusão das matérias-primas

O material dosado e misturado é inserido em fornos a temperaturas entre 1.500 e 1.600°C, onde ocorrerá a fusão dos materiais. O vidro liquefeito é movido ao longo do tanque e passa para a fase de afinação, em que se procura garantir a homogeneidade de toda a massa fundida.

Fase 3: Moldação das embalagens de vidro

A moldação é realizada em duas fases. O vidro é introduzido em um primeiro molde, onde toma a forma inicial (pré-forma), e em seguida é transferido para o molde final, onde adquire a forma final da embalagem. O processo de moldação final pode ser observado na figura 3.



Figura 3 - Processo de sopro de garrafas de vidro.

Fonte: <http://www.vidrariadelaboratorio.com.br/fabricacao-vidro/>

Fase 4: Recozimento e tratamento de superfície

Durante a moldação do vidro, a superfície externa entra em contato com o molde a uma temperatura mais baixa do que a massa fundida. Dessa forma, esta camada se torna mais fria do que as camadas interiores.

O recozimento é um tratamento térmico que consiste em homogeneizar termicamente toda a massa vítrea, uma vez que dada a baixa condutibilidade térmica do vidro, a diferença de temperatura, tende a se manter.

Fase 5: Inspeção e controle de qualidade

Após o recozimento, as embalagens são analisadas por máquinas de inspeção automática, que eliminam, através de mecanismo de detecção de defeitos, as embalagens não conformes.

Fase 6: Embalagem

As embalagens de vidro são então acondicionadas em paletes, e protegidas com filme plástico para facilitar o transporte.

3.5 Reciclagem do vidro

Idealmente, após utilizadas, as embalagens de vidro seriam recolhidas, reenchidas e enviadas ao mercado novamente para serem usadas até o desgaste, e então recicladas (COELHO, 2017). Na figura 4, ilustra-se o processo da reciclagem de embalagens de vidro.

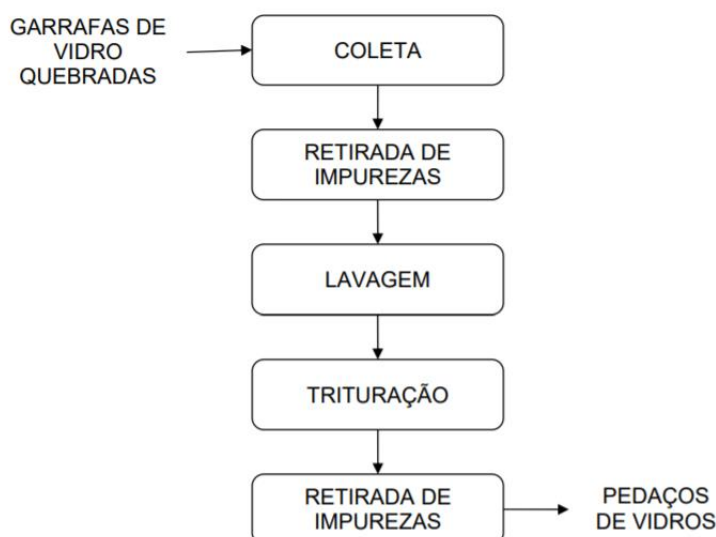


Figura 4 - Diagrama da reciclagem de embalagens de vidro
Fonte: VALT, 2004.

Segundo Valt (2004), para a reciclagem, a primeira etapa após a coleta é a separação dos metais contaminantes por um eletroímã. Em seguida, o material é lavado com água para remoção de impurezas e passa por uma esteira para a separação de restos de materiais indesejáveis que não foram eliminados nas etapas anteriores.

O material lavado é triturado em pedaços homogêneos, e passado novamente por um eletroímã para a separação de metais ainda existentes nos cacos. Os pedaços de vidros resultantes do processamento são armazenados para posterior utilização.

3.6 Embalagens de PET

A partir da década de 70, com o desenvolvimento do processo de injeção e sopro, o PET começou a ser utilizado na indústria de embalagens, majoritariamente no setor de bebidas carbonatadas, substituindo as garrafas de vidro (LANDIM *et al.*, 2016).

O polietileno tereftalato (PET) faz parte do grupo de materiais plásticos que resulta da união de monômeros para formar polímeros, possui propriedades termoplásticas e pode ser reprocessado várias vezes pelo mesmo processo ou por processo de transformação (ABIQUIM, 2004).

O PET é produzido através da reação de condensação do etilenoglicol com o ácido tereftálico, mostrado na figura 5.

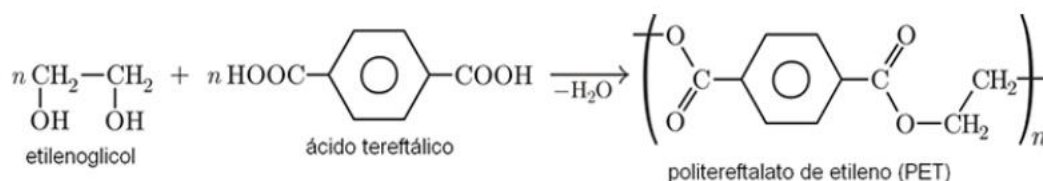


Figura 5 - Reação de condensação para produção de PET.
 Fonte: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/poliester.htm>

Devido ao baixo peso das embalagens para transporte, a alta resistência mecânica e química, e ao baixo desperdício de matéria-prima nas fases de produção e distribuição, o PET tem ganhado preferência no mercado de embalagens (MARTINS, 2020). Atualmente, no Brasil, a resina PET está presente em vários produtos, em maior parte no envase de produtos alimentícios, conforme se observa na tabela 1.

Tabela 1 - Utilização do PET para embalagens

Utilização do PET	%
Refrigerante	55,0
Óleo comestível	28,0
Água mineral	7,0
Outros setores	10,0

Fonte: ABEPET, 2004

Mesmo não causando nenhum tipo de contaminação ao solo ou lençóis freáticos com o descarte incorreto, a introdução do PET no setor de embalagens plásticas deu origem a um novo problema ambiental. Os milhões de toneladas de plástico despejados anualmente, de alguma forma acabam chegando ao oceano, contribuindo assim para a ingestão de plásticos e microplásticos por animais, provocando, além da introdução de toxinas na cadeia alimentar, um elevado índice de mortalidade (MARTINS, 2020; CONCEIÇÃO *et al.*, 2019).

Em 2004, Valt já destacava que os grandes volumes de plásticos incorretamente descartados diariamente afetam a vida de ecossistemas e do ser humano, ressaltando que “o descarte adequado destas embalagens e seu

encaminhamento para a reciclagem são fundamentais para que os aterros sanitários sejam poupados e para que o meio ambiente não seja prejudicado”.

