



AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE EMBALAGENS DE AZEITE DE OLIVA USANDO UMA ABORDAGEM DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

Jullyele Plana Barbosa

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná-campus Londrina

Orientado por:

Prof. Doutor Artur Jorge de Jesus Gonçalves (ESA-IPB)

Doutor Nuno Miguel de Sousa Rodrigues (ESA-IPB)

Prof. Doutor Ricardo Nagamine Constazi (UTFPR-LD)

**Bragança
2025**

Dedicatória

Durante este percurso, uma das pessoas mais especiais da minha vida foi chamada para conversar mais próximo de Deus. Meu pai, José Carlos Barbosa (Carlão), partiu enquanto eu realizava o sonho de cursar o mestrado, sonho que também era dele. Sua força, amor e incentivo sempre foram o alicerce da minha caminhada. Dedico este trabalho a ti, pai, com eterna gratidão e saudade. Obrigada por acreditar em mim antes mesmo que eu acreditasse. Te encontro em cada conquista, em cada passo que dou.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi construído sobre uma oportunidade que, particularmente, eu não imaginava ter. Aqui fica, com todo carinho, o meu sincero agradecimento.

Esta conquista não seria possível sem o amor, o apoio e os valores que recebi da minha família. Em especial, deixo a minha eterna homenagem ao meu pai. Embora a sua ausência tenha deixado uma saudade imensa, é a sua força que me move todos os dias. Este título é, antes de tudo, por ele e para ele.

À minha mãe, à minha irmã e ao meu sobrinho, que seguraram a minha mão com firmeza quando meu coração estava em apuros, deixo o meu amor e eterna gratidão. Foram eles que me sustentaram com palavras, com presença e com fé quando eu mesma já não tinha forças.

Às minhas amigas Mariana e Gunara, que foram minha família em todos os sentidos, agradeço por cada gesto de carinho, pelas palavras de incentivo e pela presença constante, mesmo à distância.

Como vim para um país novo, formei aqui também uma família. Ao Luan, Lucas e Nelson, o meu agradecimento de coração pelos momentos inesquecíveis, pelos risos e pelo apoio constante.

Agradeço profundamente aos meus orientadores e mentores, que foram fundamentais nesta caminhada acadêmica. Ao Professor Doutor Artur Gonçalves, pela paciência, dedicação e orientação atenta durante todo o desenvolvimento deste trabalho. A sua confiança e incentivo foram essenciais nos momentos de incerteza, guiando-me com clareza e serenidade ao longo deste percurso.

Ao Professor Doutor Ricardo Nagamine Constazi, que me acompanha desde a iniciação científica no Brasil. Foi ele quem acreditou e me encorajou a seguir o caminho da dupla diplomação. A sua escuta generosa, sabedoria e amizade ultrapassaram o papel de professor.

Ao Doutor Nuno Rodrigues, deixo o meu sincero agradecimento pela disponibilidade, apoio e pelas portas sempre abertas quando precisei. A sua colaboração foi valiosa para o desenvolvimento deste estudo.

Um agradecimento especial à Doutoranda Lais Serafini, pela ajuda constante, paciência e generosidade em compartilhar seu conhecimento e experiência. A sua presença foi fundamental nos momentos de dúvida, e sua disposição em colaborar fez toda a diferença na realização desta tese.

Ao Instituto Politécnico de Bragança e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Campus Londrina), minha sincera gratidão pela oportunidade única de vivenciar esta

experiência de dupla diplomação, que marcou profundamente a minha trajetória pessoal e profissional.

Agradeço também ao Edital Nilo Peçanha (nº 22/2024 – PROGRAD/ASSAE) pelo essencial auxílio financeiro. Desejo que este programa possa contemplar, a cada dia, o sonho de mais estudantes, permitindo que mais histórias como a minha se tornem possíveis.

A todos os professores, colaboradores, colegas, familiares e amigos que, de alguma forma, contribuíram para esta etapa da minha vida a todos vocês, de coração: muito obrigada.

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo analisar o impacto ambiental das principais embalagens utilizadas para azeite extra virgem: o vidro, PET, lata e bag-in-box, quantificando seus efeitos ao longo do ciclo de vida conforme as normas ISO 14040 e ISO 14044. A Avaliação do Ciclo de Vida foi aplicada considerando as etapas de produção, transporte, uso e fim de vida, com foco em indicadores como Potencial de Aquecimento Global, Formação de Partículas Finas, Consumo de Água Doce, Ecotoxicidade em Água Doce e Toxicidade Humana Não Carcinogênica.

Os resultados demonstram que a embalagem de vidro apresenta o maior impacto ambiental, associada principalmente ao seu elevado peso, gera elevado consumo energético no processo de fusão (≈ 6 MJ/kg) e emissões superiores a 1,6–2,9 kg CO₂ eq/kg. Apesar da alta reciclabilidade (85–90%) e reutilização potencial, o peso contribui para aumentar as emissões no transporte.

As embalagens de PET e R-PET exibiram o melhor desempenho global. O uso de PET reciclado mecanicamente permite reduções de até 60% nas emissões de CO₂ em comparação com o vidro, mantendo níveis de reciclabilidade semelhantes (85–90%). O PET apresenta impacto climático de 2,3–2,5 kg CO₂ eq/kg, mas benefício logístico devido ao baixo peso. O uso obrigatório na UE de 30% de R-PET em embalagens alimentares a partir de 2030 reforça esse cenário positivo.

As latas, com reciclabilidade próxima de 95%, apresentam impacto elevado quando produzidas a partir de alumínio primário, devido ao consumo energético extremamente alto (155–200 MJ/kg) e emissões associadas à extração e eletrólise da bauxita (9–11 kg CO₂ eq/kg). Contudo, quando reciclado, o alumínio pode reduzir sua pegada ambiental em mais de 70%, tornando-se competitivo com PET e vidro reciclado.

O sistema bag-in-box destaca-se pelo baixo consumo de materiais e peso reduzido, com impactos gerais moderados (3–5 kg CO₂ eq/kg e 50–70 MJ/kg). No entanto, sua reciclabilidade é inferior a 50%, devido às camadas multicamadas de polímeros e alumínio, o que limita sua integração em ciclos circulares.

Os cenários de reciclagem reduziram significativamente os impactos em todas as categorias analisadas, demonstrando que a estrutura de gestão de resíduos é tão determinante quanto o próprio material. De forma geral, o R-PET surge como a alternativa mais sustentável, seguido pelo alumínio reciclado. O vidro permanece ambientalmente viável apenas em contextos de reuso ou elevada taxa de retorno. Os resultados reforçam a necessidade de

promover design ecológico, integração de conteúdo reciclado e sistemas circulares, alinhando a cadeia das embalagens de azeite aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Palavras-chave: Embalagem; Azeite Virgem Extra; Avaliação do Ciclo de Vida; Sustentabilidade; Economia Circular.

ABSTRACT

This dissertation aims to evaluate the environmental impact of the main packaging types used for extra virgin olive oil glass, PET, aluminum cans, and bag-in-box quantifying their effects across the entire life cycle according to ISO 14040 and ISO 14044 standards. The Life Cycle Assessment (LCA) was applied considering the stages of production, transportation, use, and end-of-life, with a focus on indicators such as Global Warming Potential, Fine Particulate Matter Formation, Freshwater Consumption, Freshwater Ecotoxicity, and Non-Carcinogenic Human Toxicity.

The results show that glass packaging presents the highest environmental burden, mainly due to its substantial weight, which leads to high energy consumption during the melting process (≈ 6 MJ/kg) and emissions ranging from 1.6 to 2.9 kg CO₂ eq/kg. Although glass has a high recycling rate (85–90%) and strong reuse potential, its weight significantly increases transportation-related emissions.

PET and R-PET packaging demonstrated the best overall environmental performance. The use of mechanically recycled PET can reduce CO₂ emissions by up to 60% compared to glass, while maintaining similar recyclability levels (85–90%). PET exhibits a climate impact of 2.3–2.5 kg CO₂ eq/kg but offers logistical advantages due to its low weight. The upcoming EU requirement mandating 30% R-PET content in food-contact packaging by 2030 further strengthens its environmental relevance.

Aluminum cans, which have a recyclability rate close to 95%, show high impacts when produced from primary aluminum due to extremely high energy demand (155–200 MJ/kg) and emissions associated with bauxite extraction and electrolysis (9–11 kg CO₂ eq/kg). However, when recycled, aluminum can reduce its environmental footprint by more than 70%, becoming competitive with PET and recycled glass.

The bag-in-box system stands out for its low material consumption and reduced weight, resulting in moderate overall impacts (3–5 kg CO₂ eq/kg and 50–70 MJ/kg). Nevertheless, its recyclability is below 50% due to its multilayer polymer–aluminum structure, which limits its suitability for circular material loops.

Recycling scenarios significantly reduced impacts across all assessed categories, demonstrating that waste-management efficiency is as critical as the material itself. Overall, R-PET emerges as the most sustainable option, followed by recycled aluminum. Glass remains environmentally viable mainly in reuse systems or high-return contexts. These findings reinforce the need to promote ecological packaging design, increase recycled content, and

strengthen circular systems, aligning olive oil packaging practices with the Sustainable Development Goals.

Keywords: Packaging; Olive Oil; Life Cycle Assessment (LCA); Sustainability; Circular Economy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos do estudo	4
<i>1.1.1 objetivo geral</i>	<i>4</i>
<i>1.1.2 objetivos específicos</i>	<i>4</i>
1.2 Organização da dissertação	4
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1 Embalagens: conceitos e funções	6
2.2 Tipologia e materiais de embalagens de produtos alimentares	6
2.3 Legislação e políticas ambientais aplicáveis às embalagens	7
2.4 Quantidade de resíduos gerados em sua produção	10
2.5 Avaliação do ciclo de vida segundo as normas iso 14040 e 14044	11
2.6 Aplicações da acv em embalagens e estudos correlatos	13
2.7 Processo do azeite	15
2.8 Ciclo de vida do azeite	16
2.9 Tipos de embalagens para azeite	17
<i>2.9.1 Vidro</i>	<i>18</i>
<i>2.9.2 PET</i>	<i>19</i>
<i>2.9.3 Lata</i>	<i>19</i>
<i>2.9.4 Bag-in-box</i>	<i>19</i>
2.10 Avaliação de embalagens	20
2.11 Impacto ambiental das embalagens	21
<i>2.11.1 Conceito “cradle to cradle” e economia circular</i>	<i>24</i>
3 MATERIAIS E METODOS	28
3.1 Procedimentos metodológicos: revisão sistemática da literatura	29
3.2 Avaliação do ciclo de vida com o software gabi	30
3.3 Fronteira do sistema	32

3.3.1 Garrafa de vidro	32
3.3.2 Garrafa pet.....	33
3.3.3 Lata	35
3.3.4 Bag-in-box	36
3.4 Unidade funcional	38
3.5 Análise qualitativa.....	39
3.5.1 Design sustentável para embalagens	40
3.6 Análise quantitativa	42
4. RESULTADOS.....	45
4.1 Embalagem de vidro	46
4.2 Embalagem PET.....	54
4.3 Embalagem lata	63
4.4 Bag-in-box	70
4.5 Avaliação complementar de embalagens	71
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	78
6. CONCLUSÃO	83
REFERÊNCIAS	86
LISTA DE ANEXOS.....	89

Lista De Figuras

Figura 1 Inter-relações entre as normas. Fonte:NAPKIN.IA	13
Figura 2: Processo do Azeite.Fonte: Moura, 2019.	16
Figura 3 Análise do Ciclo de vida do Azeite. Fonte: NAPKIN, IA.	17
Figura 4: Factores que contribuem para a escolha da embalagem do azeite. Fonte: NAPKIN, IA.	21
Figura 5 Modelo Cradle to Cradle. Fonte: Ideia Circular	24
Figura 6: Fases de Uma ACV (Fonte: ISO 14040).	32
Figura 7: Sistema de Fronteira Garrafa de vidro.	32
Figura 8: Sistema de Fronteira Garrafa de PET.	34
Figura 9: Sistema de Fronteira Lata.	36
Figura 10: Sistema de Fronteira BIB	37
Figura 11 Análise das embalagens. Fonte: NaAPKIN, IA.	40
Figura 12 Embalagens de azeite de 100 ml (Vidro, PET, Lata e BIB)	43
Figura 13: Estimativa do Impacte na categoria GWP dos cenários de fim de vida para embalagem de vidro	46
Figura 14: Estimativa do Impacte na categoria FPF dos cenários de fim de vida para embalagem de vidro	48
Figura 15: Estimativa do Impacte na categoria CAD dos cenários de fim de vida para as embalagens de vidro	49
Figura 16: Estimativa do Impacte na categoria EAD e (kg 1,4-DB eq.) dos cenários de fim de vida para as embalagens de vidro	51
Figura 17: Estimativa do Impacte na categoria TH nc dos cenários de fim de vida para as embalagens de vidro	53
Figura 18: Estimativa do Impacte na categoria GWP dos cenários de fim de vida para as embalagens de PET	55
Figura 19: Estimativa do Impacte na categoria FPF dos cenários de fim de vida para as embalagens de PET	57
Figura 20: Estimativa do Impacte na categoria CAD dos cenários de fim de vida para as embalagens de PET	58
Figura 21: Estimativa do Impacte na categoria EAD dos cenários de fim de vida para as embalagens de PET	60

Figura 22: Estimativa do Impacte na categoria TH nc dos cenários de fim de vida para as embalagens de PET	61
Figura 23: Estimativa do Impacte na categoria GWP dos cenários de fim de vida para as embalagens de lata	63
Figura 24: Estimativa do Impacte na categoria FPF dos cenários de fim de vida para as embalagens de lata.	65
Figura 25: Estimativa do Impacte na categoria CAD dos cenários de fim de vida para as embalagens de lata	66
Figura 26: Estimativa do Impacte na categoria EAD dos cenários de fim de vida para as embalagens de lata	68
Figura 27: Estimativa do Impacte na categoria TH nc de fim de vida para as embalagens de lata	69
Figura 28: Embalagem de Vidro Fonte: The Recycling Partnership (2022).	72
Figura 29 Embalagem de PET. Fonte: The Recycling Partnership (2022).	74
Figura 30 Embalagem de Lata. Fonte: The Recycling Partnership (2022)	76
Figura 31 Gráfico categorias de impacto ambiental todas as embalagens.	78
Figura 32 Gráfico Embalagem de VidroxLata.	79
Figura 33 Gráfico VidroxPET.	80

Lista de Tabelas

Tabela 1: Avaliação comparativa do impacto ambiental das principais tipologias de embalagens de azeite	23
Tabela 2: Principais dados do Inventário do Ciclo de Vida (LCI) das Embalagens de Azeite por UF (UF: 0,1 L de azeite).	44

