



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

DIEGO COSTA DE GODOY MAGALHÃES

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA APLICADA À CADEIA DE RECICLAGEM DO  
PET NA REGIÃO METROPOLITANA DE RECIFE**

Recife  
2024

DIEGO COSTA DE GODOY MAGALHÃES

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA APLICADA À CADEIA DE RECICLAGEM DO  
PET NA REGIÃO METROPOLITANA DE RECIFE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Química da Universidade Federal de  
Pernambuco, como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Química.

Orientador (a): Prof. Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes

Recife

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Magalhães, Diego Costa de Godoy.

Avaliação do ciclo de vida aplicada à cadeia de reciclagem do PET na região metropolitana de Recife / Diego Costa de Godoy Magalhães. - Recife, 2024.  
47 p. : il., tab.

Orientador(a): Felipe Pedro da Costa Gomes

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Química - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. análise de ciclo de vida. 2. politereftalato de etileno. 3. OpenLCA. 4. aterro sanitário. 5. reciclagem. I. Gomes, Felipe Pedro da Costa. (Orientação).  
II. Título.

660 CDD (22.ed.)

DIEGO COSTA DE GODOY MAGALHÃES

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA APLICADA À CADEIA DE RECICLAGEM DO  
PET NA REGIÃO METROPOLITANA DE RECIFE**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Engenharia  
Química da Universidade Federal de  
Pernambuco, como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Química.

Aprovado em: 26/03/2024

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Felipe Pedro da Costa Gomes (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Andrelina Maria Pinheiro Santos  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Dr. Ivo Diego de Lima Silva  
Universidade Federal de Pernambuco

À meus pais, meus pontos cardeais, porque sem  
vocês a vida seria apenas cinzenta.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus por ter me iluminado, me abençoado e por ter me dado forças em toda a minha trajetória de vida.

Agradeço aos meus pais Sebastião Raimundo Magalhães e Leonôra Costa de Godoy Magalhães por sempre acreditarem em mim.

Aos meus amigos e colegas de curso Amanda Andrade, Gabryel Vieira, Angela Kochem, Luccas Ribeiro e Maria Eduarda Mota.

E, por fim, agradeço aos meus professores Dra. Glória Maria Vinhas, Dr. Demóstenes Sobral, Dr. Jorge Vinicius, Dra Maria de Los Angeles e ao meu orientador Dr. Felipe Pedro pela paciência e apoio.

*“O Senhor é o meu pastor; nada me faltará. Ele me faz repousar em pastos verdejantes. Leva-me para junto das águas de descanso; refrigera-me a alma. Guia-me pelas veredas da justiça por amor do seu nome. ”*

*(SALMOS 23:1-3).*

## RESUMO

A sociedade, atualmente, adquire objetos pouco duradouros, a baixo custo e em larga escala, o que implica no aumento de descartes em lixões e aterros sanitários existentes no Brasil, contaminando o solo, propagando doenças e expandindo a área dos aterros sanitários. O trabalho visa avaliar os impactos ambientais e o alto consumo de energia, causados pela fabricação das garrafas PET (politereftalato de etileno), e a implementação da reciclagem, pós-consumo, para a fabricação de novas garrafas. Com isso, destaca-se a Avaliação de Ciclo de Vida, como uma ferramenta capaz de avaliar os efeitos da cadeia produtiva, o consumo de materiais e de energia e o impacto positivo que a reciclagem pode causar a longo prazo. O estudo foi desenvolvido com o software OpenLCA que permite a inserção de dados obtidos de fontes previamente existentes. Além disso, utilizou-se a base de dados secundária proveniente da biblioteca *Environmental Footprints*. O cenário 1, sem a presença da reciclagem, para a produção das garrafas, apresentou o maior nível de impacto tanto na emissão de gases do efeito estufa como no consumo energético. Agora, o cenário 2, com a presença de 20% e 30% reciclagem para produção de novas garrafas, houve um decréscimo significativo nos impactos analisados em comparação ao cenário 1. Assim, levando em consideração o Projeto de Lei 418/11, que exige no mínimo 20% de reciclagem para o PET, aumentando para 30% em cinco anos assim que a lei entrar em vigor é uma alternativa viável para obtermos uma diminuição do consumo de recursos fósseis e do gasto de energia.

**Palavras-chave:** análise de ciclo de vida; politereftalato de etileno; OpenLCA; aterro sanitário; reciclagem.

## ABSTRACT

Society currently purchases objects that are not long-lasting, at low cost and on a large scale, which implies an increase in disposal in landfills and landfills in Brazil, contaminating the soil, spreading diseases and expanding the area of landfills. The work aims to evaluate the environmental impacts and high energy consumption caused by the manufacture of PET bottles (polyethylene terephthalate), and the implementation of post-consumer recycling to manufacture new bottles. With this, Life Cycle Assessment stands out as a tool capable of evaluating the effects of the production chain, the consumption of materials and energy and the positive impact that recycling can cause in the long term. The study was developed with the OpenLCA software, which allows the insertion of data obtained from previously existing sources. Furthermore, the secondary database from the Environmental Footprints library was used. Scenario 1, without the presence of recycling, for the production of bottles, presented the highest level of impact on both greenhouse gas emissions and energy consumption. Now, scenario 2, with the presence of 20% and 30% recycling for the production of new bottles, there was a significant decrease in the impacts analyzed compared to scenario 1. Thus, taking into account Bill 418/11, which requires at least 20% recycling for PET, increasing to 30% in five years as soon as the law comes into force, is a viable alternative to reduce the consumption of fossil resources and energy expenditure.

**Keywords:** life cycle analysis; polyethylene terephthalate; OpenLCA; landfill; recycling;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Representação estrutural do PET	17
Figura 2 –	Modelo esquemático de uma máquina injetora	19
Figura 3 –	Etapas da reciclagem do PET	20
Figura 4 –	Fases da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)	21
Figura 5 –	Processo de Avaliação do Ciclo de Vida	22
Figura 6 –	Etapas da Análise de Ciclo de Vida (ACV)	25
Figura 7 –	Escopo do processo linear	26
Figura 8 –	Escopo do processo envolvendo a reciclagem	27
Figura 9 –	Processo de produção das garrafas PET sem reciclagem	28
Figura 10 –	Processo de produção das garrafas PET com reciclagem	28
Figura 11 –	Distribuição do PET por região	29
Figura 12 –	Inserção do valor de referência de consumo de garrafas PET durante o ano de 2022	29
Figura 13 –	Inserção do valor de referência de consumo de garrafas PET durante o ano de 2022	30
Figura 14 –	Etapas para o condicionamento do material para reciclagem do PET	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Toneladas de CO <sub>2</sub> equivalente correspondente a produção de PET, em toneladas	32
Tabela 2 –	Consumo, em Megajoule, dos recursos de origem fóssil para a síntese e processamento do PET	34
Tabela 3 –	Análise de variação da emissão de CO <sub>2</sub> equivalente, com 20% do PET reciclado, em toneladas	35
Tabela 4 –	Análise de variação da emissão de CO <sub>2</sub> equivalente, com 30% do PET reciclado, em toneladas	35
Tabela 5 –	Consumo, em Megajoule, dos recursos de origem fóssil para a síntese, processamento, e para a reciclagem, com 20% do PET reciclado	37
Tabela 6 –	Consumo, em Megajoule, dos recursos de origem fóssil para a síntese, processamento e para a reciclagem, com 30% do PET reciclado	38
Tabela 7 –	Emissão dos gases poluentes, em CO <sub>2</sub> equivalente, referente aos 3 cenários, em toneladas	39
Tabela 8 –	Consumo total de recursos fósseis, em Megajoule, referente aos 3 cenários	40
Tabela 9 –	Termo de compromisso entre a UFPE e as cooperativas de catadores	43

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Emissão de gases, em CO <sub>2</sub> equivalente, para síntese, processamento e destinação, em toneladas, sem a reciclagem	33
Gráfico 2 –	Emissão de gases em CO <sub>2</sub> equivalente para a síntese, processamento, destinação e para a reciclagem, em toneladas, com 20% do PET reciclado	36
Gráfico 3 –	Emissão de gases em CO <sub>2</sub> equivalente para a síntese, processamento, destinação e para a reciclagem, em toneladas, com 30% do PET reciclado	36
Gráfico 4 –	Comparação da emissão dos gases poluentes, em CO <sub>2</sub> equivalente, referente aos 3 cenários	40
Gráfico 5 –	Consumo total de recursos fósseis, em Megajoule, referente aos 3 cenários	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABIPET	Associação Brasileira da Indústria do PET
Absolar	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
ACV	Análise de ciclo de vida
AICV	Análise de impactos do ciclo de vida
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COP26	26ª Conferência das Partes da Convenção sobre Mudança do Clima
GWP	Global Warming Potencial
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICV	Inventário de ciclo de vida
ISO	International Organization for Standardization
Kg	Quilogramas
MJ	Megajoule
NBR	Norma Brasileira
O <sub>2</sub>	Oxigênio
ONU	Organização das Nações Unidas
PET	Politereftalato de etileno
RMR	Região Metropolitana do Recife
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVO	15
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	15
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>17</b>
2.1	POLITEREFTALATO DE ETILENO	17
2.1.1	<i>Degradação do politereftalato de etileno</i>	18
2.2.	FABRICAÇÃO DAS GARRAFAS PET	18
2.2.1	<i>Injeção e sopro</i>	18
2.3	O PÓS-CONSUMO	19
2.4	A ANÁLISE DE CICLO DE VIDA	20
2.4.1	<i>Definição de objetivo e escopo</i>	21
2.4.2	<i>Análise do inventário do ciclo de vida</i>	23
2.4.3	<i>Avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV)</i>	23
2.4.4	<i>Interpretação do ciclo de vida</i>	24
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>24</b>
3.1	SOFTWARE	24
3.2	BASE DE DADOS	24
3.3	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	25
3.3.1	<i>Definição de Objetivo e Escopo</i>	26
3.3.2	<i>Avaliação de Inventário de Ciclo de Vida</i>	27
3.4	CENÁRIO DE AVALIAÇÃO	30
3.4.1	<i>Impactos do envio das garrafas PET para o aterro sanitário</i>	30
3.4.2	<i>Impacto do reaproveitamento das garrafas PET para a produção de novas garrafas</i>	30
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>32</b>
4.1	CENÁRIO 1: PRODUÇÃO DAS GARRAFAS PET E A DESTINAÇÃO PARA O ATERRO SANITÁRIO	32
4.1.1	<i>Impacto Climático</i>	32
4.1.2	<i>Consumo de recursos de origem fóssil</i>	33

4.2	CENÁRIO 2: ANÁLISE DE IMPACTO DO ENVIO PERCENTUAL DO PET PARA O ATERRO SANITÁRIO	34
4.2.1	<i>Impacto climático referente ao envio percentual do PET para o aterro sanitário</i>	34
4.2.2	<i>Consumo de recursos de origem fóssil referente ao envio percentual do PET para o aterro sanitário</i>	37
4.3	AVALIAÇÃO DOS CENÁRIO 1 E 2 REFERENTE AS EMISSIONES DE CO <sub>2</sub> EQUIVALENTE E DO CONSUMO DE RECURSOS DE ORIGEM FÓSSIL	38
4.3.1	<i>Comparação das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente entre os cenários 1 e 2</i>	38
4.3.2	<i>Comparação do consumo de recursos de origem fóssil entre os cenários 1 e 2</i>	40
4.4	DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA ATINGIR OS OBJETIVOS DE REDUÇÃO DE IMPACTO DAS GARRAFAS PET NA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE	41
5	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>44</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>45</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em 2022, foram produzidos cerca de 81,8 milhões de toneladas de resíduos nas áreas urbanas, representando 224 mil toneladas diariamente. Assim, cada indivíduo gerou, em média, 381 kg por ano, ou seja, mais de um quilo de resíduos por dia (Exame, 2023).