3.7 Produção de embalagens de PET

Como matéria-prima para a produção de embalagem de PET, é necessário somente a resina que é produzida a partir da reação de condensação do etilenoglicol com o ácido tereftálico. Esse tipo de resina é comercializado em seu estado cristalino e granulado, também chamado de *pellet* (Figura 6).



Figura 6 - Pellets de resina PET virgem.
Fonte: DUARTE, 2017.

De acordo com Duarte (2017) e Batista (2017), na indústria de transformação, a resina passa por um processo de extrusão, em que sai de seu estado sólido e passa para o estado amorfo. Neste estado as moléculas estão desordenadas, podendo ser moldadas conforme necessário. O primeiro estágio da produção de embalagem PET é a preforma. Em seguida, as preformas são sopradas dentro de um molde para adquirir o formato desejado.

Existem duas técnicas utilizadas para produção de embalagens de PET: um e dois estágios. No primeiro caso, os processos de injeção e sopro são realizados em uma única máquina (*Injection and blow molding machine* – ISBM) em processo cíclico. No segundo caso, os processos de injeção e sopro são realizados em máquinas diferentes: máquina de injeção (*Injection mold machine* – IMM), para produzir preformas, e máquina de sopro (*Stretch blow molding* – SBM), em que são inseridas preformas para produzir garrafas. Ao entrar na máquina de sopro, as preformas são

aquecidas por lâmpadas de infravermelho dispostas em um forno para tornar o material amorfo possibilitando a moldagem no formato desejado.

Por terem maior resistência mecânica, após a produção, as embalagens em PET podem ser acondicionadas em paletes, em caixas, ou em sacos para transporte e comercialização.

3.8 Reciclagem do PET

A reciclagem de plásticos é dividida em duas categorias de acordo com o tipo de resíduo: industrial e pós-consumo. O primeiro é proveniente de aparas e resíduos do próprio processamento do material ainda na fase industrial. Esse material é recuperado e volta ao início do ciclo de produção sem precisar de outros tipos de processamento. O resíduo pós-consumo, como o próprio nome diz, passou pelo consumidor, como embalagens plásticas, garrafas, entre outros. Em geral, os resíduos industriais apresentam maior qualidade comparado ao de pós-consumo por serem mais limpos e apresentarem menor grau de processamento (HENTOUX, 2018).

Existem três tipos de reciclagem de resíduo plástico pós-consumo: mecânica, química e energética. Segundo a Romão *et al.* (2009), o Brasil tem sua reciclagem de PET realizada majoritariamente de forma mecânica. Na figura 7 tem-se um esquema demonstrando as etapas da reciclagem mecânica convencional no Brasil, explicadas na tabela 2.

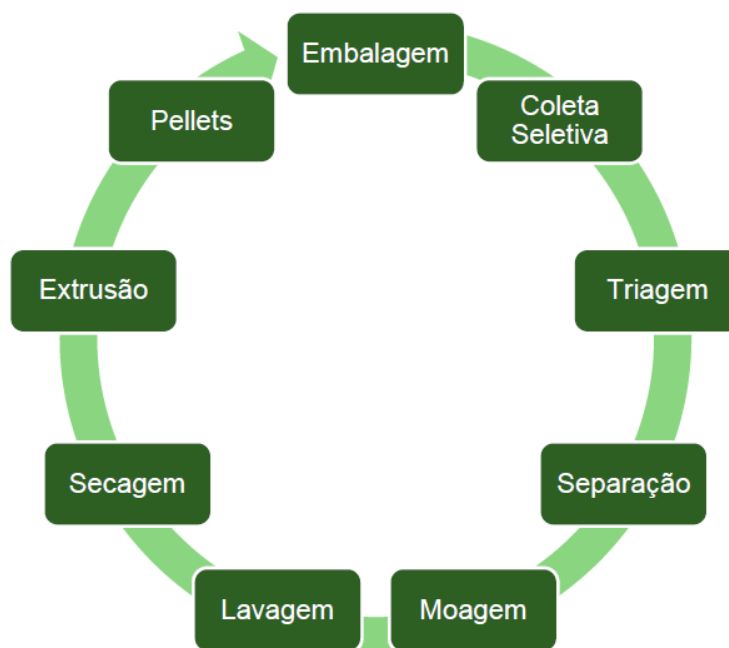


Figura 7 - Esquema da reciclagem mecânica convencional de PET
Fonte: HENTOUX, 2018

Tabela 2 - Etapas da reciclagem mecânica convencional de PET

Fase 1 Coleta seletiva	Nesta fase, os catadores recolhem manualmente as garrafas encontradas no meio ambiente, em aterros sanitários, lixões, ou unidades municipais de coleta seletiva. O local de coleta do material define o tipo de processamento que será realizado, pois o material coletado em lixões apresenta um grau de contaminação maior que o material obtido a partir de coleta seletiva, exigindo um dispendioso processo de limpeza, desvalorizando-a.
Fase 2 Triagem	Ao chegar aos centros de triagem, os resíduos coletados são separados, de forma manual ou automática, a fim de garantir que não haja contaminantes e mistura de diferentes tipos de plástico comprometendo o processo de reciclagem.
Fase 3 Separação	Em seguida as embalagens são separadas por cor e prensadas, viabilizando a comercialização do material a longas distâncias.
Fase 4 Moagem	Na moagem, ocorre a fragmentação do produto em flocos em moinhos de facas rotativas. Os flocos devem ter tamanho uniforme, em torno de 9,5 mm, para que na etapa de processamento a fusão ocorra uniformemente.

Fase 5 Lavagem	Os flocos moídos são transportados pneumaticamente para lavadoras com água e produtos químicos de limpeza para remoção de contaminantes orgânicos. As lavadoras são máquinas que possuem pás rotativas que promovem grande atrito e movimentação dos flocos.
Fase 5 Secagem	Os flocos são secos por meio de uma centrífuga e em seguida passam por processo térmico. Os flocos secos são então enviados ao processo de extrusão.
Fase 6 Extrusão	Essa etapa consiste no reprocessamento do material pelo processo de extrusão do material fundido para formação de produtos acabados. A extrusão realiza a homogeneização do material reciclado.
Fase 7 Pellets	O material extrudado é pelletizado, e embalado já em condições de ser enviado para processo de injeção e sopro para fabricação de novas embalagens.

Fonte: Próprio autor adaptado de VALT, 2004; SANTOS, 2008; HENTOUX, 2018.

3.9 Embalagens de PET pós consumo (PET-PCR)

Segundo o 11º Censo da Reciclagem do PET no Brasil, em 2019, o Brasil reciclou 55% das embalagens de PET descartadas pela população. Esse volume equivale a 311 mil toneladas do produto, 12% acima do registrado em 2018. Esse montante corresponde a 36% do faturamento total do setor de PET no Brasil (ABIPET, 2019).