Lista de Abreviaturas e Siglas

ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ADP	Abiotic Depletion Potential (Potencial de Depleção Abiótica)
AP	Acidification Potential (Potencial de Acidificação)
APA	American Psychological Association
BIB	Bag-in-Box
CAD	Consumo de Água Doce
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
CO ₂ eq.	Dióxido de Carbono Equivalente
EAD	Ecotoxicidade em Água Doce
ESA-IPB	Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança
EU	European Union (União Europeia)
FPF	Formação de Partículas Finas
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	Greenhouse Gases
GWP	Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)
ISO	International Organization for Standardization
ISO 14040	Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura
ISO 14044	Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Requisitos e Diretrizes
kg CO ₂ eq.	Quilograma de Dióxido de Carbono Equivalente
LCA	Life Cycle Assessment (Avaliação do Ciclo de Vida)
LDPE	Low-Density Polyethylene (Poliétileno de Baixa Densidade)
NY	Nylon (Poliamida)
PAC	Potencial de Aquecimento Global
PAHs	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos)
PE	Poliétileno
PET	Poliétileno Tereftalato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
R-PET	Polyethylene Terephthalate Recycled (PET Reciclado)
TH (n-c)	Toxicidade Humana Não Cancerígena
UTFPR-LD	Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Câmpus Londrina
UNEP	United Nations Environment Programme (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente)
UE	União Europeia
UF	Unidade Funcional

1. INTRODUÇÃO

O papel crucial do azeite na Europa ao longo dos séculos é amplamente reconhecido, sobretudo pela sua relevância na dieta mediterrânea. Para além das suas propriedades nutricionais, associadas à redução do risco de doenças cardiovasculares, o azeite possui uma forte influência cultural, constituindo um elemento central na identidade e no modo de vida das comunidades do Mediterrâneo. A produção deste sub-setor agrícola assume grande importância em países como Espanha, Itália, Grécia e Portugal (Accorsi et al., 2015), sustentada pela excelência produtiva e por práticas agrícolas enraizadas na tradição. A Europa não apenas reflete a relevância histórica do azeite, mas também a sua importância económica e social, impulsionada pela valorização de hábitos alimentares saudáveis e pela preferência por produtos de origem sustentável (Navarro et al., 2018).

Ao longo dos últimos séculos, o mercado de produção de azeite consolidou-se como um setor de grande relevância económica e ambiental. No período de 2020–2021, a produção mundial atingiu aproximadamente 3,1 milhões de toneladas, com um consumo global anual variando entre 2,7 e 3,3 milhões de toneladas (Conselho Internacional do Olival, 2021).

De acordo com dados recentes do *World Population Review* (2025), cerca de 68% da produção mundial de azeite está concentrada em países da região mediterrânea, especialmente na União Europeia. A Espanha mantém a liderança mundial, com 766,400 toneladas produzidas em 2023, seguida por Itália (288,900 toneladas), Grécia (195,000 toneladas) e Portugal (150,000 toneladas). Além desses, Turquia (210,000 toneladas) e Tunísia (200,000 toneladas) também figuram entre os principais produtores globais, reforçando a importância estratégica da região mediterrânica na cadeia mundial do azeite. Em Portugal, a produção nacional de azeite atingiu em 2023 aproximadamente 1,75 milhões de hectolitros, equivalentes a cerca de 160,8 mil toneladas, representando a segunda maior campanha oleícola de sempre, segundo dados oficiais do Instituto Nacional de Estatística (INE, 2024). Este resultado reflete o contínuo crescimento e modernização do setor, impulsionado pela expansão dos olivais intensivos e de alta densidade, sobretudo na região do Alentejo, que se destacou por concentrar cerca de 84% da produção nacional (Ministério da Agricultura e Alimentação, 2023; O Atual, 2024).

A expressiva participação do Alentejo na produção nacional decorre de condições edafoclimáticas favoráveis, da mecanização da colheita e da adoção de tecnologias avançadas no processo de extração, que têm contribuído para o aumento da produtividade

e da qualidade do azeite português. Além disso, observa-se um fortalecimento da competitividade internacional do setor, com Portugal consolidando-se como o quinto maior produtor mundial de azeite, atrás apenas de Espanha, Itália, Grécia e Turquia (World Population Review, 2025).

Paralelamente à relevância produtiva, a União Europeia assume papel de destaque enquanto principal região consumidora, sendo responsável por cerca de 53% do consumo global de azeite (Comissão Europeia, 2024). Este cenário reforça a centralidade do azeite não apenas como um produto agrícola de elevado valor económico, mas também como um componente fundamental da dieta mediterrânica e um elemento estratégico na cadeia agroalimentar europeia, especialmente quando considerados os impactos energéticos, económicos e ambientais associados ao seu ciclo produtivo.

No que diz respeito ao meio ambiente, a viabilidade ambiental dessa indústria tem sido amplamente analisada por meio da metodologia da ACV. Esta abordagem permite estimar os impactos ambientais associados a todas as etapas envolvidas na vida útil do produto, desde os materiais utilizados na produção até os recursos necessários, como fonte de energia empregadas, bem como emissões de gases e resíduos que são gerados no processo. (Accorsi, Versari, & Manzini, 2015). Diversos estudos apontam que a etapa de cultivo das oliveiras é responsável pela maior parte dos impactos ambientais associados à produção de azeite, superando significativamente as fases de processamento e embalagem. Esses impactos estão principalmente relacionados ao uso intensivo de recursos naturais, como água e solo, às emissões de gases de efeito estufa decorrentes da aplicação de fertilizantes e do manejo agrícola, bem como à geração de resíduos e efluentes orgânicos (ISO, 2014).

De acordo com análises de ACV, o cultivo das oliveiras pode representar entre 60% e 80% do impacto total em categorias como potencial de aquecimento global, eutrofização e acidificação do solo, dependendo do tipo de sistema produtivo e da intensidade do uso de insumos agrícolas (Nogueira et al., 2021). Em contrapartida, a etapa de embalagem, embora também relevante, tende a contribuir em menor escala para o impacto ambiental total, sobretudo quando são adotados materiais recicláveis ou de baixo peso, como o PET reciclado e o vidro retornável (Guiné et al., 2011).

Nesse contexto, a adoção de práticas sustentáveis no cultivo tem-se tornado um diferencial estratégico para as empresas do setor, não apenas para minimizar danos ambientais, mas também para responder a um mercado consumidor cada vez mais informado e exigente. Estudos, como o de Guiso *et al.* (2017), evidenciam que a

implementação de métodos de produção menos agressivos, como agricultura biológica, e estratégias de maior eficiência hídrica contribuí significativamente para uma imagem corporativa mais responsável, além de reforçar a qualidade do produto final. Assim, a sustentabilidade no cultivo da oliveira e nos seus produtos como o azeite, não só reduz a pegada ecológica, mas também agrega valor à marca, fortalecendo sua competitividade e alinhando-a às tendências globais de produção ética e ambientalmente equilibrada.

O conceito de ACV, conforme estabelecido pelas normas ISO 14040 e ISO 14044, constitui um instrumento essencial para a análise detalhada dos impactos ambientais associados a produtos, processos ou serviços ao longo de todo o seu ciclo de vida. Em termos gerais, a norma ISO 14040 define os princípios e a estrutura metodológica da ACV, abrangendo desde a formulação dos objetivos e a definição do escopo até a análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação dos resultados. Essa padronização assegura a consistência, transparência e comparabilidade entre estudos, permitindo que a ACV seja aplicada de forma rigorosa e confiável como ferramenta estratégica de apoio à tomada de decisão em contextos de sustentabilidade ambiental.

A norma ISO 14044 fornece orientações detalhadas sobre como conduzir uma ACV, incluindo as etapas de análise de inventário, avaliação de impactos e de interpretação dos resultados. Essas diretrizes são complementares entre si, visando estabelecer uma metodologia padronizada para garantir que as ACV sejam comparáveis e cientificamente sólidas. Ao seguir este enquadramento normativo, é possível identificar oportunidades de melhoria ambiental em produtos, como reduzir impactos em toda a cadeia produtiva, auxiliar na tomada de decisões embasadas no desenvolvimento sustentável ou na formulação de políticas públicas. (Delgado, Gómez-Rico, & Guinard, 2013).

Assim, a presente dissertação tem como objetivo analisar as diferentes etapas do ciclo de vida das embalagens de azeite, a fim de identificar oportunidades de melhoria ambiental e propor estratégias que promovam a sustentabilidade ao longo de todo o processo produtivo. Pretende-se, com este estudo contribuir para a minimização dos impactos ambientais, apoiar a adoção de soluções de produção com menor carga ecológica e promover um consumo mais consciente e informado. A introdução de alternativas inovadoras, como embalagens reutilizáveis ou materiais biodegradáveis, com menor pegada de carbono, exemplifica avanços tecnológicos que podem contribuir para mitigar os impactos ao longo do ciclo de vida do produto.

1.2 Objetivos do estudo

Com base no exposto anteriormente, com esta dissertação pretende-se alcançar os objetivos que se seguem.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho ambiental de diferentes tipos de embalagens de azeite, comparando seu ciclo de vida, com o intuito de identificar oportunidades de melhoria e propor alternativas mais sustentáveis.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Identificar e caracterizar os principais tipos de embalagens de azeite disponíveis no mercado (vidro, PET, lata e bag-in-box).
- b) Avaliar o ciclo de vida de cada tipo de embalagem, desde a extração de matérias-primas até ao destino final.
- c) Quantificar os impactos ambientais de cada tipo de embalagem, considerando aspetos como consumo de energia, emissão de gases com efeito de estufa, uso da água e geração de resíduos.
- d) Analisar as práticas atuais de reciclagem e reutilização das embalagens de azeite e a sua eficácia.
- e) Propor alternativas e estratégias para minimizar os impactos ambientais, como o uso de materiais recicláveis ou biodegradáveis e a otimização de processos de fabricação e descarte.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação está estruturada de modo a conduzir o leitor de forma lógica e progressiva ao longo das diferentes etapas do estudo, desde o enquadramento teórico até à análise dos resultados e às conclusões finais.

O Capítulo 1 apresenta a introdução geral ao tema, destacando a relevância ambiental do estudo das embalagens de azeite e o contexto em que a pesquisa se insere. São definidos os objetivos gerais e específicos, bem como a problemática que motivou a investigação, evidenciando a importância da ACV como ferramenta essencial para comparar o desempenho ambiental de diferentes materiais de embalagem.

O Capítulo 2 é dedicado à fundamentação teórica e reúne uma revisão aprofundada da literatura sobre embalagens, sustentabilidade e economia circular,

abordando também os princípios metodológicos da ACV, conforme as normas ISO 14040 e ISO 14044. São discutidos conceitos-chave relacionados à gestão ambiental, à hierarquia de resíduos e às políticas europeias que promovem a transição para sistemas de produção e consumo mais sustentáveis.

O Capítulo 3 descreve a metodologia utilizada, incluindo a definição da UF, os limites do sistema e os cenários de fim de vida considerados. São igualmente apresentados os dados utilizados na modelação, as fontes de informação e os procedimentos de simulação realizados no software GaBi, em conformidade com os requisitos metodológicos das normas ISO.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nas simulações, evidenciando os indicadores ambientais de cada tipo de embalagem (vidro, PET, lata e bag-in-box), com destaque para categorias de impacto como Potencial de Aquecimento Global, Formação de Partículas Finas, Consumo de Água Doce, Ecotoxicidade Aquática e Toxicidade Humana Não Carcinogênica.

O Capítulo 5 é dedicado à discussão crítica dos resultados, relacionando-os com estudos anteriores e com práticas de gestão ambiental no setor de embalagens. São analisadas as vantagens e limitações de cada material, as oportunidades de melhoria e as implicações dos resultados no contexto da economia circular.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões gerais do estudo, salientando as principais contribuições científicas da dissertação e as recomendações para futuras investigações. Destacam-se ainda as potencialidades da aplicação da ACV como instrumento de apoio à tomada de decisão ambiental e à seleção de embalagens mais sustentáveis.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Embalagens: conceitos e funções

O conceito de embalagem engloba qualquer material ou recipiente destinado a acondicionar produtos ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a fabricação até o descarte, desempenhando funções de proteção, manuseio, transporte e apresentação. Essa visão destaca não apenas as atribuições essenciais da embalagem, mas também sua importância na logística e no funcionamento das cadeias de suprimento do dia a dia das pessoas. (Moura e Banzato 1997).

No contexto da União Europeia, onde se inclui Portugal, as normas e regulamentos aplicáveis às embalagens são definidos pela Diretiva 94/62/CE, frequentemente atualizada para responder às exigências de sustentabilidade e aos princípios da economia circular. De acordo com esta diretiva, a embalagem é entendida como um “objeto feito de diversos materiais” cujo propósito é armazenar e proteger o conteúdo, facilitando simultaneamente a sua manipulação e distribuição. Assim, o desenvolvimento de embalagens deve considerar múltiplos aspectos ambientais, incluído a redução do desperdício, e possibilidade de reaproveitamento e reciclabilidade, bem como a minimização dos impactos ambientais negativos associados ao seu uso e descarte. Estes requisitos são cada vez mais relevantes no contexto atual da economia circular, que visa otimizar o uso dos recursos e reduzir resíduos desnecessários. A legislação vigente também estabelece distinções entre embalagens primárias, secundárias e terciárias, para destacar suas funções específicas e responsabilidades em cada fase do ciclo de vida dos produtos.

2.2 Tipologia e materiais de embalagens de produtos alimentares

Desde os primórdios até à atualidade, a embalagem tem desempenhado um papel crucial na sociedade humana, adaptando-se às necessidades, em constante evolução e progredindo tanto em termos técnicos quanto na sua utilização cada vez mais frequente.

Historicamente, as embalagens surgiram com a função primária de armazenar alimentos, protegê-los contra contaminações e facilitar o seu transporte. Com o passar do tempo e o avanço das tecnologias de fabricação e dos materiais, as embalagens adquiriram novas funcionalidades, tornando-se elementos fundamentais não apenas para a conservação, mas também para a comunicação, comercialização e sustentabilidade dos produtos (Robertson, 2013; Han, 2014).

Com o progresso industrial e a expansão geográfica e econômica das sociedades modernas, a natureza das embalagens evoluiu significativamente, passando de uma função meramente utilitária para desempenhar também papéis informativos e simbólicos, auxiliando na identificação, manipulação e uso adequado dos produtos (Lockhart, 2000; Marsh & Bugusu, 2007).