Segundo a ONU (Organização das Nações Unidas), o descarte irresponsável de objetos de plástico chegou a níveis alarmantes. Isso é evidenciado pelo consumo diário de plástico que está presente no nosso dia a dia e que raramente paramos para pensar no quanto ele prejudica a natureza. Com o grande volume de lixo produzido e a falta de políticas públicas, visando a reciclagem dos materiais plásticos, o mundo necessita de espaço em aterros sanitários (SENAC, 2022).

O relatório *Da Poluição à Solução: Uma Análise Global sobre Lixo Marinho e Poluição Plástica (From Pollution to Solution: A Global Assessment of Marine Litter and Plastic Pollution)* menciona que a poluição, oriunda do plástico, deve dobrar até 2030 nos ecossistemas aquáticos. Desta forma, consequências terríveis para a saúde, a economia, a biodiversidade e o clima crescem de forma alarmante (UNEP, 2022).

A análise, divulgada dez dias antes da 26ª Conferência das Partes da Convenção sobre Mudança do Clima (COP 26), frisou que o plástico também é um vilão, acarretando em mudanças climáticas. Com a Análise de Ciclo de Vida constatamos que, em 2015, o plástico emitiu cerca de 1,7 gigatoneladas de CO<sub>2</sub> e para o ano de 2050 teremos uma emissão de aproximadamente 6,5 Gigatoneladas (UNEP, 2022).

Como podemos constatar ao longo dos anos, a produção de plástico sofre um crescimento exponencial e em 2022 foram produzidos mais de 300 milhões de toneladas de plásticos. Em comparação ao ano de 2021, houve um aumento de 3% na produção desse material. Também é viável ressaltarmos que a indústria de embalagens utilizou cerca de 30% do plástico produzido no ano de 2022 e o politereftalato de etileno (PET) foi um dos mais utilizados, especialmente na indústria de bebidas (INTERPLAST, 2023).

O polietileno tereftalato (PET) consegue ter os melhores índices de reciclagem entre os materiais plásticos. Em 2018, das resinas recicladas pós-consumo produzidas 38% foram de PET, seguidas por PEAD (22%), PP (18%) e PEBD/PELBD (15%) (Abiplast, 2023).

Um dos grandes questionamentos levantados sobre os resíduos plásticos refere-se ao seu destino final. A reciclagem é uma das alternativas viáveis, mas infelizmente não há grandes investimentos para alavancar esse mercado (NASCIMENTO, 2021).

Porém, na Região Metropolitana do Recife (RMR), situada no Estado de Pernambuco, a Cooperativa de Reciclagem Ecovida Palha de Arroz destaca-se com a utilização da técnica de economia circular chamada *Upcycling*, transformando resíduos descartados em novos produtos. Essa técnica foi identificada através das máquinas o triturador e a difusora, ambas promovem a confecção dos utensílios a partir de resíduos que são descartados na cooperativa (NASCIMENTO, 2021).

Também é viável ressaltarmos que, de acordo com Zimring (2016), *Upcycling* consiste em obter produtos inovadores, ou seja, com um novo design sem perda de qualidade e visa diminuir os impactos ambientais.

Para minimizar os efeitos causados pelo PET após o consumo, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica que identifica os impactos ambientais relacionados à cadeia produtiva. Esse estudo permite a coleta e a análise dos dados, avaliando o desempenho dos produtos desde a extração de recursos naturais, passando por todas as etapas da cadeia produtiva, incluindo distribuição e uso, até o descarte final. (ABNT, 2009).

Além do mais, de acordo com Campolina *et al.* (2015), esse software é capaz de otimizar o tempo necessário para realizar cálculos e análises, permitindo a comparação do ciclo de vida de produtos, o monitoramento do fluxo de materiais e energia. A apresentação dos resultados por meio de gráficos, fluxogramas e tabelas facilita a interpretação das informações geradas pelo estudo.

O trabalho proposto visa implementar a Análise de Ciclo de Vida para as garrafas de polietileno tereftalato (PET) pós consumo, buscando diminuir o descarte inadequado, os impactos ambientais e o melhor destino para esses resíduos.

## 1.1. OBJETIVO

### 1.1.1. *Objetivo geral*

Aplicar a técnica de Avaliação do Ciclo de Vida à cadeia de reciclagem do PET na região metropolitana de Recife, avaliando seus impactos ambientais e desafios, econômicos e técnicos.

### *1.1.2. Objetivos específicos*

- Construir fluxograma apresentando as etapas da fabricação das garrafas PET, incluindo a entrada matéria prima até o seu descarte final e/ou reprocessamento mecânico;
- Apresentar o desempenho de cada etapa do processo produtivo das garrafas PET e os impactos ambientais com o auxílio da metodologia Análise de Ciclo de Vida, utilizando o banco de dados existente no software OpenLCA;
- Propor as melhores rotas de destino das garrafas PET considerando o contexto da região metropolitana de Recife, visando diminuir os impactos ambientais.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

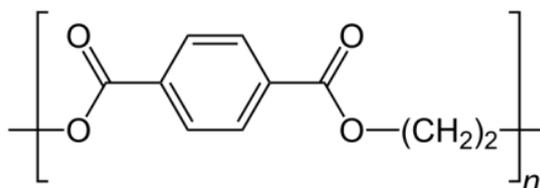
### 2.1. POLITEREFTALATO DE ETILENO

O Politereftalato de etileno (PET) é um tipo de polímero termoplástico, ou seja, um material de fonte sintética que, quando sujeito a altas temperaturas (260 °C a 280 °C), exibe alta viscosidade e pode ser moldado repetidamente (Oyapoc, 2020).

Além disso, o PET possui uma considerável resistência combinada com leveza, bem como sua baixa permeabilidade a gases como CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> em suas embalagens. O PET apresenta uma elevada temperatura de fusão de 275°C e uma transição vítrea de 70°C, conferindo ao material uma alta rigidez e baixa mobilidade das cadeias moleculares. Essas propriedades mecânicas são mantidas mesmo em altas temperaturas, o que torna o PET extremamente interessante para diversas outras aplicações (HARADA, 2005)

O politereftalato de etileno apresenta em sua estrutura uma cadeia heterogênea e aromática, contendo anéis benzênicos e grupos ésteres (R-CO-O-R'). A estrutura da cadeia desempenha um papel importante na determinação de algumas de suas propriedades. A curta sequência de carbonos alifáticos juntamente com a presença de oxigênio na cadeia principal confere flexibilidade ao polímero em temperatura ambiente. Por outro lado, a inclusão do grupo benzênico (Figura 1) na estrutura é responsável por conferir rigidez ao polímero, o que resulta em propriedades bem definidas para o PET (HARADA, 2005).

Figura 1 - Representação estrutural do PET



Fonte: Harada (2005).

O PET pode adotar uma estrutura molecular amorfa ou semicristalina. A diferença entre eles ocorre, principalmente, devido às variações da temperatura, de volume e na maior quantidade de energia necessária para os materiais cristalinos (Silva, Alves e Marques, 2013).

### *2.1.1. Degradação do politereftalato de etileno*

O PET é reconhecido como um polímero não biodegradável e sob condições ambientais de pH, pressão e temperatura, ele não se desintegra naturalmente na natureza. Essa característica é atribuída à sua estrutura molecular, composta por anéis aromáticos constituídos por seis átomos de carbono e seis átomos de hidrogênio, organizados com ligações simples e duplas alternadas (FAPESP, 2007).

Para que a cadeia polimérica seja degradada, é necessário que o polímero seja suficientemente flexível para se adaptar ao sítio ativo da enzima, permitindo, assim, sua degradação por catálise enzimática. Por essa razão que os poliésteres alifáticos são facilmente degradados por sistemas biológicos, enquanto os poliésteres aromáticos, que são mais rígidos, como o politereftalato de etileno (PET), tendem a ser bioinertes (FONSECA, 2014).

## 2.2. FABRICAÇÃO DAS GARRAFAS PET

As embalagens de garrafa PET geralmente são obtidas por meio da injeção e do sopro.

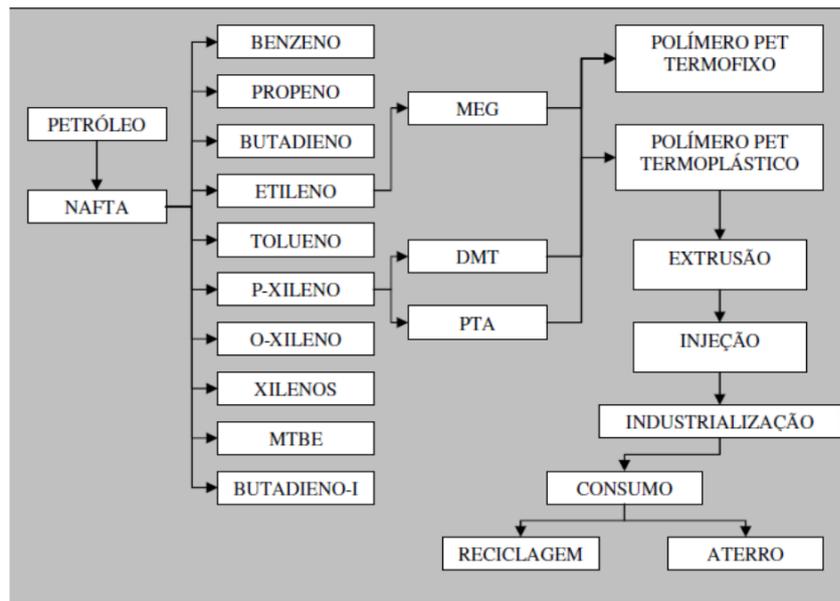
### *2.2.1. Injeção e sopro*

De acordo com a Figura 2, o início do ciclo de vida das garrafas PET ocorre na extração do petróleo que, após ser destilado e refinado, é separado em diversos compostos, entre os quais a nafta. A partir da nafta, são obtidos outros produtos como o etileno e o p-xileno. Estes são matérias primas para a fabricação do monoetilenoglicol (MEG) e do dimetiltereftalato (DMT) ou ácido tereftálico puro (TPA), respectivamente (VALT, 2004).

O polímero PET é obtido a partir desses dois materiais, na forma de flocos (flakes). Os flocos passam pela extrusão e em seguida nas chamadas pré-formas (injeção) que seguem para o engarrafador, onde ocorrem as etapas de sopro, para a formação das garrafas e o envase do refrigerante (VALT, 2004).

As garrafas de refrigerante seguem para os centros de distribuição, chegando aos consumidores onde, após serem usadas, são descartadas. Parte dessas garrafas descartadas é recolhida e encaminhada para reciclagem. O restante segue para disposição em aterros sanitários (VALT, 2004).

Figura 2 – Produção das garrafas PET.



Fonte: VALT (2004).