Em dezembro de 1998, a Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde publicou a portaria nº 987 aprovando a utilização de PET-PCR multicamadas para embalagens alimentícias. Este tipo de embalagem, é fabricado através do processo de co-injeção, em que o PET-PCR fica entre duas camadas de PET virgem, evitando o contato direto do PET-PCR com o alimento. Em março de 2008, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), através da resolução RDC nº 20, possibilitou a inclusão de novas tecnologias para o uso de PET-PCR grau alimentício. Neste caso, não é necessário o processo de co-injeção, uma vez que, por esse tipo de resina ter um alto grau de exigências sanitárias, é considerado seguro para entrar em contato com o alimento.

A resina PET-PCR grau alimentício, que deve ser aprovada pela ANVISA a cada vez que for desenvolvida, geralmente é produzida por empresas de grande porte,

pois o investimento em equipamentos que garantam a eficiência nas etapas de descontaminação é alto (HENTOUX, 2018).

Para as empresas de transformação, a utilização de resina reciclada é vantajosa pelo preço competitivo em comparação à resina virgem. Normalmente, *pellets* de PET-PCR são comercializados a 70% do valor da resina virgem, e PET-PCR grau alimentício a cerca de 80% do valor do *pellet* virgem. Outro motivo que tem aumentado a procura de PET-PCR pelas empresas, é o aumento da conscientização ambiental da população (HENTOUX, 2018).

Após a aprovação do uso de PET-PCR grau alimentício pela ANVISA, a indústria de bebida passou a utilizar largamente esse tipo de resina para produção de garrafas, principalmente para bebidas não alcóolicas (HENTOUX, 2018).

3.10 Avaliação do ciclo de vida (ACV)

De acordo com o *Global Protocol on Packaging Sustainability 2.0* (The consumer goods forum, 2011), a avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma metodologia para quantificar os impactos ambientais associados ao ciclo de vida de um bem ou serviço, a partir da extração da matéria-prima ao descarte final do produto após o uso.

Na década de 1960, com a crise do petróleo, a sociedade começou a questionar os limites da extração dos recursos naturais, principalmente os combustíveis fósseis e recursos minerais, dando origem aos estudos de ACV. Após a crise do petróleo, o interesse por esses estudos enfraqueceu, ressurgindo somente na década de 80 em decorrência do crescente interesse pelo meio ambiente, e se intensificando a partir de 1990 (MOURAD *et al.*, 2007).

Com o grande número de empresas interessadas na metodologia, instituições e consultores começaram a criar novos critérios de análise a cada estudo obtendo diferentes resultados para a análise de um mesmo produto, colocando em questão a confiabilidade do método ACV. Assim, em 1979, foi criada a *Society for Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), tendo como objetivo normalizar uma metodologia e critérios para a ACV (SONNEMANN *et al.*, 2004 citado por SOUSA, 2008).

Da mesma forma, foram criadas normas sobre o sistema de gestão ambiental em diferentes países para o mesmo fim, mas que, por terem diferentes critérios, resultavam em divergências para uma mesma análise. Então, em junho de 1993, foi

criado um comitê específico para a elaboração de normas sobre gestão ambiental, o Comitê técnico 207. Este comitê editou em 1996 as primeiras normas da série ISO 14.000, da qual fazem parte os requisitos da ACV (CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 2010).

O estudo de ACV permite quantificar o desempenho ambiental a partir de indicadores que abordam os temas mais urgentes de preocupação ambiental. São eles:

3.10.1 Energia primária não renovável

A demanda de energia primária não renovável (MJ) se refere às fontes em que existe a possibilidade de esgotamento, e que ocorre em função da velocidade em que são consumidas. Encontram-se na categoria de fontes não renováveis todos os derivados de petróleo, combustíveis radioativos, a energia geotérmica e o gás natural (KOVALESKI *et al*, 2020).

A utilização de energia não renovável em grande escala, causa uma grande quantidade de emissão de CO₂ em seu processo de extração e refinamento, dessa forma colaborando com o aumento de implicações negativas sobre o meio ambiente, como o aumento do efeito estufa (OTTONI, 2016).

3.10.2 Pegada de carbono

Widemann e Minx (2008), citados por Lin *et al.* (2013) definem pegada de carbono como “uma medida da quantidade total de CO₂ emitido, direta ou indiretamente, por uma atividade ou acumulado pelos diversos estágios de vida do produto, incluindo atividades, populações, governos, companhias, organizações, processos, setores industriais etc”.

Morini (2019) diz que “a pegada de carbono é calculada somando as emissões diretas e indiretas de CO₂, mais as emissões de outros gases do efeito estufa de um dado produto, processo ou atividade relacionada ao ciclo de vida”. Geralmente é indicada com a unidade de carbono equivalente. Esse conceito surgiu para viabilizar o mercado de carbono, representando todos os gases do efeito estufa em uma única unidade.

Entretanto, há estudos que distinguem os tipos de emissões causados por atividade humana e pelo próprio ciclo biológico do carbono:

Pegada de carbono fóssil (kg CO₂ fóssil) são as emissões de gases de efeito estufa com impacto de longo prazo nas mudanças climáticas, ou seja, originadas de invenção/atividade antrópica.

Pegada de carbono biogênica (kg CO₂ biogênico) se refere a remoções/emissões líquidas de gases de efeito estufa que fazem parte do ciclo biológico do carbono, ou seja, não têm impactos nas mudanças climáticas de longo prazo.

3.10.3 Consumo de água

Consumo de água (kg de água) se refere ao consumo líquido total de água doce, resultando em uma diminuição da quantidade de água doce prontamente disponível em uma bacia hidrográfica. Inclui água absorvida pelas plantas e evapotranspiração apenas se alimentado por irrigação. Vale destacar que, no Brasil, considera-se a água como uma fonte renovável (D'SOUZA, 2020).

3.10.4 Potencial de *Smog* fotoquímico

Potencial de *smog* fotoquímico (kg VOC) é o potencial de criação de uma mistura de poluentes que são formados quando óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (VOCs) reagem com a radiação do sol, criando uma névoa sobre as cidades. É muitas vezes chamado de *summer smog* (*smog* de verão) pois é quando há uma maior incidência de raios solares (AUSTRALIA, 2004).

3.10.5 ReCiPe

ReCiPe (pontos) é um método para avaliação do ciclo de vida. Tem a função de transformar uma longa lista de indicadores em um limitado número de indicadores medidos por pontos, avalia impactos à saúde humana e agrega várias áreas diferentes de preocupação ambiental: destruição da camada de ozônio, toxicidade, radiação, potencial fotoquímico de oxidação de ozônio, formação de partículas, mudanças climáticas, acidificação, eutrofização, consumo de combustível fóssil/consumo de minerais (GOEDKOOPE *et al.*, 2009; DHALIWAL *et al.*, 2014).

4. METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento do trabalho consistiu em definir parâmetros para simular os impactos ambientais causados por embalagens de vidro e de PET-PCR a partir do banco de dados GaBi e ainda avaliar os ganhos de sustentabilidade na conversão de embalagens de vidro em PET-PCR.