Esse desenvolvimento impulsionou o aperfeiçoamento de embalagens e rótulos mais sofisticados, capazes de transmitir informações de forma clara e atrativa através de um design visual mais elaborado, englobando elementos como fontes tipográficas variadas e harmoniosas e uma paleta de cores envolvente que reflete as demandas atuais de consumo e engajamento (Silva e Mantoan, 2024).

2.3 Legislação e políticas ambientais aplicáveis às embalagens

As recentes atualizações de diretrizes para embalagens sustentáveis resultam da procura de promoção da economia circular, fortalecendo a competitividade do setor de embalagens. O objetivo do regulamento é reduzir significativamente as emissões de gases com efeito de estufa, minimizar o consumo de água, e os impactos ambientais causado pela indústria de embalagem. Paralelamente, procura-se estimular o desenvolvimento de um mercado mais robusto para a reciclagem de resíduos e materiais recicláveis reduzindo a dependência dos recursos naturais primários. Entre as principais ações a serem tomadas, existe uma tendência para incentivar o reaproveitamento e a reposição como alternativa às embalagens descartáveis e melhorar a comunicação com os consumidores, para tornar mais fácil a separação das embalagens (Rodrigues, 2024).

O Regulamento (UE) 2025/40 (Parlamento Europeu & Conselho da União Europeia, 2024), estabelece as novas disposições aplicáveis a embalagens e resíduos de embalagens dentro da União Europeia.

A implementação destas regulamentações tem impulsionado o setor de reciclagem, criando oportunidades de negócios e empregos, assim aumentando a segurança ambiental para os consumidores, através do controle de substâncias prejudiciais presentes nas embalagens. Essas novas diretrizes flexíveis permitem ajustes conforme as necessidades individuais de cada país membro da União Europeia e ajustados a cada empresa envolvida no processo de reciclagem para melhorar a sustentabilidade e eficiência dos materiais usados. Dessa maneira, o regulamento não apenas destaca o comprometimento da União Europeia com práticas sustentáveis, como também procura

fortalecer a economia circular e encorajar atitudes responsáveis e criativas dentro do setor de reciclagem.

Em seu artigo 5º, no qual se abordam os requisitos para substâncias em embalagens, definindo regras sobre embalagens no mercado europeu no intuito de reduzir a presença de substâncias nocivas em materiais de embalagem para proteger o meio ambiente e a saúde das pessoas. De acordo com este artigo, é de suma importância controlar essas substâncias desde sua produção até a etapa de descarte de resíduos, para minimizar as emissões e impactos na reciclabilidade dos materiais e possíveis contaminações por microplásticos. Até dezembro de 2026, a Comissão Europeia, em parceria com a Agência Europeia dos Produtos Químicos, irá realizar um acompanhamento da presença dessas substâncias para elaborar um relatório abordando como elas afetam a reutilização e reciclagem de materiais e, também, os impactos químicos relacionados. Com base nesse estudo, poderão ser estabelecidas potenciais restrições adicionais, focadas especialmente em substâncias que possam comprometer a segurança ambiental e da saúde humana. Até dezembro de 2025, os países devem disponibilizar dados sobre substâncias que atrapalham a reciclagem para considerar possíveis restrições adicionais no futuro. Adicionalmente, foram estabelecidos limites para a quantidade de metais pesados (como o chumbo e o mercúrio), não podendo exceder 100 mg/kg em embalagens específicas.

A partir de 2026, as embalagens destinadas a entrar em contato com alimentos não poderão apresentar concentrações acima dos limites estabelecidos de substâncias perfuradas (PFAS), com o objetivo de reduzir os riscos ao meio ambiente e à saúde. Até 2030, será realizada uma avaliação da necessidade de ajustar esses limites para evitar conflitos com outras regulamentações europeias. Até 2033, a Comissão pode também tomar outras medidas para ajustar a regulamentação aos avanços técnicos e científicos em vigor e pode incluir isenção temporária, aplicável a alguns materiais reciclados e sistemas de produtos de ciclo fechado, com o objetivo de avaliar sua efetividade na redução da presença de substâncias preocupantes nas embalagens. Essas orientações desempenham um papel essencial na promoção da economia circular sustentável ao assegurar que o design das embalagens seja seguro e eficiente ao longo de seu ciclo de vida.

O Artigo 6º, referente às embalagens plásticas, estabelece que todas as embalagens colocadas no mercado devem ser fabricadas com materiais recicláveis e compatíveis com processos de reciclagem de alta qualidade. O objetivo é assegurar que os materiais reciclados possam ser reutilizados na produção de novos produtos sem comprometer suas

propriedades físicas, químicas ou de segurança. Tais embalagens devem ser concebidas de modo a facilitar sua reciclabilidade, ao permitir a separação eficiente dos componentes durante o processo de recolha seletiva, sobretudo para viabilizar sua reintrodução na cadeia produtiva. De 2030 em diante, será obrigatório que apenas embalagens classificadas como A, B ou C em termos de reciclabilidade sejam autorizadas, a partir de 2038 somente as classes A e B poderão ser vendidas comercialmente. Até 2028, a Comissão Europeia irá definir os critérios técnicos para reciclagem, incluindo normas de separação e tecnologia empregada na recuperação de materiais. Ao avaliar a possibilidade de reciclabilidade de um produto, é necessário analisar questões técnicas, econômicas e ambientais, bem como identificar quaisquer componentes que possam dificultar o processo de reciclagem adequada das embalagens em grande escala. Os custos associados à responsabilidade ampliada dos fabricantes serão ajustados com base nos níveis de possibilidade de os produtos por eles fabricados serem reciclados. Está ainda prevista uma avaliação das normas até 2035, para acompanhar os progressos tecnológicos em constante evolução. Certas exceções se aplicam a embalagens destinadas a produtos médicos e alimentos especiais e a produtos perigosos sujeitos a revisão posterior. A fim de promover a criatividade e a originalidade nas embalagens comerciais, inovações não convencionais poderão ser lançadas no mercado por um período de até cinco anos, mediante aviso prévio às autoridades competentes. Os países-membros devem melhorar a infraestrutura de coleta e separação para assegurar a sustentabilidade das novas embalagens passíveis de reciclagem.

O artigo 7º estipula a necessidade de usar materiais reciclados em embalagens plásticas como uma medida crucial para a transição para uma economia circular. Isso contribui para a redução e dependência de matéria-prima e, sendo assim, promove a recuperação de resíduos plásticos após o consumo. A partir de 1º de janeiro de 2030, todas as embalagens plásticas à venda deverão incorporar uma quantia mínima de material reciclado, dependente do tipo e uso da embalagem. As embalagens de PET destinadas ao contato direto com alimentos deverão conter no mínimo 30% de material reciclado, com exceção das garrafas plásticas utilizadas para bebidas sem custo. Para as embalagens compostas por diferentes tipos de plásticos que também entram em contato com alimentos, exige-se a incorporação de pelo menos 10% de material reciclado. Já as garrafas plásticas, de modo geral, devem conter no mínimo 30% de conteúdo reciclado em sua composição. Por fim, para as demais embalagens plásticas que não se enquadraram

nessas categorias específicas, o percentual mínimo obrigatório é de 35% de material reciclado.

As taxas serão gradualmente aumentadas até 2040. Nesse ano, os mínimos serão elevados para 50% para embalagens sensíveis ao contato em PET, 25% para outras embalagens plásticas sensíveis ao contato e 65% para outras embalagens plásticas. Com isso, é preciso assegurar a origem rastreável do material reciclado com qualidade, a lei exige que a matéria-prima secundária seja proveniente da coleta de resíduos plásticos pós-consumo na União Europeia ou em países que seguem normas rigorosas para coleta seletiva para reciclagem. A recuperação deve ocorrer em instalações que sigam as diretrizes ambientais da União Europeia para garantir padrões adequados em segurança ambiental. No entanto, existem certas categorias de embalagens que são consideradas muito rigorosas, como as designadas para medicamentos e dispositivos médicos, comida para bebês, produtos específicos para uso medicinal e embalagens biodegradáveis. Da mesma forma, as embalagens plásticas que possam representar riscos à saúde humana em razão da incorporação de material reciclado, bem como as partes plásticas que representem menos de 5% do peso total da unidade de embalagem, são excluídas do âmbito de aplicação das exigências. Os fabricantes e importadores serão responsáveis por garantir que as embalagens atendam a esses critérios, e deverão demonstrar a conformidade por meio de documentação técnica detalhada de acordo com o Apêndice VII do regulamento. Para incentivar o cumprimento das metas estabelecidas, será possível ajustar os custos da responsabilidade ampliada do produtor com base na quantidade de material reciclado nas embalagens utilizadas, para tornar mais atrativo economicamente o uso de matéria-prima secundária.

2.4 Quantidade de resíduos gerados em sua produção

O volume de resíduos produzido durante a fabricação de embalagens varia consideravelmente dependendo do tipo de material e do processo de produção utilizado. Um estudo realizado em uma empresa no estado do Paraná, Brasil, que fabrica embalagens plásticas por termoformagem, revelou que o desperdício de material cortado atinge, em média, 44,13% do total utilizado. Especificamente para produtos como potes feitos de PP, o índice de resíduos chega a 53,01%, enquanto as tampas de poliestireno (PS) apresentam um registro aproximado de 30,86% (Rosa, 2020). Essas diferenças estão relacionadas a elementos como o design e as dimensões das embalagens, que afetam a eficiência na utilização da matéria-prima.

A fabricação de embalagens metálicas, como latas feitas de alumínio e ferro, produz tanto resíduos sólidos quanto líquidos ao longo de todo o processo industrial. Esses subprodutos englobam restos de materiais metálicos, itens que não atendem às especificações e resíduos resultantes de fragmentos das etapas finais do trabalho. A quantidade precisa desses resíduos pode variar dependendo do tipo de metal utilizado, mas, em média, resulta em cerca de 27% do total produzido, considerando desde o desenvolvimento da embalagem até a eficiência dos procedimentos fabricados (Rosa, 2020). Por exemplo, um estudo realizado em uma companhia produtora de embalagens metálicas investigou o manejo de resíduos sólidos e líquidos para avaliar os benefícios econômicos e ambientais de sua disposição, chegando a esse índice percentual (Barão, 2011).

2.5 Avaliação do ciclo de vida segundo as normas ISO 14040 e 14044

A norma ISO 14040:2006 publicada, estabelece os princípios e requisitos para a ACV. Esta norma define as diretrizes para avaliar os impactos ambientais de um produto, processo ou serviço, abrangendo todas as etapas do seu ciclo de vida, desde a extração e processamento das matérias-primas até ao destino final dos resíduos, abordagem frequentemente designada por “do berço ao túmulo”. A ISO 14040 estrutura o ACV em quatro fases principais: definição do objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação dos impactos e interpretação dos resultados. Esse método padronizado possibilita uma abordagem sistemática e científica, garantindo transparência e comparabilidade entre estudos ambientais, além de apoiar uma tomada de decisões estratégicas para empresas e formuladores de projetos.

A norma ISO 14044: 2006 amplia os princípios, requisitos e diretrizes para a realização da ACV, sendo uma referência essencial para a avaliação ambiental de produtos e processos, pois define de forma detalhada as etapas da Análise do Ciclo de Vida, incluindo a definição do objetivo e escopo, a análise do inventário, a avaliação de impactos e a interpretação dos resultados. Seu principal objetivo é garantir transparência, reprodutibilidade e comparabilidade entre estudos, promovendo a tomada de decisões mais sustentáveis na indústria e em políticas ambientais.

Além disso, a norma ISO 14044:2006 destaca a importância de seguir critérios científicos rigorosos na condução da ACV, estabelecendo orientações sobre a distribuição das cargas ambientais, o tratamento das incertezas e o uso adequado de dados primários e secundários. Esta norma também requer que os estudos de ACV sejam realizados de

maneira imparcial, incluindo uma análise crítica para assegurar sua validade. Cumprir esses requisitos é essencial para garantir a confiabilidade das avaliações ambientais. Isso permite que empresas e pesquisadores fundamentem suas estratégias de sustentabilidade de forma consistente e confiável.

A norma ISO 14045: 2012 oferece orientações sobre como avaliar a ecoeficiência de produtos e sistemas durante todo o seu ciclo de vida ao considerar fatores ambientais e econômicos de desempenho de forma integrada. Esta Norma, complementar às anteriores, apresenta uma metodologia estruturada para comparar opções alternativas e identificar oportunidades de melhorias com base na ótica do ciclo de vida dos produtos e sistemas em questão. A análise conforme estabelecida pela normativa ISO 14045 capacita as organizações para avaliar seus processos produtivos visando otimização dos mesmos com focos em práticas sustentáveis.

A norma ISO 14046:2014 estabelece os fundamentos, requisitos e orientações para a avaliação da pegada hídrica de produtos, processos e organizações por meio da ACV. Essas diretrizes permitem mensurar o consumo de água e os impactos ambientais associados, considerando fatores como a escassez hídrica e a preservação da qualidade da água. A adoção dessa norma é essencial para empresas e indústrias que buscam aprimorar a gestão de recursos hídricos e reduzir os impactos ambientais, promovendo transparência e sustentabilidade na divulgação de resultados (ISO, 2014).

A Figura 1 ilustra as inter-relações entre as principais normas da família ISO 14040, evidenciando como a ISO 14040 atua como base metodológica geral da Avaliação do Ciclo de Vida, enquanto a ISO 14044 define os requisitos e diretrizes complementares. A ISO 14045 aborda aspectos de sustentabilidade e avaliação de impacto, e a ISO 14046 expande a aplicação da ACV para a análise da pegada hídrica e gestão de recursos. Juntas, essas normas compõem um sistema normativo integrado, que assegura consistência e padronização nas práticas de avaliação ambiental.



Figura 1 Inter-relações entre as normas. Fonte: NAPKIN.IA

2.6 Aplicações da ACV em embalagens e estudos correlatos

A ACV surgiu nos Estados Unidos em 1969, quando a Coca-Cola encomendou ao MRI um estudo para avaliar o impacto ambiental de diferentes tipos de embalagens de bebidas. Esse estudo pioneiro foi um marco, pois demonstrou que as garrafas de plástico não eram necessariamente mais prejudiciais ao meio ambiente do que as de vidro, contribuindo para desmistificar a percepção negativa em relação aos plásticos (Guiné et al., 2011; Hunt & Franklin, 1996). Posteriormente, em 1972, a USEPA contratou novamente o MRI para realizar uma análise comparativa de embalagens de cerveja e sumos, considerada à época o estudo mais abrangente e metodologicamente estruturado do setor. Esse trabalho envolveu diversos segmentos industriais e estabeleceu as bases conceituais e metodológicas da Avaliação do Ciclo de Vida moderna, tal como é reconhecida atualmente (Guiné et al., 2011; Reed, 2012).