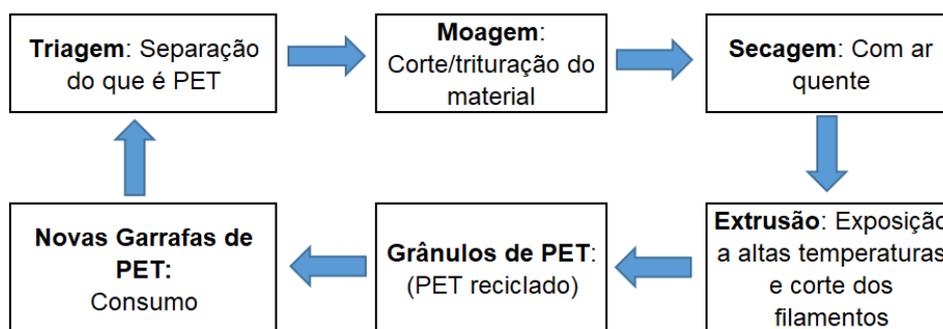
### 2.3. O PÓS-CONSUMO

De acordo com a 12ª edição do Censo da Reciclagem do PET no Brasil, elaborado pela Associação Brasileira da Indústria, no ano de 2021, foi constatado que aproximadamente 56,4% do total de material descartado no país foi reciclado (ABIPET, 2021).

O principal objetivo das embalagens PET após o consumo, de acordo com o Compromisso Empresarial para Reciclagem é o seu destino para as indústrias têxtil como matéria-prima para a fabricação de diversos produtos. Essa diversificação abrange fios para costura e até mesmo tecidos não tecidos (TNT). Além disso, o material também pode ser aplicado na produção de monofilamentos para cerdas de vassouras e escovas, boxes para banheiros, placas de trânsito, e pode ser reaproveitado para fabricar novas embalagens para produtos não alimentícios (CEMPRE, 2018).

É importante ressaltarmos que, o planejamento, para a reciclagem do PET, abordará uma gestão logística do ciclo de vida do produto como um "circuito fechado" de acordo com a Figura 3 (PROPEQ, 2021).

Figura 3 – Etapas da reciclagem do PET.



Fonte: Adaptado PROPEQ (2021).

## 2.4. A ANÁLISE DE CICLO DE VIDA

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) torna-se um mecanismo para tratar os resíduos descartados no meio ambiente, levando em conta aumento populacional e o consumismo crescente nos dias atuais. Essa ferramenta permite compreender a relação entre o meio ambiente e o produto por meio da avaliação dos impactos em todas as fases de produção. Essas fases são destacadas como objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação do impacto, interpretação de resultados (SANTOS, 2011). Essas etapas são observadas na Figura 4.

Conforme Theis e Tomkin (2015), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia utilizada para coletar e avaliar informações sobre materiais e energia à medida que fluem através da cadeia de produção de um produto ou serviço. Essa abordagem permite uma compreensão abrangente dos impactos e benefícios ambientais associados, possibilitando comparações entre produtos ou serviços novos e convencionais. A ACV também auxilia na identificação de situações de conflito entre escolhas econômicas e ambientais.

Para regulamentar as questões ambientais, em 1992, a Organização Internacional para a Normalização (ISO), instaurou um comitê técnico com o intuito de conduzir as questões ambientais. Porém, no Brasil, a regulamentação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi adotada pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) como ABNT NBR 14040:(2009a), estabelecendo os princípios e a estrutura da ACV, e ABNT NBR 14044:(2009b), definindo os requisitos e diretrizes metodológicas (FERREIRA, 2004).

Figura 4 – Fases da Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).



Fonte: Adaptado ABNT (2009).

#### 2.4.1. Definição de objetivo e escopo

De acordo com a ABNT (2001), é necessário que o objetivo seja declarado de forma transparente, abordando a função desejada, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo. O escopo abrange, principalmente, a unidade funcional, as unidades de processo e a fronteira do sistema. Assim, é fundamental definir os itens listados no Quadro 1.

Quadro 1 – Pontos importantes do objetivo e escopo.

<b>Função</b>	Conjunto de unidades de processo, conectadas ao material e energeticamente, que realizam uma ou mais funções definidas. Assim, a função do sistema é a finalidade de uso do produto
<b>Unidade funcional</b>	Desempenho quantificado de um sistema de produto para uso como uma unidade de referência num estudo de avaliação do ciclo de vida
<b>Unidades de processo</b>	Menor porção de um sistema de produto para a qual são coletados dados quando é realizada uma avaliação do ciclo de vida
<b>Fronteiras do sistema</b>	Interface entre um sistema de produto e o meio ambiente ou outros sistemas de produto

Fonte: Adaptado ABNT (2001).

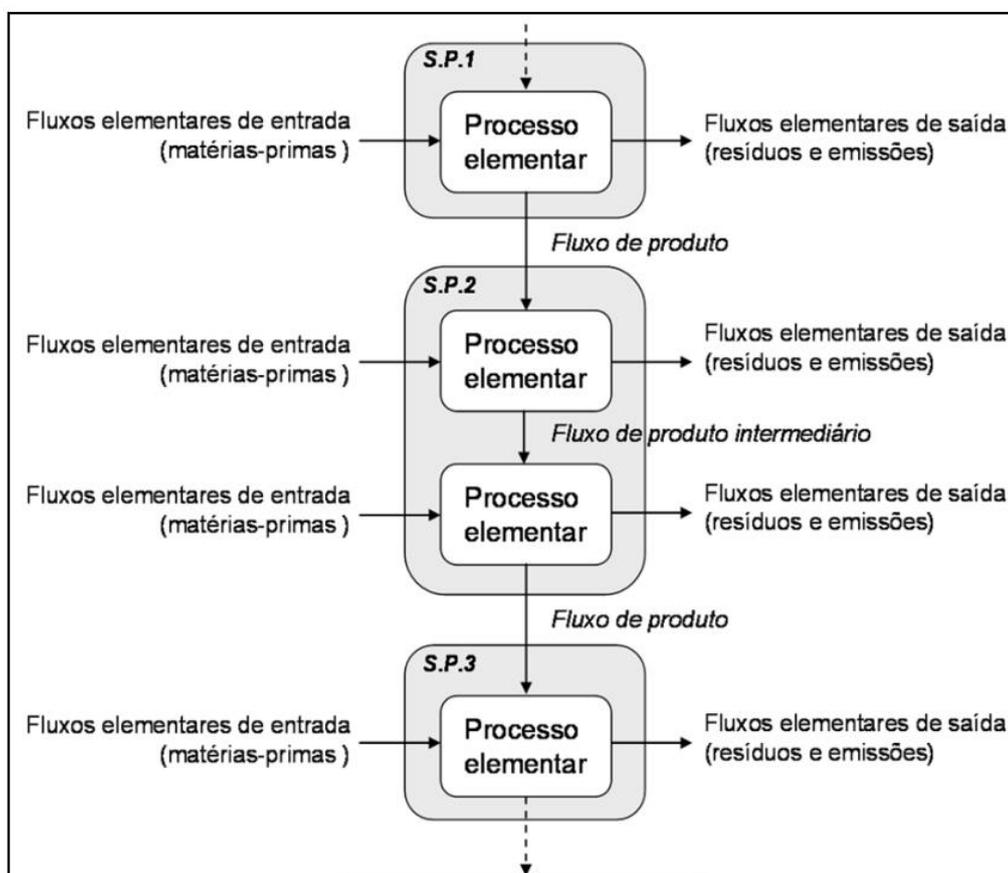
Segundo a ISO 14040 (2021), nesta fase torna-se importante incluir as dimensões, e serem compatíveis com os objetivos presentes no estudo, indicando os seguintes itens de acordo com a Figura 5:

- A extensão da ACV - onde iniciar e parar o estudo;
- A altura da ACV - quantos e quais subsistemas incluir;
- Profundidade - nível de detalhes do estudo.

A fronteira do sistema estabelece quais processos básicos devem ser considerados na ACV. A escolha da fronteira do sistema deve estar alinhada com o propósito do estudo. Os critérios empregados na definição da fronteira do sistema precisam ser claramente identificados e justificados (ABNT, 2009).

A Figura 5 exemplifica um modelo referente às entradas e saídas para cada unidade de processo dentro do sistema do produto com o sistema subdividido em um conjunto de unidades de processo, ligados entre si por fluxos de materiais ou energia.

Figura 5 - Processo de Avaliação do Ciclo de Vida.



Fonte: Adaptado de Tibor e Feldman (1996).

#### 2.4.2. Análise do inventário do ciclo de vida

Essa etapa está ligada à coleta de dados e ao processo de cálculo, visando estimar as entradas e saídas dos fluxos do sistema do produto. Com os dados obtidos podemos avaliar o impacto do ciclo de vida do produto, contemplando assim: o uso de recursos, as emissões no ar, na água e no solo do sistema em estudo (ABNT, 2001).

Segundo ALVES (2014), as informações podem ser coletadas de bancos de dados que visam facilitar o processo. Um ponto importante a ser destacado é sobre a complexidade desta etapa e a atenção necessária referente a qualidade dos dados coletados.

A modelagem do sistema, para assegurar um entendimento uniforme e consistente dos sistemas de produto a serem modelados, admite incluir os seguintes pontos (ABNT, 2009):

- Fluxogramas gerais de processo;
- Fatores que influenciam entradas e saídas;
- Fluxos e dados relevantes para as condições de operação;
- O desenvolvimento de uma lista que especifique as unidades utilizadas;
- Documentar casos especiais e irregularidades.

#### 2.4.3. Avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV)

O objetivo da fase de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) consiste em examinar a importância dos potenciais impactos ambientais. Em linhas gerais, esse processo atrela os dados do inventário com categorias de impacto específicas e indicadores de categoria, visando compreender esses impactos.

A fase de avaliação de impacto também fornece informações relevantes para a etapa de interpretação do ciclo de vida. Também é viável ressaltarmos que, a AICV foca somente nas questões ambientais que estão definidas no objetivo e escopo, ou seja, não é uma avaliação completa (ABNT, 2009).

De acordo a ABNT (2009) a AICV deve incluir os seguintes elementos obrigatórios:

- Seleção das categorias de impacto, indicadores de categoria e modelos de caracterização;
- Correlação dos resultados do ICV às categorias de impacto selecionadas (classificação);
- Cálculo dos resultados dos indicadores de categoria (caracterização).

#### 2.4.4. Interpretação do ciclo de vida

A interpretação é uma etapa crucial da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), considerando as descobertas da análise de inventário e da avaliação de impacto de forma conjunta. No caso de estudos de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), apenas as conclusões da análise de inventário são levadas em consideração. É importante que a fase de interpretação da ACV produza resultados consistentes com os objetivos e o escopo definidos, além de gerar conclusões claras, explicar limitações identificadas e fornecer recomendações relevantes (ABNT, 2009).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. SOFTWARE

O trabalho foi realizado através do software OpenLCA, versão 1.11.0, desenvolvido pela GreenDelta para ações de sustentabilidade. A vantagem de utilização dessa ferramenta profissional é o seu fácil manuseio e acessibilidade, ou seja, apresenta-se de forma gratuita para a modelagem e avaliação do ciclo de vida dos produtos de interesse.