4.1 Banco de dados GaBi

GaBi *solutions* é um banco de dados para avaliação de ciclo de vida desenvolvido pela empresa Sphera – uma empresa de investimentos de ativos alternativos em tecnologia e inovação, que ajuda empresas a tornar suas operações e produtos sustentáveis.

É possível fazer o *download* do banco de dados GaBi gratuitamente por um período de teste a partir do site da empresa Sphera.

A pesquisa utilizou as seguintes informações do banco de dados GaBi: energia primária não renovável; pegada de carbono fóssil; consumo de água; *Smog* fotoquímico; e ReCiPe nas etapas de obtenção de matéria-prima, produção, distribuição, uso e disposição final das embalagens de vidro e PET PCR.

4.2 Parâmetros utilizados para pesquisa de comparação das embalagens de vidro e PET-PCR

Para consulta no banco de dados, foi necessário definir uma *baseline* com as informações de peso da embalagem de vidro, a porcentagem de perda durante sua produção e a porcentagem considerada de reciclagem pós-consumo. Os mesmos parâmetros foram definidos para a embalagem de plástico (Tabela 3).

Tabela 3 - Parâmetros utilizados para pesquisa no banco de dados GaBi

	Vidro	PET-PCR
Peso da embalagem	450 g	100 g
Porcentagem de perda durante a produção	5%	1,5%
Porcentagem de material reciclado após consumo	55%	55%

Fonte: Próprio autor

Para a porcentagem de perda durante a produção, foi considerado somente a perda durante o processo de sopro segundo ABIPET e ABIVIDRO.

Foi considerado a mesma taxa de reciclagem (55%) das embalagens de vidro e PET PCR, uma vez que, segundo a ABIPET o Brasil reciclou 55% das embalagens descartadas em 2019 (ABIPET, 2020), e mesmo podendo ser reciclada infinitamente, segundo a ABIVIDRO o sistema de reutilização de embalagens de vidro está em declínio no Brasil e restringe-se, na prática, às garrafas de cerveja (ROSA *et al.*, 2007).

Para uma melhor comparação dos dados obtidos na conversão de embalagens de vidro para PET-PCR, foi considerada a mesma distância de obtenção de matéria-prima para o local de produção, e do local de produção para a distribuição.

O estudo foi realizado considerando somente a embalagem propriamente dita, não sendo consideradas embalagens secundárias, como uso de paletes, plástico filme, engradados e tampas.

As informações de consumo e emissões obtidos do banco de dados resultam de uma análise considerando 1 milhão de unidades de cada tipo de embalagem.

4.3 Etapas do ciclo de vida

Tabela 4 - Etapas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Matéria-prima	Extração de matéria-prima e produção de intermediários
Produção	Conversão de matéria-prima à embalagem final e tratamento da produção de <i>Scrap</i>
Distribuição	Distribuição da embalagem final da indústria de transformação para as empresas
Uso	Distribuição das empresas ao consumidor, atividade de varejo (relacionadas à energia)
Disposição final	Eliminação e recuperação de resíduos de embalagens

Fonte: Próprio autor a partir do *software* GaBi

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com as informações coletadas na base de dados GaBi foi possível construir a tabela 5 com o consumo de água e energia não renovável e emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente nas fases de obtenção de matéria-prima, produção, distribuição, uso e disposição final.

Tabela 5 - Consumo de água e energia não renovável e emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente por fase do ciclo de vida das embalagens de vidro e PET-PCR.

	Indicador (Unidade)	Energia primária não renovável (MJ)	Pegada de carbono fóssil (kg CO ₂ equiv.)	Consumo de água (kg de água)	Smog fotoquímico (kg VOC)	ReCiPe (pontos)
Matéria-prima	Vidro	8,79	0,635	1,21	0,00067	0,059
	PET-PCR	1,50	0,097	0,355	0,00013	0,009
Produção	Vidro	-0,10	-0,010	0,00	-0,00001	-0,001
	PET-PCR	1,42	0,086	0,526	0,00009	0,008
Distribuição	Vidro	0,36	0,027	0,02	0,00004	0,002
	PET-PCR	0,08	0,006	0,004	0,00001	0,001
Uso	Vidro	0,04	0,003	0,00	0,00000	0,000
	PET-PCR	0,01	0,001	0,000	0,00000	0,000
Disposição final	Vidro	-4,45	-0,323	-0,62	-0,00032	-0,030
	PET-PCR	-0,76	-0,049	-0,192	-0,00006	-0,005
Total	Vidro	4,64	0,332	0,61	0,00038	0,030
	PET-PCR	2,24	0,141	0,693	0,00017	0,013
	Ganhos	2,39	0,191	-0,08	0,00021	0,017

Fonte: Próprio autor a partir do banco de dados GaBi

Para uma melhor visualização e análise dos dados, foi elaborada a figura 8, com a porcentagem de influência de cada etapa para os 5 indicadores.

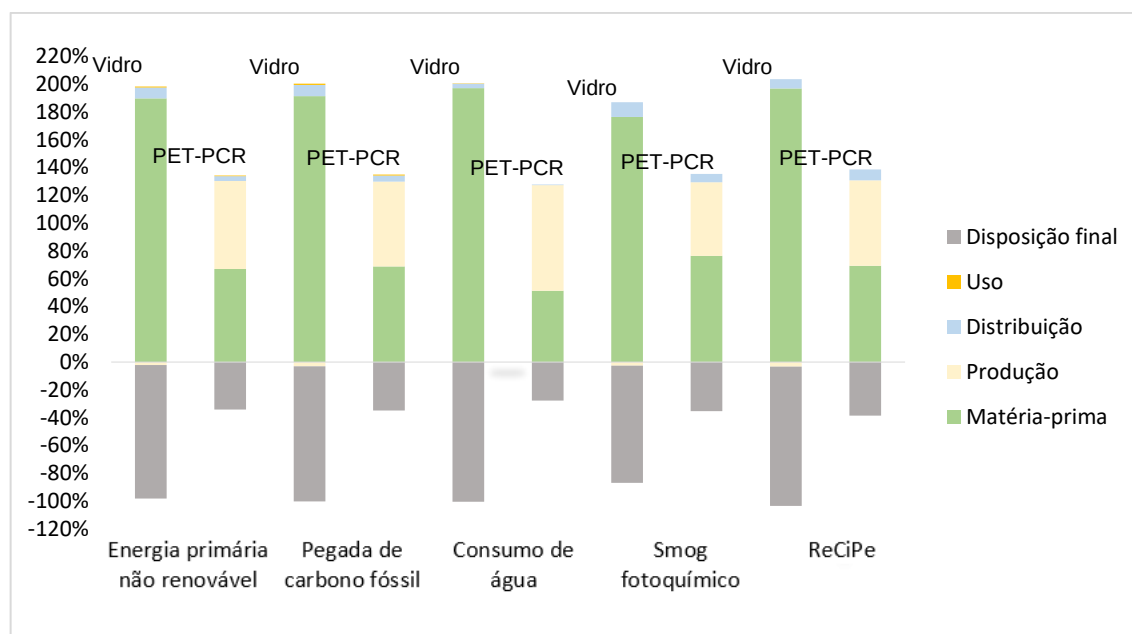


Figura 8- Porcentagem da contribuição de cada etapa para os indicadores estudados.