Avaliação do Ciclo de Vida ganhou destaque em 1984 com a divulgação do estudo em “Balanço Ecológico de Materiais de Embalagem”, conduzido pelo Laboratório

Federal Suíço para Testes e Pesquisas de Materiais (EMPA). Esse estudo introduziu métodos para padronizar e agregar emissões ambientais e apresentar conceitos como “volume crítico de ar” e “volume crítico de água”. Essas abordagens foram aprimoradas posteriormente no relatório intitulado “Metodologia dos Ecobalancos”, que propôs o uso dos ecopontos como medida integrada para avaliar os impactos ambientais. Ao mesmo tempo em que isso ocorria na Suíça a Holanda também desenvolviam abordagens semelhantes.

Desde 1990 ocorreu um aumento notável das práticas de Avaliação do Ciclo de Vida na Europa e nos Estados Unidos impulsionado por iniciativas promovidas pela *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC), solidificando essa abordagem como um recurso fundamental para a preservação ambiental. Na avaliação ambiental sistemática de um produto ou serviço ao longo de toda sua trajetória desde sua origem até seu descarte final, incluindo reciclagem, que são consideradas as entradas, despesas ao ciclo de vida desses produtos ou serviços sendo denominado esse processo como ACV. Este método “do berço ao túmulo”, também chamado de “from cradle to grave”, consiste em identificar e medir as emissões de gases poluentes e o uso de recursos em todas as etapas do processo a fim de avaliar os impactos ambientais e sociais na saúde humana.

O ACV é amplamente empregado em diferentes aspectos do dia a dia e no mundo dos negócios, como no desenvolvimento de produtos, estratégias empresariais e marketing ambiental. Uma das vantagens notáveis dessa técnica está na capacidade de rastrear os impactos ambientais nos diferentes meios como o solo, ar e água, ao longo das várias etapas do ciclo de vida de um produto. Por exemplo, um produto pode aparentar ser mais sustentável por utilizar uma menor quantidade de matéria-prima em sua fabricação. No entanto, é essencial analisar todo o ciclo de produção de forma minuciosa, para verificar se essa redução realmente resulta em menor impacto ambiental. Caso contrário, há o risco de se incorrer em “greenwashing”, isto é, na prática de divulgar uma falsa imagem de sustentabilidade. Uma análise detalhada do ciclo completo pode revelar impactos mais prejudiciais, como alto consumo de água ou a produção de químicos durante a produção. Essas avaliações abrangentes evitam decisões baseadas em visões simplistas, encorajando escolhas responsáveis e eficazes para a sustentabilidade ambiental. De acordo com o Ministério da Ciência e Tecnologia e Inovação.

Apesar dos seus pontos positivos, a ACV possui algumas restrições importantes a serem consideradas. Para iniciar o processo é necessário coletar dados complexos que

demandam tempo significativo, além do requerimento financeiro para análise detalhada. Estabelecido isso, a ACV não considerará diretamente fatores cruciais como custos econômicos ou a efetividade técnica dos produtos, servindo apenas como um instrumento auxiliar nas decisões. A integração dos resultados obtidos com outros critérios como viabilidade financeira ou eficiência operacional se faz necessária para assegurar escolhas mais equilibradas e sustentáveis (Marçal Kuchiniski, 2012).

2.7 Processo do Azeite

A produção do azeite tem início no olival, onde as azeitonas são cultivadas segundo diferentes tipos de sistemas agrícolas integrado, convencional ou biológico, variando conforme os métodos e objetivos de manejo adotados. Na agricultura integrada, busca-se equilibrar produtividade e sustentabilidade, minimizando os impactos ambientais. A produção convencional, por sua vez, prioriza o aumento do rendimento e do lucro, muitas vezes sem considerar de forma adequada os efeitos negativos sobre o meio ambiente. Já a agricultura biológica fundamenta-se em métodos naturais de cultivo, que preservam a fertilidade do solo e a biodiversidade (Moura, 2019).

Após a colheita das azeitonas, tem início o processo de extração do azeite no lagar. Nessa etapa, o fruto passa por limpeza, pesagem e esmagamento, originando uma pasta de azeitona, que posteriormente é batida e aquecida para facilitar a separação das fases oleosa e não oleosa. Em seguida, o azeite é lavado, pesado e armazenado, conforme ilustrado na Figura 2, que apresenta o fluxograma geral do processo de produção do azeite, desde a apanha até o armazenamento final.

O método de extração pode ocorrer em sistemas de três fases que produzem azeite, bagaço e águas-ruças ou em sistemas de duas fases, que geram azeite e bagaço húmido. O sistema tradicional de três fases requer maior volume de água, resultando na formação de efluentes líquidos que necessitam de tratamento posterior. Em contrapartida, o sistema de duas fases reduz o consumo hídrico, mas aumenta a produção de bagaço húmido, o que dificulta sua valorização industrial (Cunha, 2014).

O azeite extraído é, então, armazenado e embalado em diferentes tipos de recipientes, etapa que encerra o ciclo produtivo e influencia diretamente os impactos ambientais associados ao seu ciclo de vida.

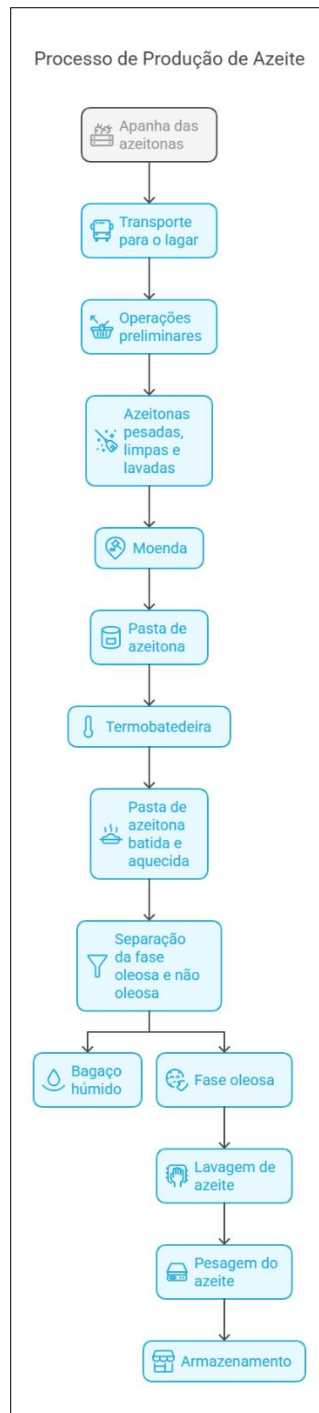


Figura 2: Processo do Azeite.Fonte: Moura, 2019.

2.8 Ciclo de vida do azeite

O ciclo de vida do azeite inicia-se no cultivo das oliveiras e estende-se até o descarte ou reaproveitamento de suas embalagens. Na fase inicial de produção, há um cuidado especial com o manejo e a fertilização das oliveiras, seguido pela colheita dos frutos, que marca o início dos processos de transformação. Durante a etapa de extração,

as azeitonas passam por procedimentos específicos, como moagem, termobatedura e centrifugação, resultando na separação da fase oleosa da fase não oleosa.

Após a extração, o azeite é direcionado para a etapa de embalagem e distribuição, podendo ser comercializado diretamente nos lagares ou encaminhado a supermercados e estabelecimentos comerciais (Cunha, 2014). Quando o produto chega ao consumidor, inicia-se a fase de utilização, na qual o azeite é amplamente empregado na culinária — tanto como condimento quanto como ingrediente essencial na preparação de diversos pratos.

Por fim, o ciclo encerra-se com a coleta e o destino final das embalagens, que podem ser descartadas em aterros sanitários ou encaminhadas para reciclagem, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e para uma pegada ecológica mais sustentável. Cada uma dessas etapas é essencial para assegurar a qualidade do produto e minimizar os efeitos ambientais negativos, sendo indispensável a adoção de práticas responsáveis ao longo de todo o ciclo de vida do azeite (Cunha, 2014).

A Figura 3 ilustra de forma esquemática as principais etapas do ciclo de vida do azeite, desde o cultivo das oliveiras até o descarte final da embalagem, evidenciando a interdependência entre os diferentes estágios do processo produtivo e de consumo.



Figura 3 Análise do Ciclo de vida do Azeite. Fonte: NAPKIN, IA.

2.9 Tipos de embalagens para azeite

A embalagem do azeite é fundamental para preservar sua qualidade, protegendo da luz, oxigênio, calor e fatores que podem comprometer suas propriedades sensoriais e nutricionais. Existem inúmeras embalagens de azeite, porém nesta dissertação serão

abordadas as embalagens de vidro, PET, lata e BIB em combinação com embalagens primárias, secundárias e terciárias.

Neste processo foi realizado a classificação das embalagens seguindo a ISO 14040 e ISO 14044. As embalagens de azeite são classificadas em cada uma desempenhando um papel essencial na proteção, distribuição e comercialização do produto. A embalagem primária entra em contato direto com o azeite, garantindo sua conservação e qualidade. Exemplos incluem garrafas de vidro, garrafas PET, latas metálicas e BIB, que devem ser herméticas e resistentes à luz e ao oxigênio para evitar a oxidação. A embalagem secundária agrupa múltiplas unidades primárias, facilitando a distribuição e exposição no varejo. São comuns caixas de papelão, suportes plásticos e bandejas envoltas em filme plástico, que também contribuem para o marketing do produto. Por fim, a embalagem terciária é utilizada no transporte e armazenamento em larga escala, protegendo grandes volumes de embalagens secundárias. Exemplos incluem paletes, caixas de madeira e *containers*, que garantem segurança logística e eficiência na distribuição.

2.9.1 Vidro

O vidro, que é usado há séculos, é um material inerte, sendo um dos mais utilizados em embalagens alimentares. Entre as suas principais vantagens, o vidro mantém o produto interno sem muitas alterações, é impermeável aos gases e possui alta reciclabilidade, sem perda das características originais (Cesar, 2004).

A embalagem do azeite em vidro, geralmente em cor âmbar ou verde, é uma escolha tradicional, garantindo excelente proteção contra a luz, sendo ideal para produtos de alta qualidade, devido ao seu apelo premium e à sua neutralidade em relação ao sabor. A referência para avaliar o peso mínimo das garrafas de vidro costuma ser de 250 ml, correspondendo a 300 g por unidade, devido às propriedades específicas desse material, apresentando uma maior massa do que outras embalagens, tornando seu manuseio mais desafiador (Navarro, 2018).

Estima-se que cerca de um terço das embalagens de vidro poderiam ser aprimoradas por meio da redução do peso. Segundo Navarro (2018), essa variável tem grande importância, uma vez que o uso excessivo de material pode aumentar os impactos ambientais associados à produção, transporte e descarte das embalagens de vidro. Com a redução do peso resultariam efeitos positivos, como a redução do ADP, que pode chegar até 33 a 40% e do AP, que pode ser reduzido em 40%, além de reduções observadas em outras categorias de impacto ambiental. Uma outra forma de reduzir o impacto seria

aumentar a utilização de vidro reciclado na fabricação das garrafas destinadas ao armazenamento de azeite. Os tipos de vidro que são mais adequados para a reciclagem são o verde e o marrom, que podem incluir até 50 % de material reciclado (Alvarez,2012).

2.9.2 PET

As embalagens de PET, um plástico leve e resistente, destacam-se pela praticidade e economia, facilitando o transporte e o consumo rápido, embora ofereçam menor proteção contra luz e oxigênio. Na avaliação da capacidade de reciclagem do PET, observou-se que a qualidade do material reciclado é inferior à do original. Os resultados indicaram que, apesar das limitações, o uso de embalagens PET representa uma alternativa viável para armazenar azeites virgem extra (AVE). No entanto, além da redução do impacto ambiental, é essencial ponderar outros fatores, como a preservação da qualidade do produto, o aumento da sua durabilidade, o cumprimento das regulamentações e a atratividade para os consumidores.

2.9.3 Lata

As chamadas “latas de estanho” e as garrafas metálicas são, na realidade, fabricadas em aço, uma liga composta principalmente por ferro e carbono, obtidos a partir da mineração do minério de ferro. O estanho não é o material estrutural dessas embalagens, mas sim um revestimento protetor aplicado sobre o aço, com o objetivo de evitar a corrosão e preservar o contato seguro com alimentos e bebidas.

A produção do aço envolve várias etapas de refino e adição de elementos de liga, que conferem diferentes propriedades de resistência, ductilidade e durabilidade ao material. No caso específico das garrafas de aço inoxidável, utiliza-se uma liga especial denominada 18/10, composta por ferro, um baixo teor de carbono (inferior a 0,1%), cromo (18%) e níquel (10%). Essa composição garante elevada resistência à corrosão e excelente durabilidade, tornando o aço inoxidável um material amplamente utilizado para o armazenamento seguro de alimentos e bebidas (Guiso, 2016).

2.9.4 Bag-in-Box

A embalagem de BIB é um sistema de acondicionamento composto por um saco flexível de múltiplas camadas, geralmente polietileno ou outros polímeros barreira, ou até mesmo por camadas de folha de alumínio, sendo inserido em uma caixa externa de papelão ou outro material rígido para evitar seu rompimento. Esse design permite a proteção do conteúdo contra oxigenação e contaminação, aumentando sua vida útil.

Trata-se de um material recentemente incorporado em embalagens, é utilizada amplamente para armazenamento e transporte de líquidos como o azeite e vinhos, sumos, comidas infantis, óleos e produtos químicos. Este material de embalagem oferece vantagens como a facilidade de manuseio (Lolis, 2019).

2.10 Avaliação de embalagens

O ciclo de vida comercial das embalagens de azeite compreende diversas etapas, desde a seleção dos materiais até o descarte final, influenciando tanto a preservação da qualidade do produto quanto a sustentabilidade ambiental (Silva e Mantoan, 2024). A Figura 4 apresenta os principais fatores que devem ser considerados na escolha da embalagem ideal para o azeite de oliva, incluindo variáveis relacionadas à qualidade do produto, custos, transporte e facilidade de reciclagem.

A seleção do tipo de embalagem é um dos estágios mais críticos, uma vez que envolve a escolha entre materiais como vidro, PET, lata ou BIB. Essa decisão deve considerar fatores como proteção contra oxidação, impacto ambiental e custos de produção. Embalagens de vidro oferecem maior barreira à luz e ao oxigênio, garantindo melhor conservação do azeite, enquanto as de PET são mais leves e econômicas, ainda que apresentem menor resistência à oxidação (Navarro, 2018).