#### 3.2. BASE DE DADOS

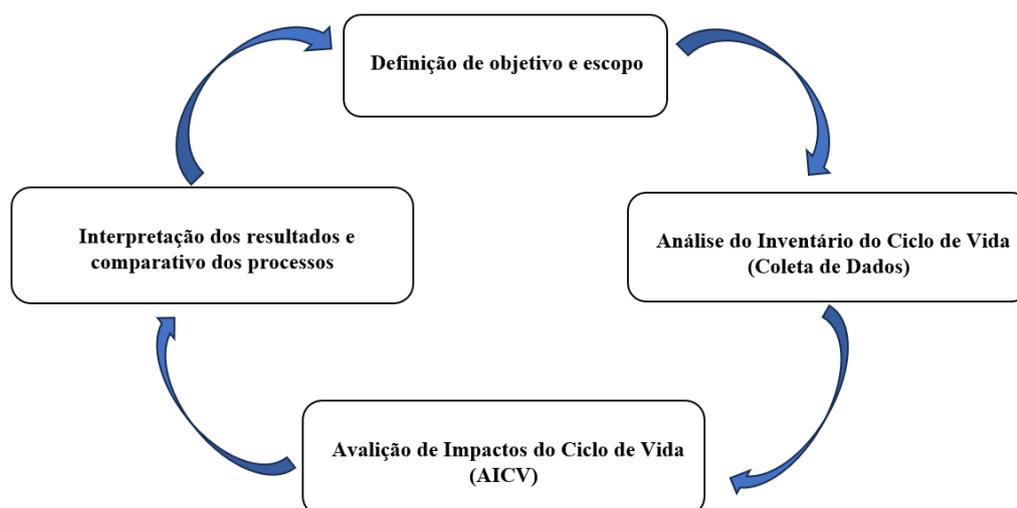
O software OpenLCA contém diversas bases de dados pré-existentes para a Análise de Ciclo de Vida (ACV) desejado. Essas bases completam processos bem definidos, fluxos elementares, seja de perdas ou de produtos, métodos para avaliação de impactos. Dessa forma, o trabalho foi realizado através da seleção dos elementos pré-existentes em base de dados públicos, como a *Environmental Footprints* - que é um banco de dados secundário com o intuito de padronizar modelos de ciclo de vida voltados para a União Europeia -, e de dados disponíveis na literatura.

Além disso, foram utilizadas as informações referente a base de dados da União Europeia devido à escassez de informações que englobam os processos de emissão de gases e de consumo de recursos de origem fóssil no Brasil. A base de dados permitiu trabalharmos com as seguintes unidades de processo: síntese dos grânulos de PET, processamento (extrusão do PET), aterro sanitário e reciclagem. Os dados foram coletados em 4 de janeiro de 2024 e a base de dados teve como input 3,3 mil toneladas de PET circulando na RMR.

### 3.3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

De acordo com os resultados obtidos no trabalho, avaliado pelo método da Análise do Ciclo de Vida, será comparado o desempenho do processo tradicional de fabricação das garrafas PET com o processo agregado a uma rota de aproveitamento dessas garrafas na Região Metropolitana do Recife (RMR). Dessa forma, estudar a cadeia reversa do PET na Região Metropolitana do Recife ajudará as organizações que pretendam atuar nesta área, assim como para as empresas e/ou cooperativas que já estão inseridas neste mercado, gerando uma visão mais estratégica para a reintegração do PET ao ciclo produtivo. As etapas de realização da Análise de Ciclo de Vida (ACV) apresentam-se de acordo com a Figura 6.

Figura 6 – Etapas da Análise de Ciclo de Vida (ACV)



Fonte: O autor (2024).

### 3.3.1. Definição de objetivo e escopo

A definição do Objetivo e Escopo foram detalhados no Quadro 1 presentes no tópico 2.4.1, abrangendo a função, a unidade funcional, a unidade de processo e as fronteiras do sistema.

A fronteira do sistema nos permite delimitar as etapas que envolvem a produção das garrafas PET, desde a entrada da matéria-prima até o seu destino final da mesma. Porém, esse sistema está desconsiderando os impactos relacionados ao transporte do PET, pós-consumo, para o seu reuso como matéria-prima.

A Figura 7 e a Figura 8 demonstram duas fronteiras do sistema que serão estudadas para posteriormente levantarmos dados/impactos relevantes para o meio ambiente.

Desta forma, a Figura 7 exibe um processo linear, ou seja, desconsiderando a reciclagem e destinando 100% das garrafas para o aterro sanitário.

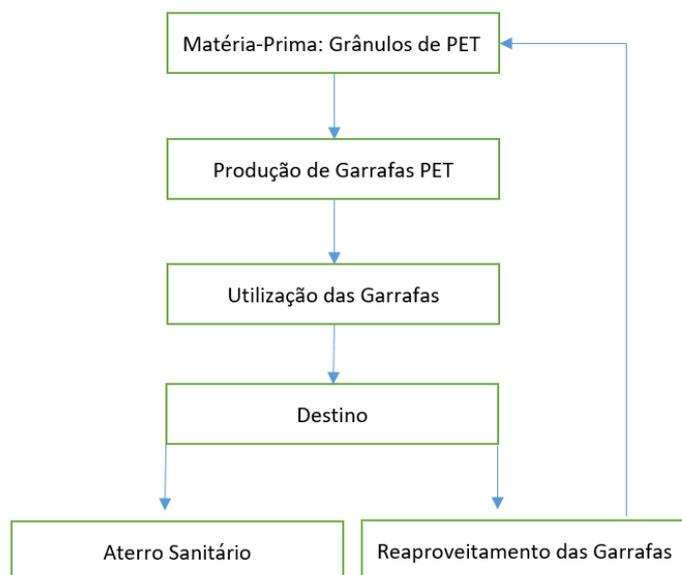
Figura 7 – Escopo do processo linear.



Fonte: O autor (2024).

Agora, a Figura 8 exibe um processo que considera um percentual destinado à reciclagem das garrafas PET, sendo utilizada novamente no processo, e outro percentual para o aterro sanitário.

Figura 8 – Escopo do processo envolvendo a reciclagem.



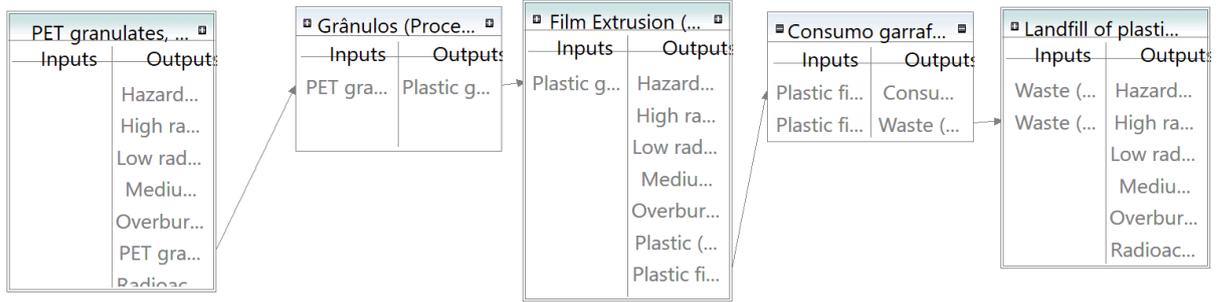
Fonte: O autor (2024).

### 3.3.2. Avaliação de inventário de Ciclo de Vida

A simulação do processo no software openLCA, versão 1.11.0, desenvolveu-se com a inserção de blocos relacionados com a fronteira do sistema, levando em consideração a base de dados Environmental Footprints e a literatura, sendo necessário a criação de alguns blocos para conectarmos as unidades para não gerarmos erros. Os blocos criados para auxiliar o processo linear foram: Grânulos (processo linear) e Consumo garrafas PET. Além disso, para o processo envolvendo a reciclagem das garrafas PET foram criados os blocos: Grânulos Recycling e Consumo.

A Figura 9 demonstra os blocos referentes a produção das garrafas PET até o seu destino final, ou seja, para o aterro sanitário sem nenhum percentual de reciclagem.

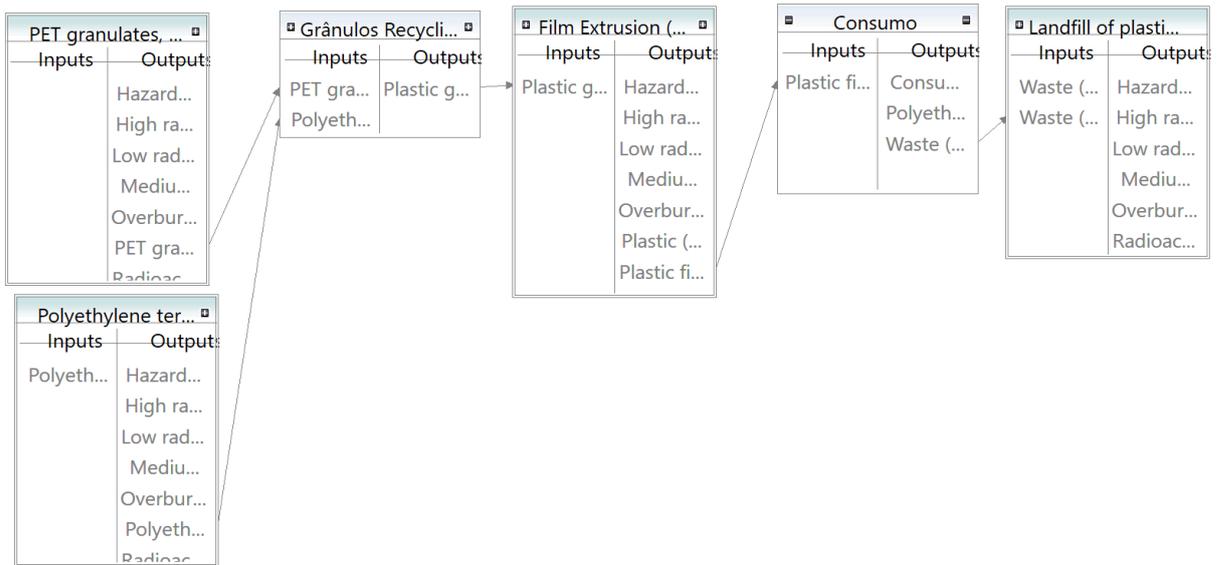
Figura 9 – Processo de produção das garrafas PET sem reciclagem.



Fonte: O autor (2024).

A Figura 10 também faz referência a produção das garrafas PET até o seu destino final, porém com um percentual de retorno para o processo produtivo.

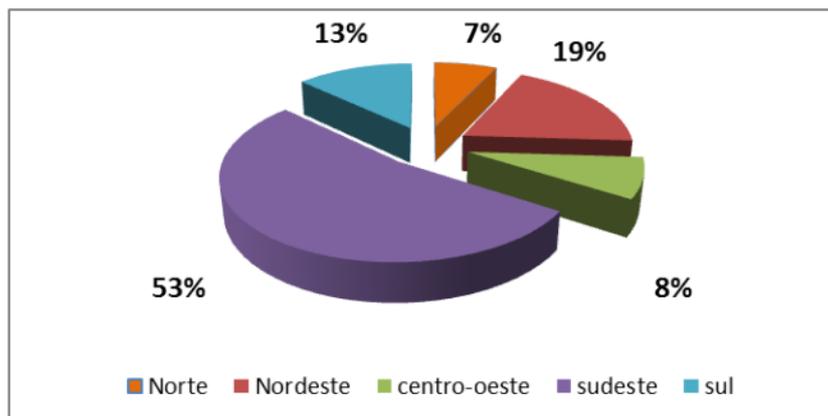
Figura 10 – Processo de produção das garrafas PET com reciclagem.