Fonte: Próprio autor.

Analisando os indicadores, pôde-se notar que os maiores consumos e emissões, para ambos tipos de embalagens, se dá na fase de obtenção da matéria-prima (com exceção do consumo de água para PET-PCR, em que a maior taxa é

durante a produção), e que a etapa que mais contribui para diminuir o impacto das emissões é durante o fim de vida, ou disposição final.

A pegada de carbono fóssil se refere as emissões de carbono originadas por atividade humana, e está diretamente relacionada ao consumo de energia primária não renovável. Morini (2019) destaca que Rydh e Sun (2005) e Ashby et Johnson (2013), concluíram em seus estudos que a relação entre a energia consumida e a emissão de carbono pode ser representada por uma equação linear. Porém, no presente estudo não foi possível encontrar a relação linear entre os indicadores por não haver pontos suficientes, pois o *software* apresenta somente um resultado para cada parâmetro e etapa analisados.

O consumo de energia primária não renovável é o indicador que proporcionalmente, tem o maior índice de consumo. Na etapa de obtenção de matéria-prima, há um elevado consumo de energia primária não renovável para o vidro (8,79 MJ), pois todos os materiais utilizados para a produção do vidro (soda cáustica, sílica e cal) não são renováveis, e o processo de obtenção desses materiais requer um alto consumo de combustíveis fósseis, resultando em uma pegada de carbono fóssil de 0,635 kg de CO₂ equivalente (D'FLORA, 2020).

O PET-PCR, por sua vez, não requer recursos existentes na natureza, uma vez que é proveniente da reciclagem de garrafas já existentes, portanto sem consumo de energia não renovável durante a extração. Entretanto, segundo Gonçalves-Dias et al (2006) a coleta, seleção e transporte do lixo representam o maior custo para a reciclagem, portanto, trata-se de um problema principalmente de canais de distribuição, que consomem combustíveis fósseis, resultando em um consumo de energia não renovável de 1,50 MJ, e pegada de carbono fóssil de 0,097 kg de CO₂ equivalente.

Prado (2007) destaca que o consumo de recursos energéticos durante a produção de embalagens está relacionado fundamentalmente ao funcionamento dos equipamentos. Ainda segundo o autor, as emissões de carbono durante a etapa de produção de embalagens plásticas são causadas principalmente na etapa de sopro. E, segundo Abdallah (2009), a principal fonte de emissão de gases do efeito estufa na produção de embalagens de vidro é na etapa de fundição e nos fornos de recozimento.

Com relação ao consumo de energia associado ao combustível para ambos os tipos de embalagens, os principais responsáveis são o transporte rodoviário e a geração de vapor nas caldeiras (VALT, 2004). De acordo com Castro *et. al.* (2018), as garrafas de vidro são pesadas, dificultando a cadeia logística devido ao aumento de emissões de gases geradores de efeito estufa e poluição do ar de uma forma geral, em virtude do transporte, consumindo 0,36 MJ de energia não renovável e gerando 0,027 kg de CO₂ equivalente.

Ao contrário do vidro, as garrafas PET-PCR são essencialmente leves, e, mediante os elementos que a compõem, a cadeia produtiva deste artefato se torna mais rentável, consumindo 0,08 MJ de energia não renovável e gerando 0,006 kg de CO₂ equivalente.

Segundo o banco de dados GaBi, a principal atividade relacionada ao uso é o consumo de energia elétrica relacionada à distribuição dos produtos aos consumidores. O maior consumo das embalagens de vidro é justificado por sua condutividade térmica, que é menor que a do PET-PCR, requerendo um maior gasto de energia elétrica para resfriar os produtos.

A disposição final se refere ao final do ciclo de vida do produto, podendo ser reciclado, descartado, reutilizado ou ter outro destino possível. A reciclagem das embalagens de PET-PCR e de vidro são imprescindíveis para a descarbonização do ciclo de vida dos produtos, pois evitam ou diminuem a necessidade de exploração de recursos minerais e os impactos ambientais causados pela própria exploração e pelo descarte inadequado do lixo (CAPELINI, 2007).

A taxa de reciclagem considerada no presente trabalho (55% para ambos tipos de embalagens), resultou em um ganho de energia primária não renovável para o vidro de 4,45 MJ e para o PET-PCR de 0,76 MJ. Ao mesmo tempo houve uma descarbonização de 0,323 kg de CO₂ equivalente para o vidro e 0,049 kg de CO₂ equivalente para o PET-PCR. Os ganhos de sustentabilidade para esses indicadores são proporcionais à taxa de reciclagem, ou seja, quanto maior a taxa de reciclagem das embalagens pós-consumo, maior será o ganho energético e descarbonização.

É importante ressaltar que para esse estudo não foi especificado o tipo de energia utilizada em todas as etapas para cálculo de emissão de CO₂, podendo os resultados serem alterados proporcionalmente ao combustível fóssil consumido (MORINI, 2019).

O consumo de água, diferentemente dos outros indicadores, tem maior impacto em etapas distintas do ciclo de vida das embalagens de vidro e PET-PCR. Para o vidro, o maior consumo de água se dá na etapa de obtenção de matéria-prima, isso porque, a extração de sílica, cal e soda cáustica requerem um alto consumo de água (ABDALLAH, 2009). Para o presente estudo, considerando 1000 unidades de embalagem de vidro, há um consumo de 1,21 kg de água.

Para o PET-PCR, há consumo de água na etapa de obtenção de matéria-prima durante a seleção e limpeza do PET pós-consumo (0,355 kg de água). Porém, durante a produção é que há o maior consumo de água (0,526 kg de água), pois as etapas que envolvem lavagem são as principais responsáveis pela geração de efluentes dos processos (PRADO, 2007). Na produção de embalagens de vidro, no entanto, não há consumo de água, pois seu processo de produção requer somente energia térmica.

Na etapa de distribuição, há um baixo consumo de água: 0,02 kg de água para embalagem de vidro e 0,004 kg de água para embalagem de PET-PCR. Esse consumo é relacionado diretamente com a água necessária para o transporte das embalagens. Para o uso, sendo ele relacionado diretamente ao consumo de energia elétrica utilizada para venda ao consumidor, não há consumo de água.