Na etapa de produção das embalagens, ocorre a extração de matérias-primas e o consumo de energia, sendo que a reciclagem desempenha um papel essencial na redução dos impactos ambientais. Estudos apontam que a incorporação de vidro reciclado no processo produtivo pode reduzir em até 30% a pegada de carbono (Ibrahim, 2022).

Durante o envase e armazenamento, o azeite é cuidadosamente selado e protegido para evitar contaminação e deterioração. A exposição à luz e ao oxigênio pode comprometer suas propriedades sensoriais, reforçando a importância de embalagens adequadas (Delgado, 2013). Já nas fases de distribuição e marketing, o peso e o tipo de embalagem exercem influência direta sobre a logística e as emissões de carbono. As embalagens de PET, por exemplo, reduzem o impacto ambiental do transporte, enquanto o vidro escuro é frequentemente associado a produtos premium, influenciando a percepção do consumidor (Navarro, 2018).

No uso pelo consumidor, a embalagem desempenha papel essencial na proteção do azeite durante o consumo, preservando suas características nutricionais e organolépticas. Finalmente, a etapa de descarte e reaproveitamento deve ser conduzida de forma responsável, a fim de minimizar os impactos ambientais. A reciclagem do vidro, por

exemplo, pode reduzir em até 50% o consumo energético na produção de novas embalagens (ANAR-PLA, 2015). Essas etapas interligadas demonstram que a escolha da embalagem ideal para o azeite depende de um equilíbrio entre fatores técnicos, ambientais e econômicos, conforme ilustrado na Figura 4, que sintetiza as variáveis mais relevantes nesse processo.

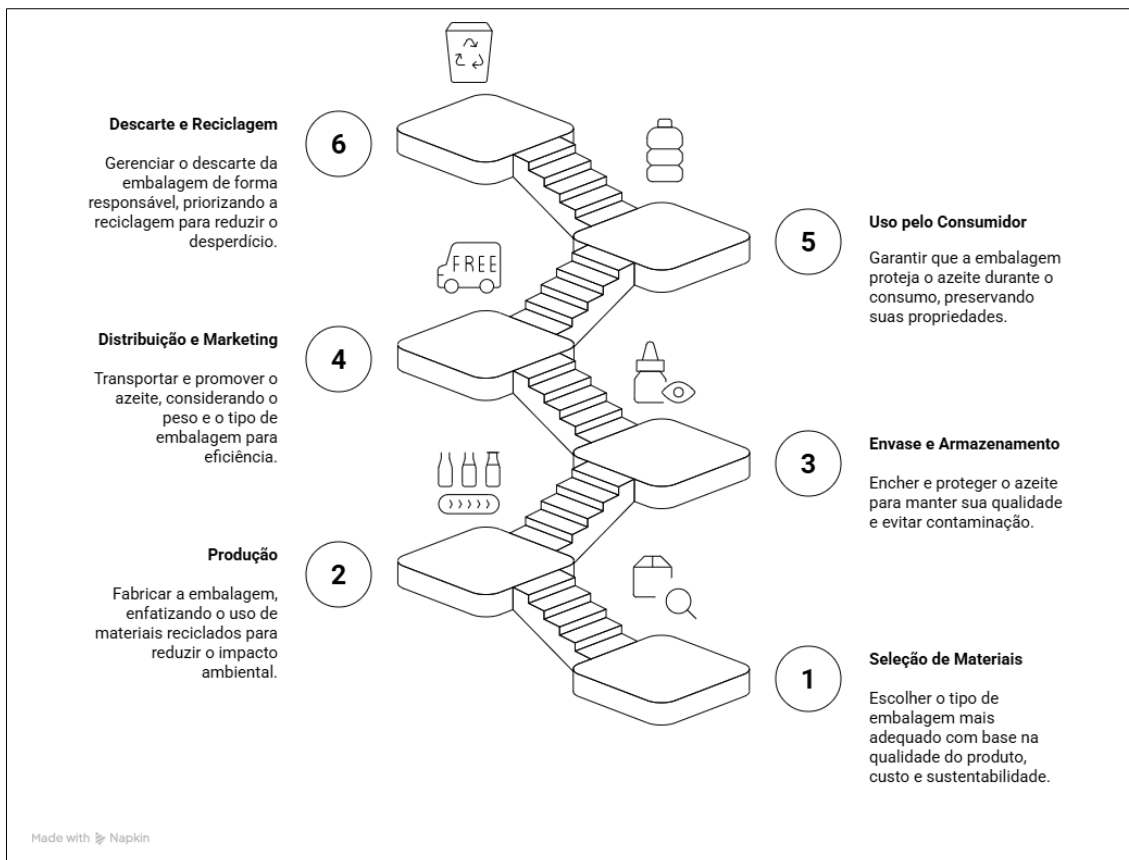


Figura 4: Factores que contribuem para a escolha da embalagem do azeite. Fonte: NAPKIN, IA.

2.11 Impacto ambiental das embalagens

Para selecionar a embalagem ideal para o azeite virgem extra, é fundamental considerar não apenas a proteção do produto, mas também os impactos ambientais associados ao seu ciclo de vida. Cada material apresenta vantagens e limitações que influenciam a sua viabilidade técnica, económica e ecológica.

Com base nas informações analisadas, elaborou-se a Tabela 1, na qual se apresentam os principais critérios comparativos entre os diferentes tipos de embalagens utilizadas para o azeite. Esta tabela reúne indicadores de desempenho ambiental e funcionalidade técnica, permitindo uma análise integrada dos efeitos de cada material sobre a qualidade do produto e a sustentabilidade do sistema de produção.

As colunas incluem variáveis que caracterizam o GWP, expresso em quilogramas de CO₂ equivalente por quilograma de embalagem, e o consumo energético cumulativo, que mede a energia necessária em megajoules por quilograma (MJ/kg) ao longo do ciclo de vida do material. Também são apresentados os impactos sobre o ecossistema, o uso de recursos naturais, e indicadores de reciclabilidade e toxicidade ambiental. Por fim, as colunas “Prós” e “Contras” sintetizam os principais benefícios e limitações de cada tipo de embalagem, integrando aspetos técnicos, económicos e ambientais.

Tabela 1: Avaliação comparativa do impacto ambiental das principais tipologias de embalagens de azeite

Material	Potencial de Aquecimento Global (kg CO ₂ eq.)	Consumo Energético (MJ/kg)	Reciclabilidade (%)	Principais Impactos Ambientais	Vantagens Ambientais	Limitações / Desvantagens	Síntese Ambiental
Vidro	1,6 – 2,9	6 (elevado na fusão e moldagem)	85 – 90	Elevado consumo energético e emissões no transporte e fusão; peso elevado aumenta emissões logísticas.	Alta estabilidade química; reciclável várias vezes sem perda de qualidade.	Peso elevado; alto impacto no transporte; fusão intensiva em energia.	Elevado impacto climático; bom desempenho em reciclagem.
PET	2,3 – 2,5	80 – 120 moderado	85 – 90	Emissões associadas à produção e reprocessamento; risco de libertação de microplásticos e aditivos.	Leve; reduz emissões no transporte; reciclável mecanicamente e quimicamente.	Pode libertar compostos indesejáveis; degrada com luz e temperatura.	Bom desempenho geral; requer gestão eficiente de reciclagem.
Lata	9 – 11	155 – 200 (altíssimo devido à remoção e eletrólise da bauxita).	95	Emissões elevadas na extração e refino da bauxita; possível lixiviação de metais.	Alta reciclabilidade; grande durabilidade; reduz impacto quando reciclado.	Elevado impacto energético na produção primária; risco de contaminação aquática em aterros.	Excelente desempenho se reciclado; alto impacto se primário.
BIB	3 – 5	50 – 70 baixo	<50	Dificuldade de reciclagem devido à composição multicamada; emissões de transporte reduzidas.	Peso reduzido; menor consumo de energia e volume no transporte.	Baixa reciclabilidade; separação complexa de materiais.	Alternativa leve e eficiente, mas limitada na circularidade.

Fonte: Adaptado de Guiso et al. (2017); Fornes & Chatampetayom (2016); European Aluminium Association (2021); Nisticò et al. (2022); Gallego-Schmid et al. (2019); Plastics Europe (2022).

2.11.1 Conceito “Cradle to Cradle” e economia circular

Uma ferramenta relevante nessa abordagem é a avaliação *Cradle to Cradle* (C2C), que, quando aplicada às embalagens de azeite, propõe um sistema sustentável alinhado aos princípios da economia circular. Diferente do modelo linear convencional *Cradle to Grave* (do berço ao túmulo), o C2C assegura que os materiais sejam projetados para serem reutilizados ou reciclados continuamente, sem gerar resíduos adicionais. Esse conceito promove um ciclo fechado, no qual as embalagens são reinseridas no sistema produtivo, minimizando seu impacto ambiental, conforme ilustrado na Figura 5 (Ideia Circular, 2025).

Na avaliação de embalagens de azeite pelo C2C, são considerados critérios como:

- A reciclabilidade dos materiais utilizados;
- O uso de energia renovável durante a produção;
- Os impactos na saúde humana e no meio ambiente;
- As práticas de responsabilidade social adotadas pela empresa fabricante (Ideia Circular, 2025)*.

Essa abordagem holística não apenas incentiva a circularidade, mas também promove a inovação no design de embalagens, contribuindo para um futuro mais sustentável.

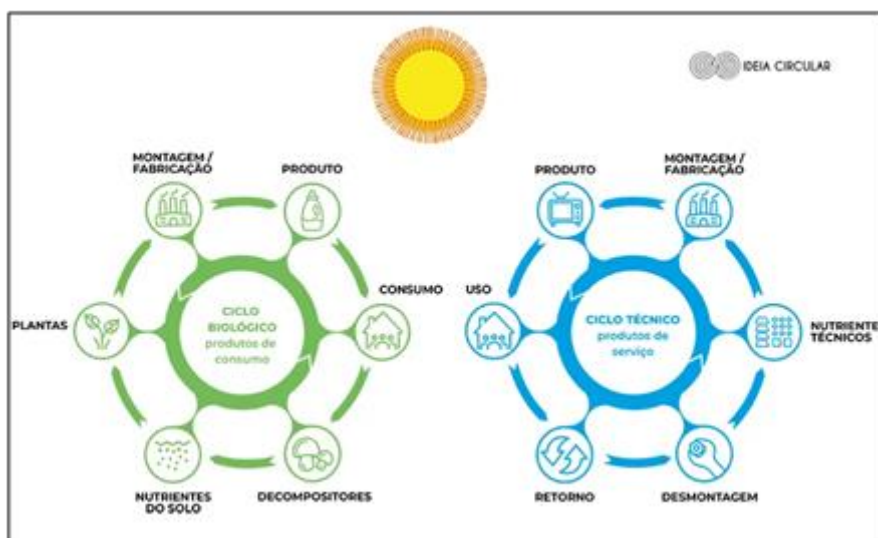


Figura 5 Modelo Cradle to Cradle. Fonte: Ideia Circular

Embalagens de vidro se destacam pela sua alta capacidade de serem recicladas facilmente, podendo ser reaproveitadas sem perder qualidade, o que as tornam uma opção alinhada aos princípios do C2C.

De forma semelhante ao contexto espanhol, em que o *Real Decreto* n.º 895/2013 determina que os azeites servidos em hotéis e restaurantes devem ser apresentados em embalagens invioláveis e devidamente rotuladas, a legislação portuguesa também adota medidas análogas, alinhadas ao UE n.º 29/2012 da Comissão, que define as normas de comercialização do azeite e dos óleos de bagaço de azeitona. Em Portugal, tais disposições são operacionalizadas através de legislação nacional complementar como o Decreto-Lei n.º 152/2017, que estabelece regras sobre materiais e objetos destinados a entrar em contacto com alimentos, e pela Portaria n.º 53/2014, que regulamenta a rotulagem e a apresentação dos azeites no mercado. Essas normas asseguram que as embalagens utilizadas na restauração e hotelaria sejam invioláveis e identificáveis, prevenindo adulterações e garantindo a autenticidade e a rastreabilidade do produto, em consonância com os princípios de segurança alimentar e de proteção ao consumidor previstos no quadro legal europeu. Embora o foco inicial dessa regulação seja a segurança alimentar, pode ser interpretada à luz do princípio C2C, que propõem um ciclo sustentável de materiais para reduzir os impactos ambientais, no entanto, esse requisito impulsiona o desenvolvimento de alternativas criativas como recipientes retornáveis seguros ou sistemas que envolvem depósito e restituição dos recipientes utilizados. Essas iniciativas estão alinhadas com os princípios da economia circular. A mudança para materiais recicláveis ou biodegradáveis, dentro dessas diretrizes regulamentares, possibilita atender aos padrões exigidos em termos de qualidade e segurança, sem comprometer os aspectos ligados à sustentabilidade, favorecendo assim um modelo mais eficiente e regenerativo no design das embalagens conforme promovido pela visão C2C.

O uso de embalagens de azeite feitas parcialmente com PET reciclado é um exemplo prático do conceito C2C que preconiza a criação de ciclos de vida fechados para os materiais, visando sua contínua reintegração sem perda de qualidade. Dentro desse cenário específico, a UE relativa às embalagens e aos resíduos de embalagens visa aumentar a incorporação de materiais reciclados e promover a economia circular, alinhando-se aos princípios do C2C ao incentivar o uso de R-PET e a redução da dependência de matéria-prima virgem. No entanto, reciclar PET ainda enfrenta desafios, como a contaminação do material que pode afetar a pureza do produto reciclado e

prejudica o ciclo fechado. O objetivo de regulação é melhorar as tecnologias de reciclagem, inclusive a reciclagem química, para garantir que o plástico reciclado de boa qualidade seja reintegrado ao ciclo de produção de forma eficiente (Bakker, Wever, Teoh, & De Clercq, 2009).

As latas de alumínio para acondicionamento de azeite permitem a aplicação do princípio C2C, que promove o uso de materiais em ciclos fechados para permitir sua contínua reutilização, sem perda de qualidade. O alumínio é um material ideal para esse conceito devido à sua alta reciclabilidade: quando adequadamente processado, pode ser reintegrado ao ciclo produtivo, sem perder suas propriedades originais, atendendo assim ao princípio fundamental do “zero desperdício”. No entanto, o sucesso deste método está ligado à estrutura destinada à recolha e às tecnologias avançadas que asseguram a qualidade do alumínio reciclado. Além disso, o alumínio traz benefícios para proteger o azeite contra influências externas como luz e oxidação. Adotar embalagens de alumínio reciclado não apenas impulsiona o conceito de economia circular como também ajuda na diminuição do impacto ambiental e na redução da necessidade de utilizar matéria-prima nova, atendendo aos princípios de sustentabilidade do C2C (Niero, Hauschild, Hoffmeyer, & Olsen, 2017).