Fonte: O autor (2024).

Segundo a ABIPET (Associação Brasileira da Indústria do PET) estima-se que a concentração de garrafas PET, no ano de 2012, apresenta um percentual de 19% para a região do Nordeste, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 – Distribuição dos PET por região.



Fonte: Adaptado de ABIPET (2012).

Assumindo que esses valores percentuais tenham se mantidos aproximados para o ano de 2022 e estimando a quantidade de PET para o total de habitantes do Nordeste em 2022, 54.600.000 habitantes de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), teremos um total de 120,8 mil toneladas de PET. Essa estimativa leva em consideração as 635,5 mil toneladas de PET produzidos no Brasil. Assim sendo, a estimativa de PET para o total de habitantes na cidade de Recife, em 2022, será, aproximadamente, de: 3,3 mil toneladas de PET, considerando o consumo de garrafas de forma igualitária para cada habitante (DDCA, 2023).

As 3,3 mil toneladas de PET serão o input inicial para iniciarmos a simulação nos blocos de referência: Consumo garrafas PET, para o processo sem a reciclagem, e Consumo, para o processo envolvendo a reciclagem. A Figura 12 e a Figura 13 representam os blocos de referência.

Figura 12 – Inserção do valor de referência de consumo de garrafas PET durante o ano de 2024.

General information	
Name	processo Linear
Description	First created: 2023-08-24T14:38:25 Linking approach during creation: None
Version	00.00.005
UUID	b73f01a4-6acc-49b2-af65-5503e17e24ef
Last change	2023-09-09T17:14:49-0300
Tags	<input type="button" value="Add a tag"/>
	<input type="button" value="Calculate"/>
Reference	
Process	Consumo garrafas PET
Product	Consumo Garrafas
Flow property	Mass
Unit	t
Target amount	3300.0

Fonte: O autor (2024).

Figura 13 – Inserção do valor de referência de consumo de garrafas PET durante o ano de 2024.

General information	
Name	PET reciclado
Description	First created: 2023-08-24T15:53:01 Linking approach during creation: None
Version	00.00.004
UUID	568c2492-66a9-4b9e-9e5d-631c5af6ca1d
Last change	2023-09-09T17:14:49-0300
Tags	<input type="button" value="Add a tag"/>
	<input type="button" value="Calculate"/>

Reference	
Process	P Consumo
Product	Consumo Garrafas
Flow property	Mass
Unit	t
Target amount	3300.0

Fonte: O autor (2024).

### 3.4. CENÁRIOS DE AVALIAÇÃO

Foram realizados dois diferentes cenários de avaliação. O cenário 1 referente ao processo linear (100% do PET destinado para o aterro sanitário) e o cenário 2 envolvendo a reciclagem (20% e 30% do PET pós-consumo reciclado).

#### 3.4.1. Impacto do envio das garrafas pet para o aterro sanitário

Avaliar o impacto gerado onde 100% das garrafas PET consumidas, na cidade de Recife, em 2022, são destinadas para os aterros sanitários, ou seja, sem nenhum percentual de reciclagem.

#### 3.4.2. Impacto do reaproveitamento das garrafas pet para a produção de novas garrafas

Avaliar o impacto gerado referente ao reaproveitamento de 20% PET para a produção de novas garrafas e 80% para o aterro sanitário. Aumentar o reaproveitamento para 30%, destinando 70% das garrafas para os aterros sanitários. Esses percentuais são baseados na Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento

Sustentável da Câmara dos Deputados que aprovou o projeto de lei. O Projeto de Lei 418/11 exige no mínimo 20% de reciclagem para o PET, aumentando para 30% em cinco anos assim que a lei entrar em vigor (Camara, 2022).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussões retratam os cenários presentes no tópico 3.4, abordando a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e a Interpretação do Ciclo de Vida presentes na metodologia de ACV. Com isso, podemos comparar os cenários e expor os impactos gerados em cada fase de produção das garrafas PET. Além disso, os resultados apresentados a seguir serão demonstrados em CO<sub>2</sub> equivalente, ou seja, é uma unidade de medida usada para comparar as emissões de diferentes gases de efeito estufa. Os cálculos foram realizados através da multiplicação da quantidade de um gás emitido por seu potencial de aquecimento (GWP – Global Warming Potencial).

Por fim, a discussão abordará o impacto ambiental com os seguintes tópicos: produção de metano e dióxido de carbono equivalente e consumo de recursos fósseis.

### 4.1. CENÁRIO 1: PRODUÇÃO DAS GARRAFAS PET E A DESTINAÇÃO PARA O ATERRO SANITÁRIO PÓS-CONSUMO

#### 4.1.1. Impacto climático

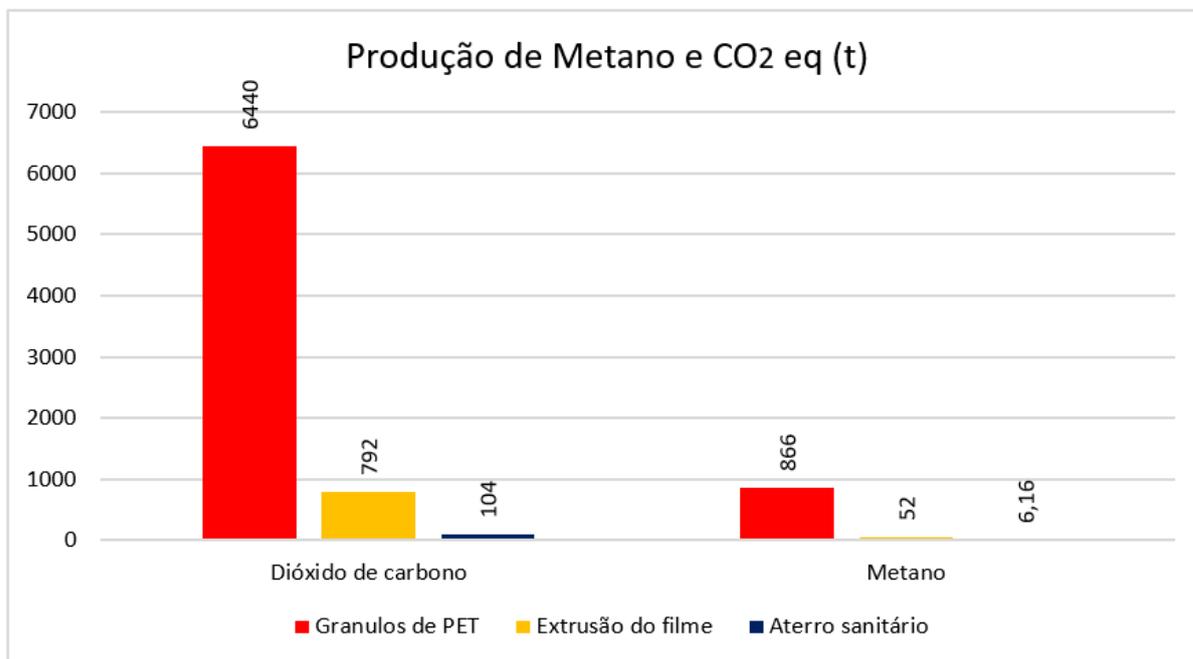
Com as unidades expressas em CO<sub>2</sub> equivalente, foram obtidos os valores das emissões dos gases, dióxido de carbono e metano, para a atmosfera conforme a Tabela 1 e o Gráfico 1 para a produção das garrafas PET.

Tabela 1 – Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente correspondente a produção de PET, em toneladas.

Poluentes	Síntese - Grânulos de PET (CO <sub>2</sub> eq.)	Processamento - Extrusão do filme (CO <sub>2</sub> eq.)	Destinação - Aterro sanitário (CO <sub>2</sub> eq.)
Dióxido de carbono	6440	792	104
Metano	866	52	6,16
<b>Total</b>	<b>7306 (88,45%)</b>	<b>844 (10,22%)</b>	<b>110,16 (1,33%)</b>

Fonte: O autor (2024).

Gráfico 1 – Emissão de gases, em CO<sub>2</sub> equivalente, para síntese, processamento e destinação, em toneladas, sem a reciclagem.



Fonte: o autor (2024).

Assim, de acordo com a Tabela 1 e o Gráfico 1, a síntese dos grânulos de PET é a etapa que mais gera impacto para o meio ambiente, ou seja, é o estágio que mais contribui para as mudanças climáticas, emitindo 88,45% de CO<sub>2</sub> equivalente.

#### 4.1.2. Consumo de recursos de origem fóssil

De acordo com *European Environment Agency*, as principais fontes de energia União Europeia deriva dos produtos petrolíferos (34,5%) seguidos do gás natural (23,7%), energia renovável (17,4%), energia nuclear (12,7%), combustíveis fósseis sólidos (11,5%) e outros (0,2%), respectivamente. Esses valores estão de acordo com a Tabela 2 em relação aos recursos energéticos mais utilizados, com exceção da energia renovável que não é empregada para a produção das garrafas PET. Além do mais, o processamento dos grânulos de PET é a etapa do processo com um elevado consumo energético, ou seja, com 93,08%.

Tabela 2 – Consumo, em Megajoule, dos recursos de origem fóssil para a síntese e processamento do PET.

<b>Matéria-prima</b>	<b>Síntese - Grânulos de PET (MJ)</b>	<b>Processamento - Extrusão do Filme (MJ)</b>
Petróleo Bruto	$9,44 \times 10^7$	$1,10 \times 10^6$
Gás natural	$8,48 \times 10^7$	$2,75 \times 10^6$
Urânio	$6,84 \times 10^7$	$5,30 \times 10^6$
Carvão Duro	$4,87 \times 10^6$	$3,12 \times 10^6$
Lignite	$3,15 \times 10^6$	$2,15 \times 10^6$
<b>TOTAL</b>	<b><math>255,62 \times 10^6</math> (93,08%)</b>	<b><math>14,42 \times 10^6</math> (6,92%)</b>

Fonte: O autor (2024).

No Brasil, segundo a Absolar (Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica), as principais fontes de energia utilizadas no Brasil advém de fonte hídrica (50,6%), solar fotovoltaica (12,0%), eólica (11,4%), gás natural (8,0%), biomassa e biogás (7,7%), petróleo e outros fósseis (4,0%), carvão mineral (1,6%), nuclear (0,9%) e importação (3,8%).

Apesar do contraste percentual da utilização da matriz energética da União Europeia com a matriz brasileira, os dados foram gerados para obtermos uma dimensão do consumo, em Megajoule, para a produção das garrafas PET. Além disso, a presença do urânio na Tabela 2 é explicada pelo fato do software OpenLCA ter como base os dados referentes a União Europeia, utilizando a energia nuclear como a sua quarta maior fonte de energia.

## 4.2. CENÁRIO 2: ANÁLISE DE IMPACTO DO ENVIO PERCENTUAL DO PET PARA O ATERRO SANITÁRIO

### 4.2.1. Impacto climático referente ao envio percentual do pet para o aterro sanitário

De acordo com o Projeto de Lei 418/11 desenvolveu-se a simulação conforme o percentual mínimo estipulado para a reciclagem do PET, ou seja, 20% das garrafas devem voltar para o processo produtivo, com o intuito de servirem como matéria-prima para produção de novas garrafas. Posteriormente, a simulação prosseguiu, em

concordância com o projeto de lei, para 30%, prevendo esse aumento percentual de reciclagem nos próximos 5 anos.