A disposição final, assim como para os outros parâmetros, contribui para uma diminuição dos impactos ambientais. O descarte correto das embalagens, e sua reciclagem, contribuem para uma diminuição da extração de recursos naturais, resultando em um menor consumo de água no ciclo de vida de ambos tipos de embalagens.

Os compostos orgânicos voláteis (VOCs), que são responsáveis pelo potencial de *smog* fotoquímico, são uma consequência da poluição ambiental por resíduos de solventes, óleos, e meios de transporte à combustão.

Ghanem *et al.* (2013) diz que para o PET, as altas temperaturas aplicadas no processamento podem causar degradação do PET e aparecimento de subprodutos,

como os VOCs, justificando as emissões nas etapas de matéria-prima (0,00067 kg VOC) pela transformação do PET-PCR moído em pellets, e na etapa de produção (0,00009 kg VOC) durante a injeção e sopro das embalagens.

Para o vidro, a maior emissão de VOCs é na etapa de obtenção de matéria-prima devido ao consumo de combustíveis fósseis na mineração da sílica, cal e soda cáustica (0,00067 kg VOC). Durante a etapa de produção, é considerado que há uma redução na emissão de VOCs (-0,00001 kg VOC), pois a massa vítrea não emite VOCs.

Na distribuição, a emissão de VOCs, para ambos tipos de embalagens, está associada à queima de combustíveis fósseis. Para o vidro, considera-se uma maior emissão (0,00004 kg VOC), devido ao maior peso das embalagens de vidro para transporte quando comparado ao PET-PCR (0,00001 kg VOC).

Na etapa de uso, não é contabilizada emissão de VOCs, considerando que, no Brasil, a energia elétrica não é fornecida a partir de queima de combustível fóssil.

A disposição final apropriada, assim como nos outros indicadores, contribui para uma diminuição da emissão de VOCs. Com a taxa de reciclagem considerada, há uma diminuição da emissão de VOCs para embalagens de vidro de 0,00032 kg VOC e para o PET-PCR de 0,00006 kg VOC.

A categoria de impacto das mudanças climáticas dentro do método ReCiPe inclui os gases do efeito estufa especificados no protocolo de Kyoto usando potenciais de aquecimento global do Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2007).

Sendo esse um indicador relacionado aos gases do efeito estufa, assim como os VOCs, percebe-se uma relação de grandeza entre os dois índices. Sendo a maior pontuação durante a obtenção de matéria-prima com 0,059 pontos para as embalagens de vidro e 0,009 pontos para as embalagens de PET-PCR. Na produção, assim como no potencial de *smog* fotoquímico, há uma diminuição para as embalagens de vidro, com -0,001 pontos e um aumento para a embalagem de PET-PCR com 0,008 pontos.

A distribuição, assim como nos outros indicadores, é relacionada à queima de combustível fóssil pelo transporte, que para embalagens de vidro adicionou-se 0,002

pontos e para embalagens de PET-PCR, 0,001 pontos. Para o uso não há adição de pontos ReCiPe.

A disposição final correta contribui com uma diminuição da pontuação total do ciclo de vida dos produtos, com -0,30 para embalagens de vidro e -0,005 para embalagens de PET-PCR.

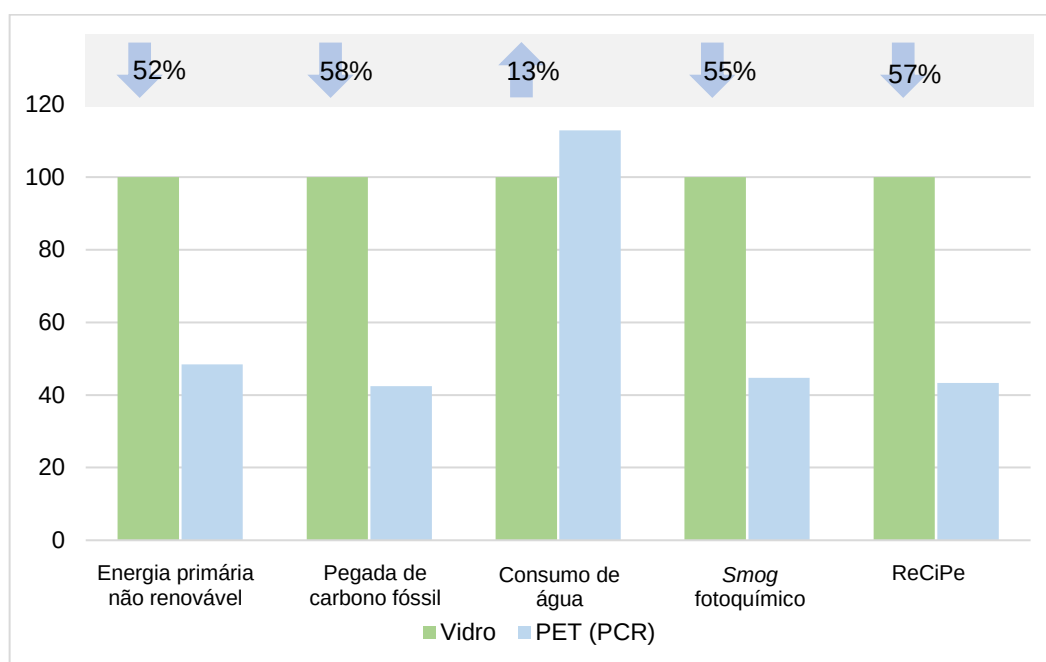


Figura 9 - Ganhos de sustentabilidade na conversão de embalagens de vidro em PET-PCR.
Fonte: Próprio autor.

A partir da análise dos resultados apresentados na Figura 9, conclui-se que houve uma diminuição de 52% de energia não renovável na conversão de embalagens de vidro em PET-PCR, resultando em um ganho de sustentabilidade para esse indicador.

Também houve redução da pegada de carbono (58%), redução de emissão de *smog* fotoquímico (55%) e diminuição de pontos de ReCiPe (57%). Entretanto, pôde-se concluir que houve um aumento de consumo de água na conversão de vidro para PET (13%).

Em alguns países, onde há escassez de acesso à água, esse seria um fator decisivo para empresas decidirem entre os dois tipos de embalagens. Porém, no Brasil, onde na maior parte do país não há restrições, o ganho de sustentabilidade dos outros indicadores estudados tem um maior peso nas tomadas de decisões. Ainda

assim, a estratégia das empresas por uma ou outra opção, geralmente está atrelada à aceitação do consumidor.

Vale ressaltar que valores mais precisos relacionados à porcentagem de reciclagem das embalagens de vidro e PET-PCR, bem como a possibilidade de reuso desses produtos, poderão alterar a diferença entre os valores dos índices estudados.