O BIB consiste em uma bolsa interna produzida com folha de alumínio, plástico e uma caixa externa. Com isso, enfrenta desafios ao aplicar o conceito Cradle to Cradle (Berço ao Berço) pois em sua composição há diferentes dificultando a formação do ciclo fechado eficiente. Niero et al (2017), destaca que sistemas de embalagem que combinam materiais com diferentes características prejudica a sustentabilidade pois exige tecnologias avançadas para reciclá-las. Dessa forma para que as embalagens BIB segue o conceito C2C seria necessário melhorar o processo reciclável. Neste contexto deve promover-se uma integração mais eficiente entre os materiais para facilitar o desenvolvimento de um sistema sustentável baseado na economia circular.

A EC tem ganhado destaque mundial desde que passou a ser adotada por autoridades na China e na União Europeia como uma estratégia-chave para mitigar impactos ambientais e promover a gestão sustentável dos recursos naturais. Kirchherr (2017) define a EC como um sistema econômico que substitui o modelo linear “extrair–produzir–descartar” por uma abordagem regenerativa, sustentada na redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia. Exemplos desse avanço incluem a incorporação da EC no plano quinquenal da China a partir de 2006 e o lançamento, pela União Europeia, do “Pacote de Economia Circular” em 2015, que

estabeleceu metas ambiciosas para diminuir a produção de resíduos e ampliar as taxas de reciclagem (European Commission, 2015; Yuan, Bi e Moriguichi, 2006).

Tais iniciativas evidenciam o papel crescente da EC como uma abordagem fundamental para enfrentar desafios ambientais e econômicos, impulsionando a transição para um modelo de desenvolvimento mais sustentável. A EC representa uma abordagem inovadora que procura dissociar o crescimento económico do consumo excessivo de recursos naturais, promovendo sistemas produtivos regenerativos e sustentáveis. Inspirada nos ciclos naturais, onde os materiais fluem de maneira eficiente como nutrientes biológicos ou técnicos, a EC elimina o conceito tradicional de resíduos, favorecendo a reutilização, a reparação e a reintegração de produtos em ciclos produtivos contínuos. Esse modelo valoriza processos industriais otimizados, minimiza impactos ambientais e incentiva o desenvolvimento de novos modelos de negócios alinhados à sustentabilidade (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Em contraste com o modelo linear tradicional de "extrair-produzir-descartar", a Economia Circular surge como uma alternativa eficiente para reduzir o desperdício e combater a poluição ambiental de forma sistêmica. Como mencionado anteriormente, a EC tem ganhado adesão global, especialmente por parte de governos, empresas e organizações, que reconhecem seu potencial para criar um futuro mais resiliente e equilibrado. Nesse contexto, ferramentas como o *The Packaging Evaluation Guide* (2023) reforçam a importância de práticas circulares, orientando stakeholders a adotar estratégias que priorizem a utilização inteligente e sustentável dos recursos, em linha com os princípios da EC.

3 MATERIAIS E METODOS

Essas práticas destacam a relevância da recuperação de materiais para reduzir os efeitos ambientais associados à fabricação e eliminação de recipientes de vidro (Cesar, 2004).

Este capítulo inicia-se com a apresentação da área de estudo, seguida da descrição detalhada da metodologia aplicada ao desenvolvimento da análise. São abordados os principais elementos que compõem a ACV, nomeadamente o software de apoio utilizado, o método de avaliação adotado, a UF, a fronteira do sistema e os critérios de alocação.

Complementarmente, apresenta-se o ICV, que reúne os fluxos de entrada e saída relevantes para cada sistema de embalagem analisado, e são identificadas as categorias de impacte ambiental consideradas neste estudo.

A avaliação foi conduzida com base no método ReCiPe 2016, amplamente reconhecido na literatura por sua robustez e capacidade de quantificar os impactes potenciais em diferentes categorias de *midpoint*. Este método permite converter os dados do inventário em indicadores ambientais comparáveis, cobrindo uma ampla gama de efeitos sobre o ambiente, os recursos e a saúde humana.

As categorias de impacte ambiental analisadas neste estudo incluem:

- Potencial de Aquecimento Global (Climate Change, default, excl. biogenic carbon [kg CO₂ eq.]) – avalia a contribuição para o aquecimento global decorrente das emissões de gases com efeito de estufa;
- Formação de Material Particulado Finas (Fine Particulate Matter Formation [kg PM_{2,5} eq.]) – mede a formação de partículas finas na atmosfera, associadas a riscos para a saúde humana;
- Consumo de Água Doce (Freshwater Consumption [m³]) – quantifica o volume de água doce utilizado ao longo do ciclo de vida do produto;
- Ecotoxicidade em Água Doce (Freshwater Ecotoxicity [kg 1,4-DB eq.]) – avalia os efeitos tóxicos potenciais de substâncias químicas em ecossistemas aquáticos;
- Toxicidade Humana Não Carcinogénica (Human Toxicity, non-cancer [kg 1,4-DB eq.]) – estima os riscos potenciais à saúde humana decorrentes da exposição a substâncias tóxicas não relacionadas ao cancro.

A consideração conjunta desses indicadores permite uma análise integrada dos impactes ambientais potenciais ao longo de todas as etapas do ciclo de vida das

embalagens desde a extração das matérias-primas até ao fim de vida, incluindo as fases de produção, transporte, uso e destinação final.

Esta abordagem abrange os principais fluxos de emissões atmosféricas, consumo de energia e geração de resíduos, possibilitando identificar os processos e materiais com maior contribuição para os impactos observados.

Com base nessa estrutura metodológica, foram definidos os cenários de análise que constituem o objeto deste estudo, permitindo a comparação do desempenho ambiental entre as diferentes tipologias de embalagens de azeite (vidro, PET, lata e BIB). Esta abordagem possibilita ainda detetar oportunidades de melhoria e propor estratégias alinhadas aos princípios da economia circular, contribuindo para a otimização de recursos e redução dos impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida do produto.

3.1 Procedimentos metodológicos: revisão sistemática da literatura

Os procedimentos metodológicos adotados tiveram como finalidade determinar, de forma fundamentada, os parâmetros de análise aplicados no software Gabbi, bem como estabelecer comparações com a literatura científica existente, a fim de construir argumentos sólidos e embasados. Para alcançar esse objetivo, foi adotado um delineamento baseado em revisão sistemática da literatura, conduzida de acordo com as diretrizes do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) (Neal R. Haddaway¹, 2022). Essa estratégia metodológica permitiu identificar, selecionar, avaliar criticamente e sintetizar as evidências mais relevantes relacionada ao tema da tese, garantindo rigor, transparência e reprodutibilidade ao estabelecer-se, assim, uma estratégia de pesquisa bibliográfica.

Segundo Baldam (2020), na versão atual do Biblioshiny, apenas são aceites dados provenientes das bases Web of Science e Scopus, abrangendo publicações referentes a um período de dez anos. Foram utilizados descritores controlados (MeSH/DeCS), em combinação com palavras-chave livres, associadas por operadores booleanos, conforme o exemplo apresentado a seguir:

("life cycle " OR "packaging") AND ("olive oil" OR "LCA")

A estratégia foi ajustada para cada base, respeitando suas especificidades.

Foram incluídos estudos que:

- Apresentavam dados quantitativos ou qualitativos relevantes para a questão de pesquisa;
- Possuíam texto completo disponível;

- Publicações em inglês;

Excluíram-se:

- Revisões narrativas, editoriais e cartas ao editor;
- Estudos duplicados ou com dados insuficientes para extração.

Seguiu-se o roteiro metodológico disponibilizado por Baldam (2020) em seu workshop sobre o uso da ferramenta Biblioshiny a triagem dos resultados foi conduzida em duas etapas complementares. Na primeira, procedeu-se à seleção preliminar por meio da leitura de títulos e resumos, extraíndo para uma pasta e excluindo-se publicações manifestamente irrelevantes para o escopo da investigação. Na segunda etapa, extraiu as informações para o software R Studio para aprofundar a filtragem e sistematizar os dados extraídos. As informações processadas foram exportadas para planilhas do Excel, nas quais se consolidou uma lista inicial de 33 artigos potencialmente pertinentes. A partir desse conjunto, realizou-se um refinamento adicional mediante a aplicação de palavras-chave específicas relacionadas à análise do ciclo de vida de embalagens de azeite, atribuindo-se pontuações conforme o grau de aderência ao tema. Esse procedimento possibilitou a organização minuciosa dos resultados, incluindo títulos, autores e demais dados bibliográficos, constituindo a base estruturada para a etapa subsequente da análise e discussão. Com isso analisou-se 32 artigos que obteve a partir da revisão sistemática.

3.2 Avaliação do ciclo de vida com o software Gabi

Para a realização deste estudo, foi utilizado o software Sphera LCA for Experts (anteriormente designado GaBi, versão Professional), desenvolvido pela empresa alemã Sphera Solutions, anteriormente PE International. Trata-se de uma das ferramentas mais amplamente reconhecidas na área da ACV, permitindo modelar, quantificar e comparar os impactos ambientais associados a produtos, processos e sistemas. O software disponibiliza uma base de dados abrangente e atualizada, compatível com as normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044, o que assegura a consistência e a credibilidade dos resultados obtidos.

No contexto desta tese, o Sphera LCA for Experts foi aplicado para avaliar o desempenho ambiental de embalagens de azeite produzidas com diferentes materiais vidro, PET, lata e BIB. A ferramenta integra dados representativos das etapas de extração de matérias-primas, produção, transporte, uso e fim de vida, garantindo coerência e precisão na análise.

A metodologia adotada baseia-se nas normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044, que definem os princípios, a estrutura e os requisitos para a condução de estudos de ACV. De acordo com a ISO 14040 (2006), a ACV é composta por quatro fases principais e interdependentes, representadas na Figura 6: definição do objetivo e do âmbito, análise de inventário LCI, avaliação de impactos LCIA e interpretação dos resultados.

A definição do objetivo e do âmbito especifica o propósito do estudo, a UF e as fronteiras do sistema; a análise de inventário consiste na recolha e quantificação dos fluxos de entrada e saída, incluindo materiais, energia, emissões e resíduos; a avaliação de impactos converte os dados do inventário em indicadores ambientais, como emissões de gases com efeito de estufa, consumo energético, uso de água e geração de resíduos; e a interpretação dos resultados corresponde à análise crítica dos dados obtidos, identificando pontos críticos e formulando recomendações para a melhoria do desempenho ambiental.

Com base nessa estrutura metodológica, o Sphera LCA for Experts foi utilizado para construir modelos que descrevem o ciclo de vida completo de cada tipo de embalagem (“*cradle to grave*”), quantificar e comparar os impactos ambientais associados a diferentes materiais e configurações, simular cenários alternativos (como substituição de materiais, otimização de processos e incorporação de opções recicláveis ou de base biológica) e avaliar a conformidade ambiental das soluções estudadas com as políticas de sustentabilidade da União Europeia.

Complementarmente, foi considerada a abordagem “Cradle to Cradle” (do berço ao berço), que enfatiza a reciclagem e a circularidade dos materiais, promovendo uma visão sistémica de sustentabilidade. A aplicação do Sphera LCA for Experts neste estudo permite, portanto, avaliar de forma rigorosa os impactos ambientais, energéticos e económicos das diferentes alternativas de embalagens de azeite, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais eficientes e sustentáveis no setor agroalimentar.

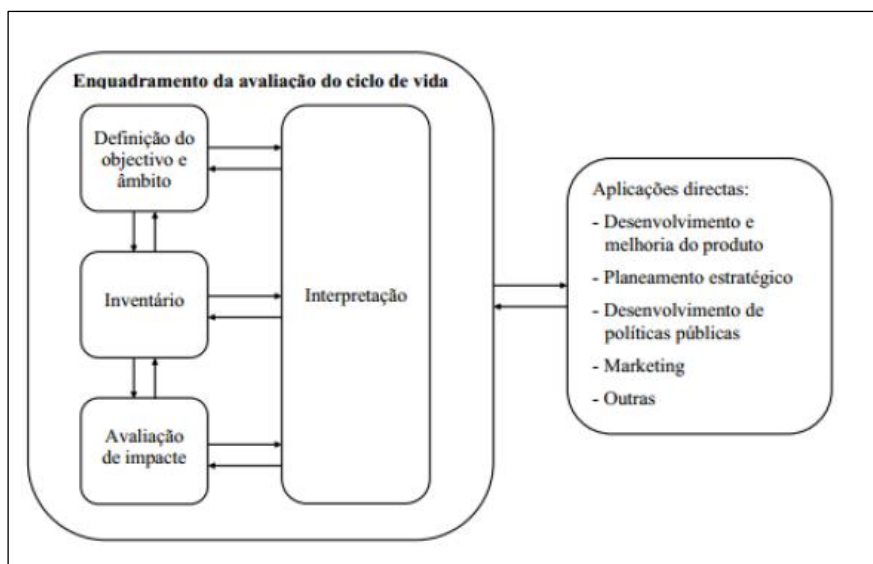


Figura 6: Fases de Uma ACV (Fonte: ISO 14040).

3.3 Fronteira do sistema

3.3.1 Garrafa de vidro

O sistema de fronteira considerado nesta análise refere-se às garrafas de vidro, modeladas no software Sphera LCA for Experts segundo uma sequência metodológica estruturada, representada na Figura 7, que contempla todas as etapas do ciclo de vida do produto, desde a fabricação da garrafa e da tampa, passando pelo engarrafamento e distribuição do azeite, até às fases de consumo, recolha e fim de vida.

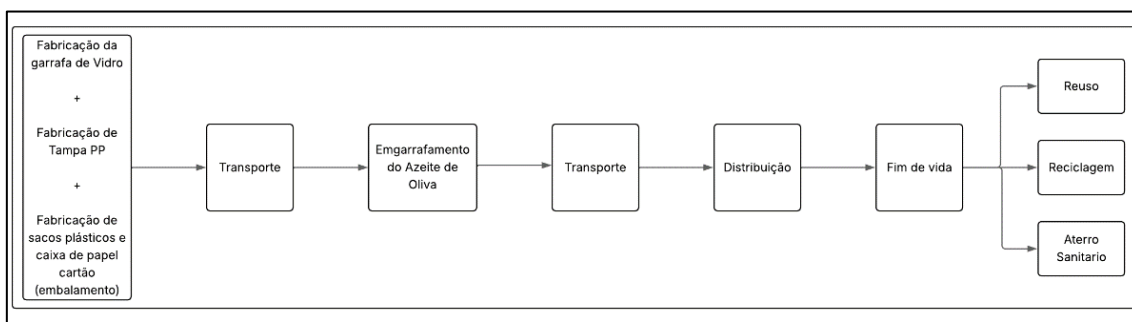


Figura 7: Sistema de Fronteira Garrafa de vidro.