As Tabelas 3 e 4 e os Gráficos 2 e 3 expõem as emissões de dióxido de carbono e metano em CO<sub>2</sub> equivalente, com 20% e 30% do PET pós-consumo retornando para o processo produtivo respectivamente.

Tabela 3 – Análise de variação da emissão de CO<sub>2</sub> equivalente, com 20% do PET reciclado, em toneladas.

<b>Poluentes</b>	<b>Síntese - Grânulos de PET (CO<sub>2</sub> eq.)</b>	<b>Processamento - Extrusão do filme (CO<sub>2</sub> eq.)</b>	<b>Destinação - Aterro sanitário (CO<sub>2</sub> eq.)</b>	<b>Reciclagem (CO<sub>2</sub> eq.)</b>
Dióxido de carbono	5150	792	83,1	467,33
Metano	963	52	4,93	18,75
<b>Total</b>	<b>5843 (80,47%)</b>	<b>844 (11,62%)</b>	<b>88,03 (1,21%)</b>	<b>486,08 (6,69%)</b>

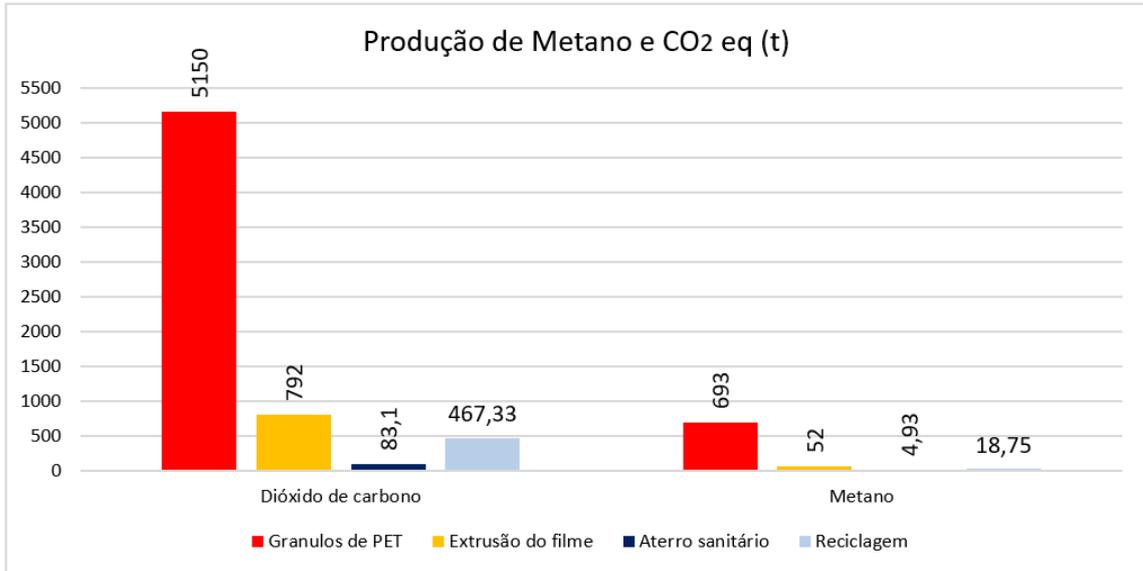
Fonte: O autor (2024).

Tabela 4 – Análise de variação da emissão de CO<sub>2</sub> equivalente, com 30% do PET reciclado, em toneladas.

<b>Poluentes</b>	<b>Síntese - Grânulos de PET (CO<sub>2</sub> eq.)</b>	<b>Processamento - Extrusão do filme (CO<sub>2</sub> eq.)</b>	<b>Destinação - Aterro sanitário (CO<sub>2</sub> eq.)</b>	<b>Reciclagem (CO<sub>2</sub> eq.)</b>
Dióxido de Carbono	4500	792	72	701
Metano	610	52	4,3	28
<b>Total</b>	<b>5110 (75,60%)</b>	<b>844 (12,49%)</b>	<b>76,3 (1,13%)</b>	<b>729 (10,79%)</b>

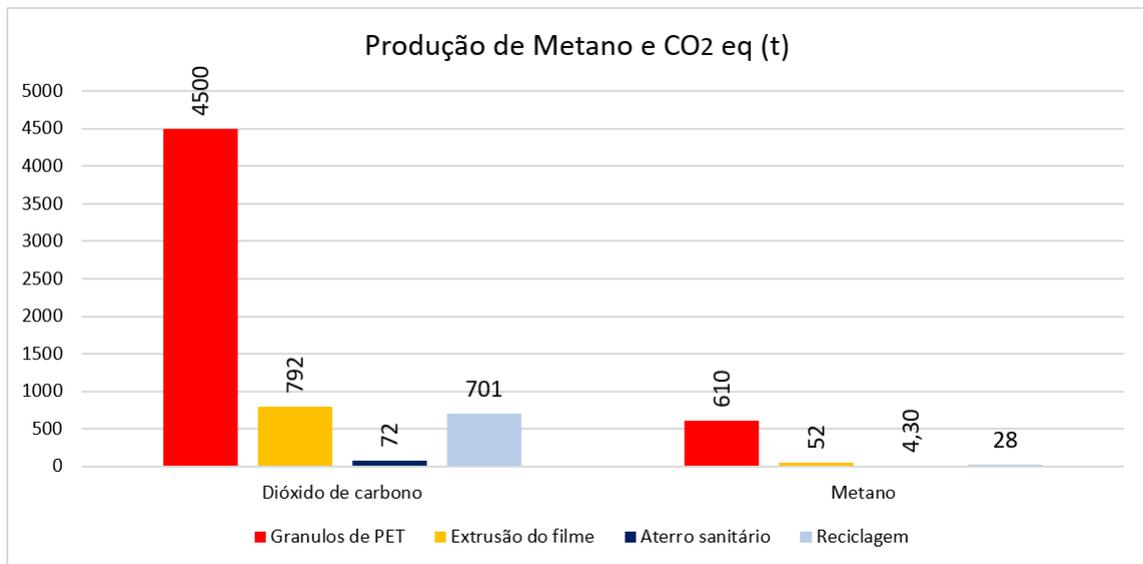
Fonte: O autor (2024).

Gráfico 2 – Emissão de gases em CO<sub>2</sub> equivalente para a síntese, processamento, destinação e para a reciclagem, em toneladas, com 20% do PET reciclado.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Gráfico 3 – Emissão de gases em CO<sub>2</sub> equivalente para a síntese, processamento, destinação e para a reciclagem, em toneladas, com 30% do PET reciclado.



Fonte: O autor (2024).

Observando os cenários, podemos averiguar que a reciclagem do PET, com 20% e 30% de reaproveitamento, emitiu, respectivamente, um total de 7261,11 e 6759,3 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Dessa forma, ocorreu uma redução de 501,81 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, ou seja, um decréscimo de 6,91% dos gases que contribuem para o efeito estufa.

Também é viável ressaltarmos que, o maior impacto de redução das emissões dos gases apresentou-se na fase de síntese dos grânulos de PET, com uma redução de 733 toneladas. Em seguida, a fase de extrusão manteve a sua emissão de poluentes constante, pois nessa fase não leva em consideração a origem da matéria-prima para a produção das garrafas. Agora, houve uma diminuição de 11,73 toneladas de gases, visto que, o aterro sanitário recebe 10% a menos das garrafas descartadas. Por fim, a emissão do metano e do dióxido de carbono, em CO<sub>2</sub> equivalente, na fase de reciclagem apresentou um aumento de 242,92 toneladas. Esse valor se justifica devido ao acréscimo, em 10%, do PET reciclado.

#### 4.2.2. Consumo de recursos de origem fóssil referente ao envio percentual do PET para o aterro sanitário

Apesar do contraste da matriz energética, citado no tópico 4.1.2, o consumo dos recursos de origem fóssil, com 20% das garrafas recicladas (Tabela 5), apresenta uma predominância na utilização em do petróleo bruto, sendo empregado principalmente para a síntese dos grânulos do PET. Essa etapa é a fase, assim como para o processo sem a aplicação da reciclagem das garrafas, que mais consome recursos não renováveis,  $155,23 \times 10^6$  Megajoule, com um percentual de 89,43% referente ao processamento do PET. Posteriormente temos a extrusão do filme com  $14,42 \times 10^6$  (8,31%) e o material reciclado com  $3,932 \times 10^6$  (2,26%).

Tabela 5 – Consumo, em Megajoule, dos recursos de origem fóssil para a síntese, processamento, e para a reciclagem, com 20% do PET reciclado.

<b>Matéria-prima</b>	<b>Síntese - Grânulos de PET (MJ)</b>	<b>Processamento - Extrusão do Filme (MJ)</b>	<b>Reciclagem (MJ)</b>
Petróleo Bruto	$7,55 \times 10^7$	$1,10 \times 10^6$	$1,45 \times 10^5$
Gás Natural	$6,78 \times 10^7$	$2,75 \times 10^6$	$1,66 \times 10^6$
Urânio	$5,47 \times 10^6$	$5,30 \times 10^6$	$1,04 \times 10^6$
Carvão Duro	$3,90 \times 10^6$	$3,12 \times 10^6$	$6,33 \times 10^5$
Lignite	$2,52 \times 10^6$	$2,15 \times 10^6$	$4,45 \times 10^5$
<b>Total</b>	<b><math>155,23 \times 10^6</math> (89,43%)</b>	<b><math>14,42 \times 10^6</math> (8,31%)</b>	<b><math>3,923 \times 10^6</math> (2,26%)</b>

Fonte: O autor (2024).

Agora, à medida que aumentamos a porcentagem do material reciclado, de 20% para 30%, temos uma queda no consumo das matérias-primas consumidas para o processamento dos grânulos de PET. Assim, é possível observarmos que o consumo de energia sofreu um decréscimo de  $19,2 \times 10^6$  MJ, uma diferença percentual de 4,07% nessa fase. A seguir, a extrusão manteve-se constante o consumo de energia, visto que, a quantidade matéria-prima que passa pela etapa de extrusão é a mesma, em relação a ao processo envolvendo 20% do PET reciclado. Por fim, a reciclagem do PET acarretou em um aumento de  $8,395 \times 10^6$  MJ, passando de 2,26% para 5,58% nesta fase. Esse valor se justifica por causa do aumento percentual do material reciclado, de 20% para 30%. A Tabela 6 demonstra esses valores, referente ao consumo, em Megajoule, para o processamento do PET.

Tabela 6 – Consumo, em Megajoule, dos recursos de origem para a síntese, processamento e para a reciclagem, com 30% do PET reciclado.

<b>Matéria-prima</b>	<b>Síntese - Grânulos de PET (MJ)</b>	<b>Processamento - Extrusão do Filme (MJ)</b>	<b>Reciclagem (MJ)</b>
Petróleo Bruto	$6,61 \times 10^7$	$1,10 \times 10^6$	$2,18 \times 10^5$
Gás Natural	$5,94 \times 10^7$	$2,75 \times 10^6$	$5,50 \times 10^6$
Urânio	$4,79 \times 10^6$	$5,30 \times 10^6$	$1,56 \times 10^6$
Carvão Duro	$3,41 \times 10^6$	$3,12 \times 10^6$	$9,50 \times 10^5$
Lignite	$2,29 \times 10^6$	$2,15 \times 10^6$	$6,67 \times 10^5$
<b>Total</b>	<b><math>136 \times 10^6</math> (85,36%)</b>	<b><math>14,42 \times 10^6</math> (9,05%)</b>	<b><math>8,395 \times 10^6</math> (5,58%)</b>

Fonte: O autor (2024).