6. CONCLUSÃO

Ao mensurar os consumos e emissões dos produtos das empresas de embalagens foi possível comparar diferentes embalagens e analisar os ganhos de sustentabilidade. Para um estudo preliminar sobre o ciclo de vida de embalagens de vidro e PET-PCR, o banco de dados GaBi se mostrou uma ferramenta eficaz. Pela análise dos dados obtidos no banco de dados GaBi, pôde-se concluir que há um ganho de sustentabilidade na conversão de embalagens de vidro em PET-PCR nos indicadores analisados, exceto pelo consumo de água, em que há um acréscimo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLAH, N. Glass packaging recycling and its effect on the Egyptian environment. In: **AIN SHAMS UNIVERSITY INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ENGINEERING**, 3., 2009.

ABIPET – **Associação Brasileira da Indústria de PET**. Site corporativo. Disponível em: <www.abipet.org.br>. Acesso em: 04 nov 21.

ABRE – **Associação Brasileira de embalagem**. Site corporativo. Disponível em: <www.abipet.org.br>. Acesso em: 04 nov 21.

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017 e 2018/2019. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br>> Acesso em: 07 nov 21.

AKERMAN, M. Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro. **CETEV – Centro técnico de elaboração do vidro**. Saint-Gobain Vidros Brasil, 2000. 37 p.

ALMEIDA, C. M. V. B.; RODRIGUES, A. J. M.; AGOSTINHO, F.; GIANNETTI, B. F. Material selection for environmental responsibility: the case of soft drinks packaging in Brazil. *Journal of Cleaner Production* 142 (2012) 173~179.

ASHBY, M. F.; JOHNSON, K. **Materials and Design: the art and science of materials selection in product design**. 3. ed. Oxford: Butterworth Heinemann, v. 1, 2013. 416 p.

AUSTRÁLIA. **Photochemical smog – what it means for us.** EPA Information. MARÇO/2004.

BARÃO, M. Z. **Dossiê técnico - Embalagens para produtos alimentícios.** Instituto de Tecnologia do Paraná – TECPAR. AGOSTO/2011

BATISTA, J. C. **Estudo de caso e proposta de melhoria a perdas de produtividade no setor de sopragem.** Instituto Dados da Amazônia – IDAAM. Faculdade Maurício de Nassau. Área de Exatas e Tecnológicas. Manaus. 2017.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. **Portaria nº 987, de 8 de dezembro de 1998.** Brasília, 1998.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência nacional de vigilância sanitária – ANVISA. **Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 20, de 26 de março de 2008,** dispõe sobre Regulamento Técnico sobre embalagens de polietilenotereftalato (PET) pós-consumo reciclado grau alimentício (PET-PCR grau alimentício) destinados a entrar em contato com alimentos. Diário Oficial da União, Poder Executivo, DF, 26 de março de 2008.

CAMPOS, R. F. **Pegada de carbono: a relação entre mudanças climáticas e hábitos insustentáveis.** Revista Geográfica de América Central. Número Especial EGAL, 2011 – Costa Rica. II Semestre 2011, pp. 1-16.

CAPELINI, M. **Potencialidade e aplicação da prevenção de resíduos de embalagens: abordagem sobre o projeto do produto e o consumo.** Orientado por: Prof. Dr. Valdir Schalch. 2007. Dissertação (Doutorado em Ciência da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – São Carlos.

CASTRO, R. S. M.; ARAÚJO, C. C.A. Desafios e possibilidade do retorno ambiental das embalagens de PET e de vidro por meio da logística reversa em Salvador (BA) um olhar através das cooperativas CAEC e COOPERBRAVA. **Geopauta**, vol. 2, núm. 1, pp. 4-25, 2018.

CLEMENTINO, T. O.; DA SILVA, I. F. Embalagens sustentáveis: análise da exposição de embalagens do setor alimentício em gôndolas de supermercado. **Design e Tecnologia**, v. 6, n. 12, p. 78-88, 30 dez. 2016.

COELHO, S. V. R. T. **Avaliação do Ciclo de Vida de uma Garrafa de Vidro e sua Integração no Processo de Tomada de Decisão.** Orientado por: Prof. Paulo Osswald. 2017. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia e Gestão Industrial) – Universidade do Porto.

CONCEIÇÃO, M. M.; CONCEIÇÃO, J. T. P.; DALMAS, F. B.; ROSINI, A. M. O plástico como vilão do meio ambiente. **Revista Geociências UNG-Ser**, Guarulhos-SP, v. 18, n. 1, 2019

CONGRESSO NACIONAL DE EXCELENCIA EM GESTAO, 4., 2010, Niterói. **AS NORMAS DA SÉRIE ISO 14.000: CONTEXTO HISTÓRICO E ANÁLISE CRÍTICA. Inovação, Tecnologia e Complexidade para a Gestão Sustentável.** Salvador, 2010. 11p.

D'SOUZA, F.; **Beverage Packaging - A comparative Life Cycle Assessment.** On behalf of Ball Corporation. v3.0. Sphera, 2020.

DHALIWAL, H.; BROWNW, M.; FLANAGAN, W.; LAURIN, L.; HAMILTON, M. A life cycle assessment of packaging options for contrast media delivery: comparing polymer bottle vs. glass bottle. **Int J Life Cycle Assess** (2014) 19:1965–1973

DUARTE, J. D. R. **Acompanhamento e estudo dos processos de injeção, extrusão e sopro na empresa Logoplaste**. Orientado por: Doutor Mário José Gonçalves Cavaco Mende. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Environmental Footprint Database v2.0: banco de dados do Sphera's Life Cycle Assessment Database. In: **EF Database v2.0**. Disponível em: <gabi.sphera.com> Acesso em: 26 out. 2021.

FILHO, C. A. M. S.; OLIVEIRA, J. S. T.; CAVALCANTI, J. M. B.; FARIAS, H. H. B. A.; FILHO, A. F. L.; NEVES, H. J. P. Energias renováveis como fonte sustentável: uma revisão integrativa. **Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade** - Vol. 4: Congestas 2016.

G4 Diretrizes para relato de sustentabilidade. Princípios para relato e conteúdos padrão. Disponível em: <<https://sinapse.gife.org.br/download/global-reporting-initiative-g4-principios-para-relato-e-conteudos-padrao>>. Acesso em: 05 nov. 2021

GaBi database. Disponível em: <<https://gabi.sphera.com/brazil/overview/what-is-gabi-software/>> Acesso em: 26 out. 2021

GAVIOLI, M. B.; FRANCISCO, R.; SEHNEM, S. Indicadores de Sustentabilidade de uma Empresa Agroindustrial do Brasil no Período de 2009 a 2014. **Organizações em contexto**, São Bernardo do Campo, ISSNe 1982-8756 • Vol. 12, n. 23, jan.-jun. 2016.

GHANEM, A.; MAALOUY, J.; SAAD, R. A.; SALAMEH, D.; SALIBA, C. O. Safety of Lebanese Bottled Waters: VOCs Analysis and migration studies. **American Journal of Analytical Chemistry**. Vol.4 No.4(2013), Article ID:30443,14 pages.

GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; SCHYVER, A. D.; STRUIJS, J.; ZELM, R. V. **ReCiPe 2008 – A life cycle impacts assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the endpoint level**. First edition. Report I: Characterisation. 2009. Ruimte in Milieu - Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer.

GONÇALVES, A. A.; PASSOS, M. G.; BIEDRZYCKI, A. Percepção do consumidor com relação à embalagem de pescado: estudo de caso com os alunos do curso de Engenharia de Alimentos. **Estudos Tecnológicos** - Vol. 5, nº 1: 14-32 (jan/abr 2009).

GONÇALVES-DIAS, S. L. F.; TEODÓSIO, A. S. S. **Estrutura da cadeia reversa: “caminhos” e “descaminhos” da embalagem PET**. EAESP-FGV. Produção, v. 16, n. 3, p. 429-441, Set./Dez. 2006.

HENTOUX, M. A. **Análise da cadeia de valor da reciclagem de PET com ênfase no PET-PCR grau alimentício**. Orientado por: Profª. Drª. Ligia Damasceno Ferreira Marczak. 2018. Dissertação (Diplomação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre.

JACOBI, P. Educação Ambiental, cidadania e sustentabilidade. **Cadernos de Pesquisa**, n. 118, p. 189-205, março/2003.

KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P.; WOERDEN, F. V. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. **Urban Development Series**. 110p. 2018.

KOVALESKI, A.; COUTINHO, A. R. Avaliação do ciclo de vida energético do processo de fabricação de embalagens metálicas: estudo de caso para latas de bebidas. **Aya editora**, p. 13, 2020.

LANDIM, A. P. M.; BERNARDO, C. O.; MARTINS, I. B. A.; FRANCISCO, M. R.; SANTOS, M. B.; MELO, N. R. Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. **Polímeros**, 26(número especial), 82-92, 2016.

LIN, J.; LIU, Y.; MENG, F.; CUI, S.; XU, L. (2013) **Using hybrid method to evaluate carbon footprint of Xiamen city, China**. Energy Policy, v. 58, p. 220-227.

LINS, L. S.; SILVA, R. N. S. Responsabilidade Sócio-Ambiental ou Greenwash: Uma Avaliação com Base nos Relatórios de Sustentabilidade Ambiental. **Sociedade, Contabilidade e Gestão**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 1, jan/jun 2009.

LIRA, S. H.; FRAXE, T. J. P. O percurso da sustentabilidade do desenvolvimento: aspectos históricos, políticos e sociais. Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria. **Revista Monografias Ambientais – REMOA**. V. 14, N. 2 (2014): março, p. 3172 - 3182

MARTINS, M. F. S. Poluição por plástico – A crise ambiental e as políticas europeias e nacionais. Orientado por: Prof. Dr. José Eduardo Ventura. 2020. Dissertação (Mestrado em Gestão do Território: Área de especialização em Ambiente e Recursos Naturais) – Universidade Nova de Lisboa. Faculdade de Ciências sociais e humanas.

MORINI, A. A.; HOTZA, D.; RIBEIRO, M. J. P. M. **Avaliação da energia incorporada e da emissão de CO2 em recipientes para refrigerantes: PET versus vidro**. Eng Sanit Ambient | v.24 n.5 | set/out 2019 | 1027-1036.

MORINI, A. A. **Pré-avaliação da energia incorporada e da pegada de carbono como requisitos para seleção de materiais nas fases iniciais do desenvolvimento de produto**. Orientado por: Dachamir Hotza e Manuel Ribeiro. 2019. Dissertação (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis.

MOURAD, A. L.; GARCIA, E. E. C.; QUEIROZ, G. C.; GATTI, J. B.; COLTRO, L.; JAIME, S. B. M. **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. Leda Coltro (Org.). Campinas: CETEA/ITAL, 2007. [on-line]. 75p.

OTTONI, B. L. **A relação da comunicação e as embalagens biodegradáveis: um paradigma para a destinação final**. Orientado por: Prof. Dr. José Alcides Gobbo Júnior. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Estadual Paulista – Bauru.

PAUER, E.; WOHNER, B.; TACKER, M. The Influence of Database Selection on Environmental Impact Results. Life Cycle Assessment of Packaging Using GaBi, Ecoinvent 3.6, and the Environmental Footprint Database. **Section of Packaging Technology and Resource Management**, University of Applied Science, 1030 Vienna, Austria. 2020.

PRADO, M. R. **Análise do inventário do ciclo de vida de embalagens de vidro, alumínio e PET utilizadas em uma indústria de refrigerantes no Brasil**. Orientado por: Prof. Dr. Georges Kaskantzis Neto. 2007. Dissertação (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Paraná – Curitiba.

PONSTEINS, H. J.; MEYER-AURICH, A.; PRONCHNOW, A. Greenhouse gas emission and mitigation options for German wine production. **Journal of Cleaner Production** 212 (2019) 800-809.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, A. D. Poli(Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol. 19, nº 2, p. 121-132, 2009.

ROSA, S. E. S.; CONSENZA, J. P.; BARROSO, D. V. Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 26, p. 101-138, 2007.

RYDH, C. J.; SUN, M. Life cycle inventory data for materials grouped according to environmental and material properties. **Journal of Cleaner Production**, 13, 2005. 1258-1268.

SANTOS, A. C. **Estudo da reciclagem do poli(tereftalato de etileno) – PET pós-consumo e de suas propriedades, quando submetido à radiação ionizante**. Orientado por: Dr. Leonardo Gondim de Andrade e Silva. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência na área de tecnologia nuclear – Aplicações) – Instituto de pesquisas energéticas e nucleares – São Paulo.

SHREVE, R.N.; BRINK JR., J.A.; **Indústria de Processos Químicos**. 4ª Edição. Editora Guanabara. Rio de Janeiro-RJ. 717 p. 1997.

SONNEMANN, G. W.; CASTELLS, F.; SCHUHMACHER, M. Integrated Life-Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes: Advanced Methods in Resource and Waste Management. London: **Lewis Publishers**, 2004. 362 p.

SOUSA, S. R. **Normalização de critérios ambientais aplicados à avaliação do ciclo de vida**. Orientada por: Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis.

Sphera. Disponível em: <<https://sphera.com/life-cycle-assessment-lca-software/>> Acesso em: 26 out. 2021

VALT, R. B. G. **Análise do ciclo de vida de embalagens de PET, de alumínio e de vidro para refrigerantes no Brasil variando a taxa de reciclagem dos materiais**. Orientador: Prof. Dr. Georges Kaskantzis Neto. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná – Curitiba.

XAVIER, L. N. Reinterpretação conceitual do desenvolvimento sustentável em face do planejamento urbano e da economia circular. **Revista de direito econômico e socioambiental**. Curitiba. Programa de Pós-graduação em direito da PUCPR. vol. 8 n. 1. janeiro/abril 2017.