A reutilização de embalagens foi, durante muitos anos, uma prática corrente no setor do azeite, através da esterilização e reenchimento de garrafas. Contudo, esta prática foi progressivamente substituída por sistemas de embalagem invioláveis e não recarregáveis, em conformidade com a legislação portuguesa e com o Regulamento (UE) n.º 29/2012, que estabelece as normas de comercialização do azeite. Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 152-D/2017, de 11 de dezembro, e a Portaria n.º 53/2014, de 3 de março, definem os requisitos aplicáveis aos materiais e objetos destinados a entrar

em contacto com géneros alimentícios, assegurando a segurança, rastreabilidade e autenticidade dos produtos. Essas disposições visam prevenir contaminações e adulterações, garantindo simultaneamente a qualidade do azeite e o cumprimento das metas de sustentabilidade e circularidade estabelecidas pela União Europeia.

A reciclagem constitui uma das estratégias mais relevantes dentro da gestão integrada de resíduos sólidos, e o vidro destaca-se pelo seu elevado potencial de reaproveitamento, devido às suas propriedades físico-químicas estáveis. O processo envolve várias etapas recolha seletiva, triagem, moagem e fusão que permitem a reintegração do material no ciclo produtivo sem perda significativa de qualidade. Esta prática contribui para reduzir a extração de matérias-primas (como areia sílica, calcário e barrilha), diminuir o consumo energético e mitigar impactes ambientais relacionados, nomeadamente a degradação de ecossistemas e a emissão de gases com efeito de estufa. Além disso, o caco de vidro apresenta um ponto de fusão inferior ao das matérias-primas originais, tornando o processo industrial mais eficiente e sustentável (Cesar, s.d.).

Por outro lado, o aterro sanitário constitui o destino final dos resíduos que não são adequadamente segregados ou valorizados. Apesar de o vidro ser considerado um material inerte, a sua deposição em aterros representa uma perda de recurso valioso e contribui para a redução da vida útil dos aterros, além de aumentar os custos operacionais de gestão e disposição final (Nanda & Berruti, 2021).

De forma geral, a definição da fronteira do sistema e dos cenários de fim de vida permite avaliar, de forma integrada, o desempenho ambiental das garrafas de vidro, considerando todo o percurso “do berço ao túmulo”, em conformidade com as normas ISO 14040 e 14044.

3.3.2 Garrafa PET

A análise da fronteira do sistema da garrafa de PET, ilustrada na Figura 8, contempla todas as etapas do seu ciclo de vida, desde a fabricação do polímero e moldagem da embalagem, passando pelo engarrafamento, transporte, distribuição e consumo, até à fase de destinação final. O esquema apresentado sintetiza o percurso do material dentro da ACV, permitindo identificar os fluxos de entrada e saída e as principais alternativas de gestão pós-consumo modeladas no software Sphera LCA for Experts.

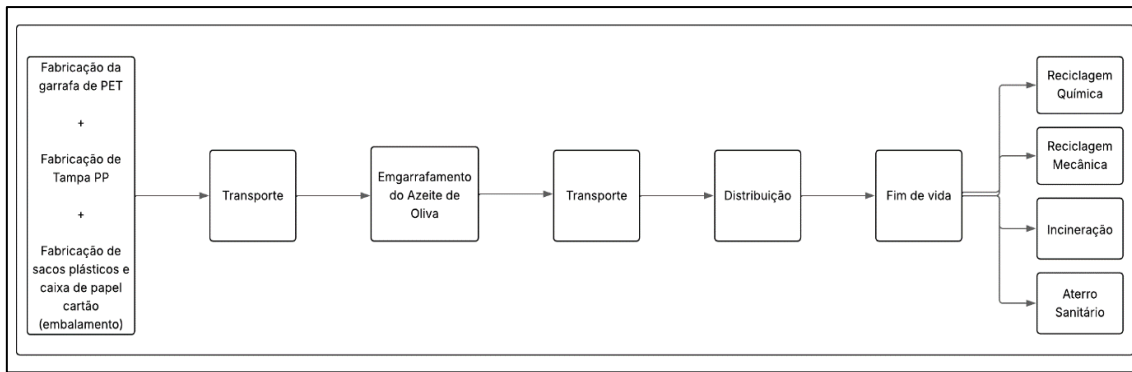


Figura 8: Sistema de Fronteira Garrafa de PET.

Para essa avaliação, foram definidos quatro cenários distintos de gestão pós-consumo: reciclagem química, reciclagem mecânica, incineração com recuperação energética e aterro sanitário.

A reciclagem química consiste na decomposição de polímeros em monómeros ou oligómeros por meio de reagentes químicos, permitindo a obtenção de materiais de maior qualidade em comparação com a reciclagem mecânica. Embora eficiente e alinhada com os princípios do desenvolvimento sustentável, esta abordagem envolve custos operacionais elevados e riscos associados ao manuseamento de substâncias químicas, exigindo tecnologia avançada e escala industrial.

No caso do PET, processos como glicólise, hidrólise, metanólise, amonólise e aminólise permitem recuperar monómeros como TPA, DMT, BHET e EG, que podem ser reutilizados na produção de resinas, poliuretanos, corantes e revestimentos. A glicólise é o método mais amplamente aplicado a nível comercial, especialmente quando a matéria-prima apresenta elevada pureza, enquanto a hidrólise é limitada pela lentidão do processo e pela pureza do TPA obtido. A eficiência da despolimerização depende de fatores como concentração do catalisador, temperatura e tempo de reação. Assim, a reciclagem química contribui para a economia circular, ao permitir a reintegração de resíduos plásticos de alta qualidade na cadeia produtiva, reduzindo a extração de recursos naturais e os impactos ambientais (Ragaert, Delva & Van Geem, 2017).

A reciclagem mecânica envolve etapas como recolha, triagem, lavagem e trituração das embalagens pós-consumo, transformando-as em grânulos de diferentes tamanhos que podem ser reprocessados na fabricação de novos produtos. Este método é amplamente utilizado devido à sua simplicidade operacional e baixo custo ambiental, embora apresente limitações de eficiência quando comparado à reciclagem química. Em 2014, estimava-se que cerca de 8 milhões de toneladas de resíduos plásticos fossem ainda depositadas em aterros na Europa, o que equivale a quase 100 milhões de barris de

petróleo, evidenciando o enorme potencial de reaproveitamento desses materiais (Ragaert et al., 2017).

A incineração com recuperação energética consiste na combustão controlada de resíduos plásticos, aproveitando o seu elevado poder calorífico para gerar energia elétrica ou térmica. Apesar de ser menos favorável do ponto de vista ambiental, o conteúdo energético do PET é comparável ao do óleo de aquecimento, com 443,5 MJ/kg e 42,6 MJ/l, respetivamente (Kumar et al., 2011), o que o torna uma fonte energética secundária de baixo custo. No entanto, este processo gera emissões de dioxinas e outros poluentes tóxicos, exigindo sistemas rigorosos de controlo e monitorização, em conformidade com a Diretiva 2010/75/UE relativa às emissões industriais.

Por fim, o aterro sanitário constitui o destino final para as embalagens que não são corretamente segregadas ou recicladas, comprometendo o potencial de reaproveitamento dos materiais. Esta prática inviabiliza a aplicação dos princípios da economia circular, uma vez que os plásticos permanecem como resíduos inertes, sem possibilidade de recuperação energética ou material. Além de desperdiçar recursos valiosos, o acúmulo de resíduos plásticos em aterros contribui para impactos ambientais e sociais negativos, incluindo ocupação de solos e aumento dos custos de gestão (Kumar, Panda & Singh, 2011).

3.3.3 Lata

A análise da fabricação e do ciclo de vida das latas de alumínio utilizadas para o acondicionamento de azeite foi estruturada em três cenários distintos, de acordo com o modelo apresentado na Figura 9. O esquema da fronteira do sistema ilustra todas as etapas incluídas na ACV, desde a fabricação da lata e da tampa, passando pelo engarrafamento, transporte, distribuição e consumo, até às fases de fim de vida, que incluem reciclagem, incineração e deposição em aterro sanitário. Esse enquadramento permite visualizar o percurso completo do material dentro do sistema analisado, bem como os fluxos de entrada e saída considerados na modelação realizada no software Sphera LCA for Experts.

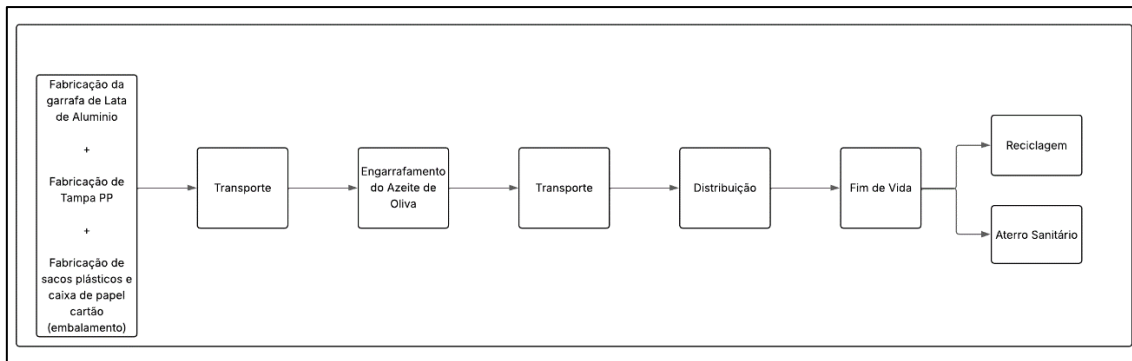


Figura 9: Sistema de Fronteira Lata.

A reciclagem do alumínio permite a eliminação de uma sequência complexa de etapas associadas à extração e transformação da matéria-prima. No processo primário, a produção envolve a mineração e o transporte da bauxita, o refino da alumina e a fabricação de alumínio primário e secundário, atividades que exigem elevado consumo energético e geram resíduos como a lama vermelha. Também estão incluídas operações subsequentes, como fundição, laminação a quente e a frio, extrusão e forjamento.

Em contrapartida, a reciclagem de alumínio concentra-se em etapas mais simples: recolha, triagem específica por ligas, refino e refundição da sucata e elimina grande parte das operações intensivas em energia. Trata-se de um dos materiais com maior taxa de reciclabilidade entre as embalagens metálicas, podendo ser reinserido inúmeras vezes no ciclo produtivo sem perda significativa das suas propriedades físico-químicas. Além disso, apresenta elevada eficiência energética, consumindo cerca de 5% da energia necessária à produção primária a partir da bauxita, o que resulta em redução expressiva das emissões de gases com efeito de estufa e dos resíduos provenientes da atividade mineradora (Raabe et al., 2022).

O aterro sanitário, por outro lado, representa uma das rotas menos sustentáveis de gestão de resíduos. O alumínio é um material de elevado valor económico e energético, cuja deposição em aterros constitui um desperdício irreversível de recursos. A degradação desse metal ocorre de forma extremamente lenta, podendo demorar séculos para se decompor, devido às condições de baixa oxigenação e elevada humidade presentes nesses ambientes. Além disso, a presença de alumínio contribui para aumentar o volume de resíduos sólidos urbanos e pressão sobre a capacidade de disposição final (Michela, n.d.).

3.3.4 Bag-in-Box

A embalagem do tipo BIB, reconhecida como uma solução inovadora para o acondicionamento e preservação de alimentos líquidos, como o azeite, apresenta uma

estrutura multicamada composta por alumínio, PET (polietileno tereftalato), nylon (poliamida) e polietileno de alta densidade (PEAD). Essa combinação proporciona elevada barreira contra luz, oxigênio e humidade, além de resistência mecânica, fatores que contribuem para a maior durabilidade do produto.

A Figura 10 apresenta o sistema de fronteira modelado para a embalagem *BIB*, que contempla todas as etapas do ciclo de vida desde a fabricação das camadas constituintes e da tampa, passando pelo engarrafamento, transporte e distribuição, até às fases de fim de vida, representadas pelos cenários de reciclagem e aterro sanitário. O esquema ilustra a estrutura conceptual da ACV aplicada a este tipo de embalagem, permitindo compreender o fluxo de materiais e os pontos críticos do sistema.

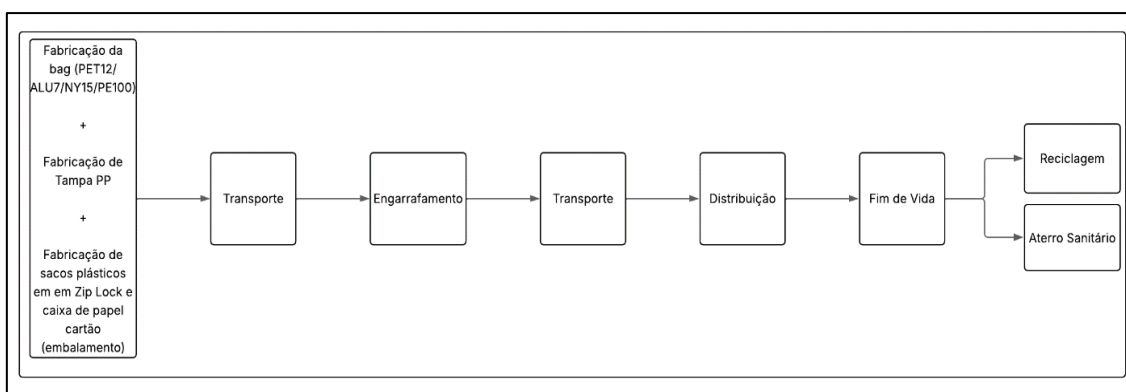


Figura 10: Sistema de Fronteira BIB

No que se refere ao seu fim de vida, foram projetados dois cenários principais de descarte; contudo, a modelação computacional não foi executada devido à ausência de dados precisos sobre a composição fornecida pela empresa consultada e à escassez de informações disponíveis na literatura científica. Assim, a modelação no software Sphera LCA for Experts (anteriormente *GaBi*) não foi realizada, de modo a não comprometer a integridade e a consistência do estudo.

A reciclagem, embora ambientalmente mais desejável, apresenta baixa viabilidade técnica para este tipo de embalagem, dada a complexidade da sua estrutura multicamada. A presença simultânea de polímeros e metais dificulta a separação e recuperação eficiente dos materiais, reduzindo significativamente a taxa real de reciclabilidade (Ferrara & De Feo, 2020).