### 4.3. AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS 1 E 2 REFERENTE AS EMISSÕES DE CO<sub>2</sub> EQUIVALENTE E DO CONSUMO DE RECURSOS DE ORIGEM FÓSSIL

#### 4.3.1. Comparação das emissões de CO<sub>2</sub> equivalente entre os cenários 1 e 2

Para melhor compreensão das simulações desenvolvidas, com 100% do PET pós-consumo para o aterro sanitário, 20% e 30% do PET reutilizados para a produção de novas garrafas. A Tabela 7 demonstra os valores, em toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, das emissões dos gases.

Tabela 7 – Emissão dos gases poluentes, em CO<sub>2</sub> equivalente, referente aos 3 cenários, em toneladas.

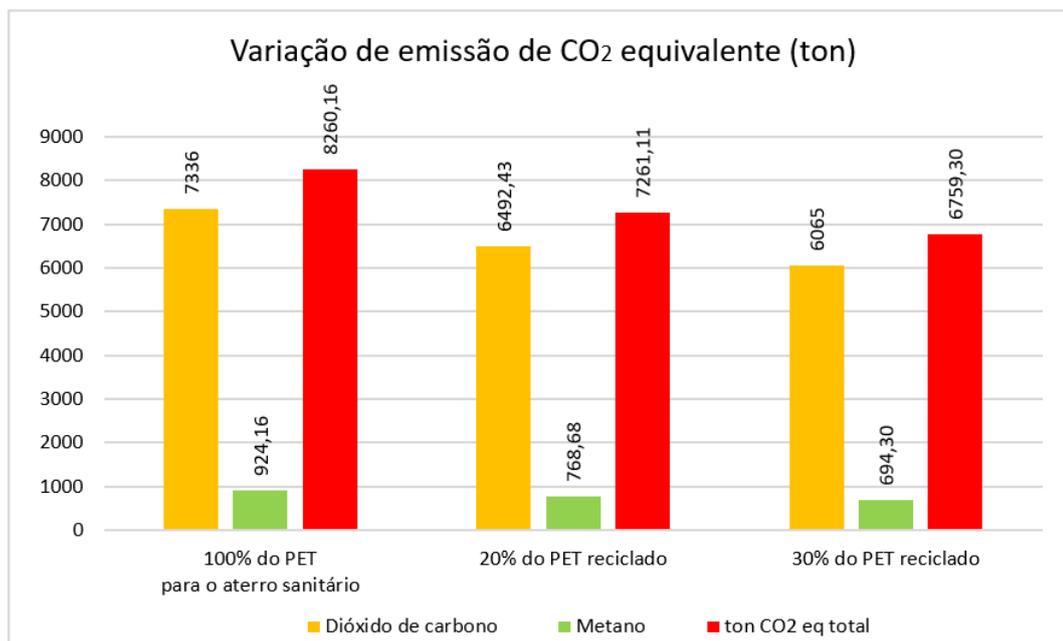
<b>Poluentes</b>	<b>100% do PET, consumido, destinado ao aterro sanitário (CO<sub>2</sub> eq.)</b>	<b>20% do PET, consumido, reciclado (CO<sub>2</sub> eq.)</b>	<b>30% do PET, consumido, reciclado (CO<sub>2</sub> eq.)</b>
Dióxido de carbono	7336	6492,43	6065
Metano	924,16	768,68	694,3
<b>Total</b>	<b>8260,16</b>	<b>7261,11</b>	<b>6759,3</b>

Fonte: O autor (2024).

Para uma melhor visualização e comparação dos 3 cenários, exibidos na Tabela 7, o Gráfico 4 demonstra, de forma clara, o decréscimo da emissão dos gases poluentes conforme nos conscientizamos da importância da reciclagem. Dessa forma, quando iniciamos a simulação, com todo o PET sendo destinado para o aterro sanitário, a emissão total de gases que contribuem para o efeito estufa, em CO<sub>2</sub> equivalente, foi de 8260,16 toneladas. Agora, quando seguimos para o segundo cenário, com 20% do PET pós-consumo reutilizado no processamento de novas garrafas, obtivemos um total de 7261,11 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente emitidos, uma redução de 999,05 toneladas, ou seja, um decréscimo de aproximadamente 12%. Com 30% do PET reutilizado, a emissão foi de 6759,30 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente apresentando a menor emissão de gases, uma redução de 1500,16 toneladas em relação ao primeiro, 18,17% de gases não emitidos.

Após a introdução de uma nova etapa poluente, ou seja, a etapa de reciclagem, emitindo 486,08 toneladas – com 20% do PET reciclado – e 729 toneladas – com 30% do PET reciclado – houve uma redução satisfatória dos gases emitidos na síntese dos grânulos e no aterro sanitário. A fabricação das garrafas PET com 80% de resina virgem (20% de resina reciclada) acarretou em 1485,12 toneladas de gases não emitidos. Para 70% da resina virgem (30% de resina reciclada) deixamos de emitir 2229,86 toneladas de gases poluentes.

Gráfico 4 – Comparação da emissão dos gases poluentes, em CO<sub>2</sub> equivalente, referente aos 3 cenários.



Fonte: O autor (2024).

#### 4.3.2. Comparação do consumo de recursos de origem fóssil entre os cenários 1 e 2

Em relação ao consumo de recursos de origem fósseis, em Megajoule, de acordo com a Tabela 8, foi avaliado que houve um decréscimo no consumo de recursos não renováveis, em Megajoule, conforme a reciclagem é aplicada o seu percentual cresce de 20% para 30%. Essa queda no consumo justifica-se, assim como a queda das emissões dos gases poluentes, devido a economia circular que abrange a reciclagem do PET, tendo como consequência a queda da produção de novos grânulos que impactam diretamente o nosso ecossistema.

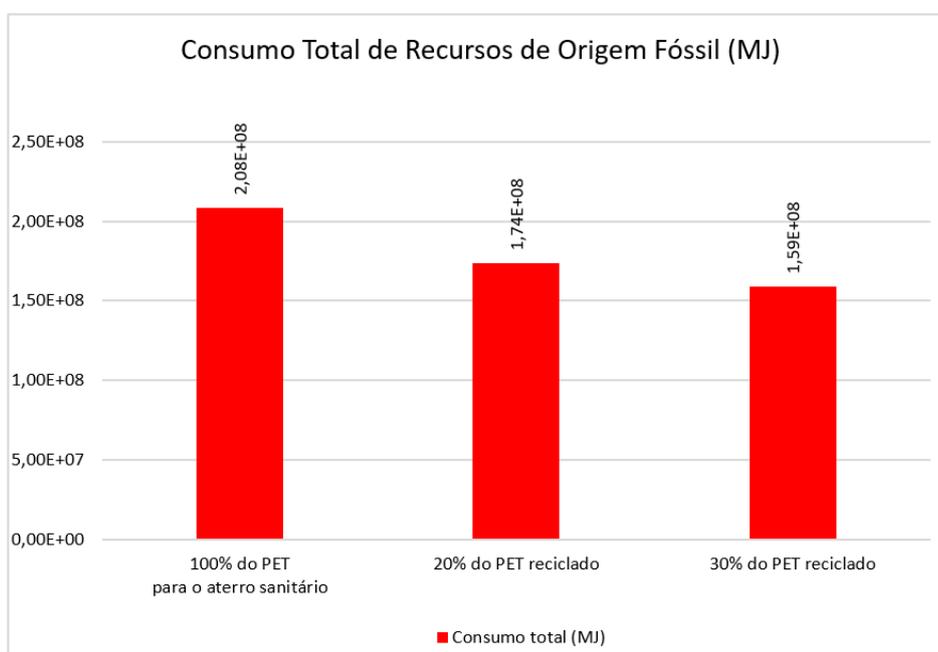
Tabela 8 – Consumo total de recursos fósseis, em Megajoule, referente aos 3 cenários.

100% do PET, pós-consumo, destinado ao aterro sanitário (MJ)	20% do PET, pós-consumo, reciclado (MJ)	30% do PET, pós-consumo, reciclado (MJ)
$2,08 \times 10^8$	$1,74 \times 10^8$	$1,59 \times 10^8$

Fonte: O autor (2024).

O Gráfico 5 evidencia a queda dos recursos utilizados para a produção das garrafas PET. Inicialmente o consumo, para o primeiro cenário, foi de  $2,08 \times 10^8$  MJ para a produção das garrafas sem a presença da reciclagem e, posteriormente, com a implementação da reciclagem, 20% do PET pós-consumo voltando para a produção de novas garrafas, ocorreu uma queda de  $0,34 \times 10^8$  MJ (16,35%) no segundo cenário. Por fim, com um percentual de 30% do PET reciclado no terceiro cenário, houve uma diminuição de  $0,49 \times 10^8$  MJ (43,21%), em relação ao primeiro cenário, e um decréscimo de  $0,15 \times 10^8$  MJ em comparação ao segundo cenário.

Gráfico 5 – Consumo total de recursos fósseis, em Megajoule, referente aos 3 cenários.



Fonte: O autor (2024).

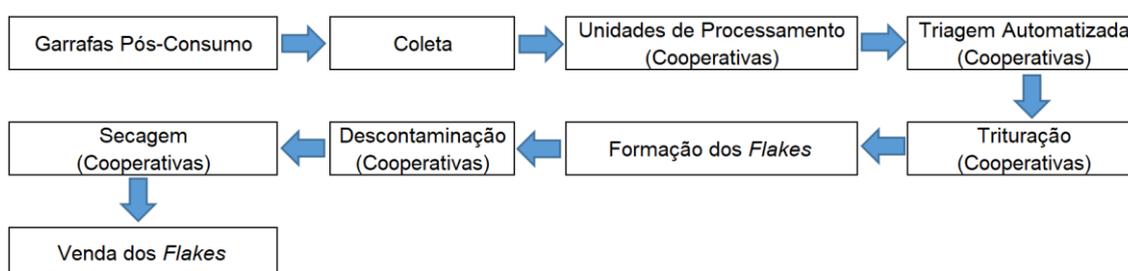
#### 4.4. DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA ATINGIR OS OBJETIVOS DE REDUÇÃO DE IMPACTO DAS GARRAFAS PETS NA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE

Diante dos impactos benéficos que a reciclagem pode acarretar, como redução da emissão dos gases poluentes – responsáveis pelas mudanças climáticas –, do acúmulo de lixo nos aterros sanitários e do consumo de energia – oriundas de recursos fósseis –, faz-se necessário levantarmos algumas propostas para aumentarmos o percentual de reciclagem. Além disso, a reciclagem é capaz de

agregar valor aos materiais que seriam descartadas e contribui para uma economia circular, visando a geração de empregos locais.

A RMR possui cerca de 20 cooperativas que trabalham apenas com a parte mecânica da reciclagem do PET (segregação manual e prensagem), ou seja, não abordam todas as etapas para a formação dos *flakes* e a sua posterior venda conforme a Figura 14. Também é viável ressaltarmos que, caso as cooperativas desenvolvem-se as etapas da Figura 14 a prensagem das garrafas PET seria um tratamento desnecessário.

Figura 14 - Etapas para o condicionamento do material para reciclagem do PET.



Fonte: O autor (2024).

Além disso, apurou-se que a capacidade de uma cooperativa foi de, aproximadamente, 12 toneladas em 2023 de garrafas PET de catadores autônomos. Essa quantidade de PET representa somente cerca de 0,4% de 3,3 mil toneladas de PET circulando na RMR, em concordância com o tópico 3.3.2. Para atingirmos os 30% de PET reciclados, de acordo com o Projeto de Lei 418/11, é necessário reciclarmos 990 toneladas de garrafas pós-consumo. Portanto, caso as 19 cooperativas detenham o mesmo percentual de 12 toneladas anualmente, cada entidade terá que aportar com 49,5 toneladas de PET para atingirmos o percentual desejado, ou seja, os 30% propostos no projeto de lei.

Dessa forma, há a carência da atuação dos órgãos públicos nessa área, como a falta de investimento em pontos estratégicos, distribuídos pela RMR, para a coleta do PET e a ampliação da coleta seletiva. Temos, por exemplo, a parceria entre a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e as 3 cooperativas, de catadores para a destinação de resíduos recicláveis (UFPE, 2024), presentes no Quadro 9.

Tabela 9 – Termo de compromisso entre a UFPE e as cooperativas de catadores.

<b>ORDEM</b>	<b>COOPERATIVA</b>	<b>PERÍODO</b>
1	COOPAGRES	01/02/2024 a 30/09/2024
2	COOCENCIPE	01/10/2024 a 31/05/2025
3	COOCARES	01/06/2025 a 31/01/2026

Fonte: Adaptado UFPE (2024).

Outro ponto importante seria a viabilização de parcerias com as cooperativas, fornecendo maquinários para a separação automática do PET, para o corte em *flakes* e para a descontaminação das garrafas. Essa parceria também pode estender-se para os catadores de reciclagem autônomos, gerando um trabalho assalariado, com a devida capacitação, para operarem esses maquinários e pela coleta dos materiais recicláveis, resguardados com kits de proteção individual.

Outra forma de elevarmos a renda, tanto para as cooperativas como para os catadores autônomos, abrange a utilização da técnica de economia circular *Upcycling*, promovendo a confecção dos utensílios inovadores a partir de resíduos descartados através de um triturador e de uma difusora. Essa técnica é aplicada, atualmente, pela cooperativa Ecovida Palha de Arroz na RMR (NASCIMENTO, 2021).

## 5. CONCLUSÃO

Através da Análise de Ciclo de Vida avaliamos os impactos ambientais gerados pelo processo produtivo das garrafas PET, desde a entrada da matéria-prima até o envio, pós-consumo, para o aterro sanitário. Além disso, fomos capazes de avaliar implementação da reciclagem como uma alternativa de reaproveitamento do material descartado em aterros sanitários.

Os resultados apresentados, através da simulação, para a produção das garrafas PET demonstrou que a síntese dos grânulos de PET proporcionou o maior nível de impacto de todo o processo produtivo, ou seja, níveis elevados de metano, dióxido de carbono e de energia emitidos. Porém, a reciclagem, visando o reaproveitamento, pós-consumo, para a fabricação de novas garrafas acarretou em um decréscimo significativo nas categorias de impacto analisadas em comparação aos impactos causados pela produção do PET sem a presença da reciclagem.

A presença da reciclagem para a produção de novas garrafas apresenta-se como uma alternativa para diminuirmos, conforme aumentamos o percentual de reciclagem, os materiais acumulados em lixões e em aterros sanitários na região metropolitana de Recife. Agora, o desenvolvimento de uma economia circular e o investimento dos órgãos públicos, nas cooperativas existentes na RMR, são capazes de gerar uma renda para os indivíduos mais vulneráveis economicamente.

Dessa forma, o estudo desenvolvido neste trabalho, com o auxílio do banco de dados existente no software OpenLCA, possibilitou destrinchar e compreender a metodologia Análise de Ciclo de Vida e as suas fases para impactarmos positivamente na sustentabilidade do planeta.

## REFERÊNCIAS

### SOFTWARE

GreenDelta. OpenLCA: The Life Cycle and Sustainability Modeling Suite. 2006.

### LEGISLAÇÃO

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 14040: Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Brasil, 2009<sup>a</sup>.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR ISSO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Brasil, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 14044: Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Brasil, 2009<sup>b</sup>.

### AUTORES

ABIPET. Associação Brasileira da Indústria de PET. 12º Censo de Reciclagem do PET no Brasil. 2021. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarDownloads&categoria.id=3>. Acesso em: 2 de fevereiro de 2024.

Abiplastic. Índice de reciclagem mecânica de plásticos atinge maior patamar desde 2018. 2023. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/noticias/indice-de-reciclagem-mecanica-de-plasticos-atinge-maior-patamar-desde-2018/>. Acesso em: 31 de março de 2024.

ALVES, S. C. C. Análise de Ciclo de Vida de Coberturas Ajardinadas. 2014. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Camara. Comissão aprova percentual mínimo de PET reciclado em garrafas. 2022. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/876748-comissao-aprova-percentual-minimo-de-pet-reciclado-em-garrafas/>. Acesso em: 31 de março de 2024.

CAMPOLINA, J. M.; SIGRIST, C. S. L.; MORIS, V. A. S. Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida. REGET/UFSM – Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 19, n. 2, p. 735-750. 2015.

CEMPRE. Compromisso Empresarial para Reciclagem. Fichas técnicas. PET. 2018.

Disponível em: <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/8/pet>. Acesso em: 6 de fevereiro de 2024.

COSTA, I.; SILVA, B.; SILVA, C.; SANTANA, P. A utilização de plástico reciclado na produção de garrafas de água. 2023. Disponível em: <https://www.interplast.pt/Artigos/468915-A-utilizacao-de-plastico-reciclado-na-producao-de-garrafas-de-agua.html>. Acesso em: 26 de dezembro de 2023.

DDCA. Censo Demográfico 2022: reflexões iniciais sobre a região Nordeste. 2023. Disponível em: <https://demografiaufrn.net/2023/07/12/censo-demografico-2022-reflexoes-iniciais-sobre-a-regiao-nordeste/>. Acesso em: 31 de março de 2024.

DIAS, S. L. F. G.; TEODÓSIO, A. S. S. Estrutura da cadeia reversa: “caminhos” e “descaminhos” da embalagem PET. Produção. Vol.16, no.3, São Paulo: set./dec. 2006. Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/prod/v16n3/a06v16n3.pdf>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2024.

Exame. Lixo de brasileiros em 2022 equivale a 85 milhões de carros populares. 2023. Disponível em: <https://exame.com/ciencia/lixo-de-brasileiros-em-2022-equivale-a-85-milhoes-de-carros-populares/>. Acesso em: 31 de março de 2024.

FAPESP. Decomposição rápida. 2007. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/decomposicao-rapida/>. Acesso em: 31 de março de 2024.

FERREIRA, J. V. R. Análise de Ciclo de Vida dos produtos. Viseu, Portugal, 2004.

FONSECA, C. C. Produção e utilização do biopolímero poli(hidroxibutirato) (PHB) em embalagens alimentícias. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -Engenharia Bioquímica, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014. P. 64.

HARADA, J.; WIEBECK, H. Plásticos de Engenharia – Tecnologia e Aplicações. São Paulo: Artliber, 2005.

JEANNERET, P.; BAUMGARTNER, D. U.; KNUCHEL R. F.; GAILLARD, G. A new LCIA method for assessing impacts of agricultural activities on biodiversity (SALCA-Biodiversity). In: International Conference on LCA in the Agri-Food Sector, 6, 2008, Zurich. Proceedings...Zurich: Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART, 2008, p.34-39.

LINS, E. Logística reversa do politereftalato de etileno na região metropolitana do Recife – Pernambuco. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 4., 2021, Gramado. Anais eletrônicos [...] Gramado: IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2016. P. 1 – 10. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2021/II-001.pdf>. Acesso em: 18 de fev. 2024.

NASCIMENTO, S. Q. Análise da economia circular aplicada na cooperativa de

reciclagem ecovida palha de arroz, Recife-PE em tempos de pandemia da covid-19. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental) – Instituto Federal de Pernambuco, Recife. Disponível em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/handle/123456789/572>.

Oyapoc. Poliéster: uma fibra muito interessante. 2022. Disponível em: <https://www.oyapoc.com.br/poliester-uma-fibra-muito-interessante/>. Acesso em: 31 de março de 2024.

PROPEQ. Por que a reciclagem de PET é importante? Venha aprender seu processo e benefícios!. 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/relatorio-da-onu-sobre-poluicao-plastica-alerta-sobre>. Acesso em: 27 de dezembro de 2023.

SANTOS, Bruno Carvalho Marques. Análise do Ciclo de Vida da Embalagem de Polietileno Tereftalato. 2011. In: Anais eletrônicos... VII CNEG. Disponível em: [http://www.inovarse.org/sites/default/files/T11\\_0392\\_2138.pdf](http://www.inovarse.org/sites/default/files/T11_0392_2138.pdf). Acesso em: 27 de dezembro de 2023.

SENAC. 6 informações chocantes sobre o plástico no meio ambiente. 2022. Disponível em: <https://www.sp.senac.br/blog/artigo/plastico-no-meio-ambiente>. Acesso em: 26 de dezembro de 2023.

SILVA, L. Estudo das variáveis envolvidas no controle de qualidade da resina PET, seu impacto, problemas e soluções para o processamento de injeção e sopro de garrafas. Relatório de Estágio. Recife, PE: UFPE, 2022.

Silva, L. F. M.; Alves, F. J. L.; Marques, A. T. Materiais de construção. 2 ed. Porto: Publindústria, 2013. 206 p.

THEIS, T.; TOMKIN, J. (Ed.) Problem-Solving, Metrics, and Tools for Sustainability. In: Sustainability: a Comprehensive Foundation. 2015. Cap. 9, p. 409-470. Disponível em: <http://legacy.cnx.org/content/col11325/1.43/>. Acesso em: 31 de março de 2024.

UNEP environment programme. Relatório da ONU sobre poluição plástica alerta sobre falsas soluções e confirma necessidade de ação global urgente. 2021. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/relatorio-da-onu-sobre-poluicao-plastica-alerta-sobre>. Acesso em: 26 de dezembro de 2023.

Universidade Federal de Pernambuco. UFPE e cooperativas de catadores firmam termo de compromisso para destinação de resíduos recicláveis. 2004. Disponível em: [https://www.ufpe.br/agencia/noticias/-/asset\\_publisher/dlhi8nsrz4hK/content/ufpe-e-cooperativas-de-catadores-firmam-termo-de-compromisso-para-destinacao-de-residuos-reciclave-1/40615](https://www.ufpe.br/agencia/noticias/-/asset_publisher/dlhi8nsrz4hK/content/ufpe-e-cooperativas-de-catadores-firmam-termo-de-compromisso-para-destinacao-de-residuos-reciclave-1/40615). Acesso em: 21 de fevereiro de 2024.

VALT, R.B.G. Análise do ciclo de vida de embalagens pet, de alumínio e de vidro para 41 refrigerantes no Brasil variando a taxa de reciclagem dos materiais. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-graduação em Engenharia. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004. P. 193.