Como consequência, muitas embalagens BIB acabam destinadas a aterros sanitários, uma prática considerada ambientalmente inadequada, uma vez que implica a perda de recursos de alto valor agregado e aumento do passivo ambiental associado à disposição final de resíduos sólidos. Além disso, o descarte em aterro pode originar

lixiviação de substâncias químicas, com potencial contaminação de solos e águas subterrâneas, o que torna esta uma solução apenas temporária no contexto da gestão de resíduos plásticos pós-consumo (Pincelli, Castilhos Júnior, Matias & Rutkowski, 2021).

Dados sobre a gestão de resíduos de embalagens incluindo as frações encaminhadas para aterro, reciclagem e incineração reforçam a necessidade de aperfeiçoamento dos sistemas de recolha e triagem, especialmente no caso de materiais compostos, que ainda apresentam limitações significativas para reciclagem e valorização energética.

Dados de Resíduos de embalagens tanto para aterro, reciclagem e incineração como exemplo:

3.4 Unidade funcional

De forma a auxiliar a interpretação dos resultados e a permitir a comparação com outros estudos, definiu-se como unidade UF a embalagem necessária para acondicionar 0,1 litro de azeite, considerando todas as etapas do ciclo de vida do produto, desde a produção das matérias-primas até ao fim de vida.

Foram consideradas as principais tipologias de embalagens atualmente utilizadas para o acondicionamento de azeite: vidro, PET, lata e BIB. Para cada tipo de embalagem, foram avaliadas as origens geográficas de fornecimento, os custos unitários e as distâncias médias de transporte até à cidade de Bragança (Portugal), de modo a estimar os impactos ambientais e económicos associados à logística de transporte.

As embalagens de vidro e de PET são produzidas na região da Andaluzia (Espanha) e transportadas por via terrestre ao longo de aproximadamente 639 km. O custo médio por unidade de 100 ml é estimado em € 0,14 para o vidro e € 0,017 para o PET. As latas de alumínio têm origem na Itália, percorrendo cerca de 2.050 km até Bragança, também por transporte rodoviário, com um custo unitário médio de € 0,58. Por fim, as embalagens do tipo BIB, fabricadas nos Países Baixos, percorrem aproximadamente 1.875 km, apresentando um custo unitário de € 0,034.

A análise destes dados permite compreender de forma detalhada os custos logísticos e os potenciais impactos ambientais decorrentes do transporte de cada tipo de embalagem. Essa abordagem contribui para uma avaliação mais rigorosa do desempenho ambiental e económico do sistema, apoiando a tomada de decisões sustentáveis ao longo do ciclo de vida do produto.

3.5 Análise qualitativa

Escolher a embalagem adequada para azeite virgem extra envolve considerar vários fatores determinantes, como a proteção contra a oxidação, os impactos ambientais e os custos económicos ao longo do ciclo de vida. Após analisar cada opção de embalagem, verifica-se que todas apresentam benefícios e limitações distintas, que devem ser ponderadas de forma integrada para garantir a qualidade do produto e minimizar os impactos ambientais a longo prazo.

A Figura 11 apresenta uma síntese comparativa das principais tipologias de embalagens estudadas vidro, lata, PET e BIB, destacando as suas vantagens e limitações funcionais, ambientais e económicas. O esquema evidencia como cada material oferece diferentes níveis de proteção do azeite contra luz e oxigênio, bem como distintos desempenhos em termos de reciclabilidade, custo e pegada de carbono. Essa visualização facilita a interpretação global dos resultados, permitindo comparar de forma direta o desempenho de cada tipo de embalagem no contexto da sustentabilidade.

Apesar de ser amplamente utilizado e facilmente reciclável, o vidro apresenta elevado consumo energético na fase de produção (Guiso, 2017). No entanto, oferece excelente proteção contra a luz e o oxigênio, contribuindo para a preservação dos compostos fenólicos e demais antioxidantes naturais do azeite.

As embalagens metálicas de alumínio, frequentemente utilizadas sob a forma de latas cromadas, garantem uma barreira total à luz e ao oxigênio, preservando as características organolépticas do azeite (Niero, 2014). Contudo, a produção primária do alumínio implica um consumo energético elevado e impactos ambientais significativos associados à extração da bauxita. Ainda assim, o uso de alumínio reciclado reduz substancialmente o impacto ambiental, sendo considerado uma alternativa sustentável quando existe um sistema de recolha e reciclagem eficiente.

As embalagens plásticas em PET distinguem-se pelo baixo custo, leveza e facilidade de transporte, o que as torna bastante comuns no setor. Além disso, possuem propriedades barreira específicas como camadas protetoras e aditivos antioxidantes que ajudam a reduzir a permeabilidade ao oxigênio e à luz, mantendo a estabilidade química e sensorial do azeite. No entanto, estudos apontam que o PET pode libertar compostos indesejáveis ao longo do tempo, especialmente sob condições de temperatura elevada ou armazenamento prolongado, o que pode afetar a qualidade do produto (Navarro, 2018).

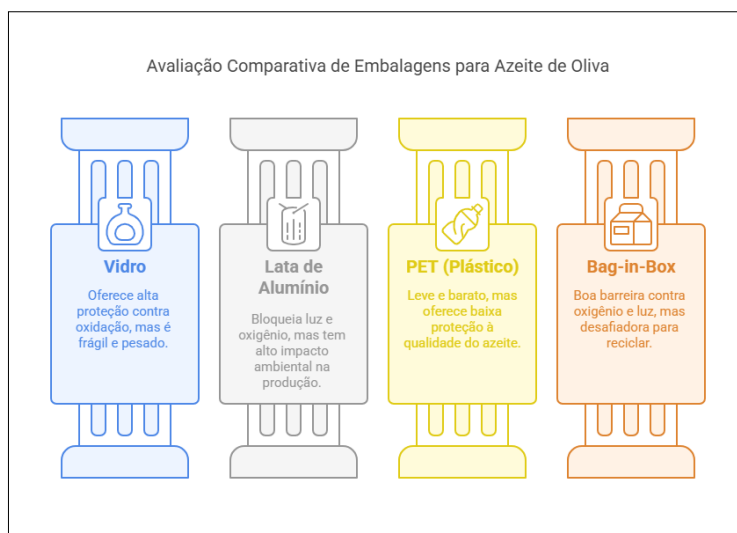


Figura 11 Análise das embalagens. Fonte: NaAPKIN, IA.

3.5.1 Design sustentável para embalagens

A presente secção analisa o modelo de avaliação de reciclabilidade e sustentabilidade de embalagens proposto pela plataforma *The Recycling Partnership*, uma iniciativa internacional que visa promover a economia circular e apoiar a transição para sistemas de embalagem mais sustentáveis. Este modelo, designado como sistema de certificação de embalagens sustentáveis, procura ir além de uma simples ferramenta de análise, assumindo-se como um recurso estratégico para orientar empresas e investigadores na adoção de soluções de design ambientalmente responsáveis.

A avaliação proposta pela plataforma é abrangente e baseia-se em critérios técnicos e ambientais que permitem estimar o grau de reciclabilidade, reutilização e circularidade de diferentes tipos de embalagem. No entanto, para compreender integralmente a sua eficácia e aplicabilidade, é fundamental analisar o funcionamento da plataforma, bem como os dados, pressupostos e indicadores que sustentam a sua abordagem metodológica.

De acordo com um relatório recente da *Recycling Partnership* (2022), essa plataforma oferece aos fabricantes de embalagens uma maneira de avaliar o quão facilmente suas embalagens podem ser recicladas por meio da identificação de pontos positivos e áreas que precisam de melhorias para facilitar o processo de reciclagem. O sistema leva em consideração aspectos técnicos como os materiais utilizados na embalagem, a sua facilidade de separação, e se existe infraestrutura adequada para reciclá-las. Esses dados são analisados junto com informações sobre o mercado atual e tendências de sustentabilidade, para fornecer uma avaliação completa. No entanto, é

fundamental questionar em que medida esses padrões são mantidos atualizados e como o sistema lida com diferenças regionais na infraestrutura de reciclagem que podem dificultar a aplicação generalizada das sugestões. Além de analisar a possibilidade de reciclabilidade dos materiais de embalagem sugeridos pela plataforma, o modelo identifica áreas específicas que necessitam de melhorias e investimentos para que esses materiais se tornem recicláveis, caso ainda não o sejam. Essa função revela-se particularmente útil para promover discussões mais estruturadas entre os diversos atores da cadeia de suprimentos, incentivando a colaboração e o alinhamento de estratégias sustentáveis. No entanto, o seu impacto prático está diretamente relacionado com a vontade desses envolvidos em implementar mudanças que podem ser dispendiosas em muitos casos.

O desempenho da plataforma *The Recycling Partnership* depende fortemente do grau de envolvimento e colaboração dos seus utilizadores, uma vez que a eficácia das suas recomendações resulta da participação ativa dos diferentes agentes da cadeia de valor. É igualmente essencial compreender os princípios que sustentam o modelo de avaliação, nomeadamente os critérios utilizados para estimar o potencial de reciclabilidade e a forma como são ponderados os impactos técnicos, sociais e económicos. Essas considerações são fundamentais para determinar se a ferramenta efetivamente promove mudanças estruturais nos sistemas de produção e consumo, ou se, pelo contrário, se limita a desempenhar um papel simbólico, funcionando como uma estratégia de marketing ambiental com benefícios limitados (The Recycling Partnership, 2022).

O Sistema de Avaliação How2Recycle Label é uma ferramenta flexível e em constante evolução, desenvolvida para acompanhar a expansão dos sistemas de reciclagem em escala global, ao mesmo tempo em que oferece a estabilidade necessária para decisões estratégicas de longo prazo. Ancorado nas realidades locais da indústria, o sistema promove a transição para um futuro mais inovador e sustentável por meio de critérios específicos, denominados “blocos de construção”. Esses critérios avaliam a reciclabilidade das embalagens e definem os requisitos essenciais para que uma embalagem seja considerada reciclável. No entanto, embalagens atuais e inovadoras podem enfrentar desafios para atender imediatamente a essas exigências. Para superar essas barreiras, organizações como The Recycling Partnership estão desenvolvendo mecanismos para reconhecer embalagens que estão em transição rumo à reciclabilidade generalizada. Essa abordagem permite que o setor não apenas avalie o cenário atual, mas

também incentive melhorias contínuas, adaptando-se às mudanças tecnológicas e às demandas do mercado (The Recycling Partnership, 2022).

O Modelo de Avaliação How2Recycle Label concentra-se na " Residential Recyclability", analisando embalagens destinadas a mercados globais, especialmente naqueles onde as infraestruturas de reciclagem estão em expansão. A avaliação considera o desempenho das embalagens após o uso pelos consumidores, incluindo todos os seus componentes, como rótulos, tampas e outros elementos. Para ser considerada reciclável, uma embalagem deve ter mais de 95% de seu peso total composto por materiais recicláveis que atendam a todos os critérios estabelecidos. Além disso, os componentes secundários devem ser compatíveis com o processo de reciclagem e não podem comprometer a reciclabilidade do material principal.

O How2Recycle Label também propõe ações para aprimorar o potencial circular das embalagens, como o redesenho de produtos. Essas iniciativas visam acelerar a transição para uma maior reciclabilidade, adaptando-se às diferentes realidades regionais e globais. Dessa forma, o modelo não apenas avalia a situação atual, mas também promove melhorias contínuas, alinhando-se aos avanços tecnológicos e às demandas do mercado. Ao integrar ferramentas como o banco de dados de reciclagem e os critérios de "blocos de construção", o How2Recycle Label consolida-se como um instrumento estratégico para impulsionar a sustentabilidade e a circularidade no design de embalagens, contribuindo para um futuro mais resiliente e equilibrado.

3.6 Análise Quantitativa

Nesta secção apresenta-se informação sobre as embalagens obtidas no laboratório de AgroBioTecnologia - Azeite da Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Bragança, que serão necessárias para desenvolver a análise do ciclo de vida das embalagens de Vidro, PET, Lata e BIB.



Figura 12 Embalagens de azeite de 100 ml (Vidro, PET, Lata e BIB)

A Tabela 2 apresenta os dados do LCI correspondentes às quatro tipologias de embalagens de azeite avaliadas: vidro, PET, lata e BIB. Os dados foram quantificados a partir da UF definida (0,1 L de azeite embalado) e compreendem as principais entradas como consumo de matérias-primas, energia, água e transporte e saídas emissões atmosféricas, geração de resíduos e indicadores ambientais.

A modelação dos cenários foi desenvolvida no software Sphera LCA, utilizando a GaBi Database como fonte de dados secundários e parâmetros complementares. As informações primárias foram obtidas por meio de questionários e observações, enquanto as referências secundárias derivam de literatura técnica e bases de dados reconhecidas, incluindo EMEP/EEA (2019). A elaboração do inventário seguiu os princípios e diretrizes das normas ISO 14040 e ISO 14044, assegurando a rastreabilidade e consistência metodológica da Avaliação do Ciclo de Vida.

Tabela 2: Principais dados do Inventário do Ciclo de Vida (LCI) das Embalagens de Azeite por UF (UF: 0,1 L de azeite).

Categoria	Parâmetro	Vidro	PET	Lata	Bag-in-Box	Unidade	Fonte de Dados
INPUTS	Massa da embalagem	159,32	20,49	34,23	7,97	g	Dados primários
	Material principal	Vidro reciclado + material primário	PET virgem e R-PET	Alumínio primário + reciclado	Multicamadas (PET/ALU/PPE)	*	
	Energia elétrica / térmica	6,0	2,8	15,0	1,5	MJ/kg	Dados Secundários (ISO 14044)
	Matérias-primas	Areia sílica, calcário, barrilha	PTA + MEG (monômeros)	Bauxita (Al)	Filmes poliméricos, alumínio fino, papel-cartão	*	Literatura (Guiso, 2017; Gallego-Schmid, 2019)
	Transporte médio	639	639	2050	1875	km	Dados Secundários (Informações coletadas no Laboratório)
	Diesel (transporte)	0,12	0,05	0,10	0,03	L	EMEP/EEA (2019b)
	Combustível Fóssil (Consumo dos processos)	0,0212	0,0288	0,0143	*	MJ	
	Consumo de Eletricidade	0,13	0,123	0,0368	*	MJ	
	Consumo de Água	0,402	0,556	40,5	*	m ³	
	OUTPUTS	CO ₂	0,74	0,30	0,28	*	kg
NO _x		0,0018	0,00459	0,0054	*	g	
SO _x		0,0040	0,00314	0,00029	*	g	
Água Residual Gerada		137	1,00035	38,8	*	m ³	
Volume de Resíduo		15,93	2,05	1,71	*	g	
Destino final (cenário fim de vida)		85 reciclagem/ 10 aterro/ 5 reuso	90 reciclagem / 10 aterro	95 reciclagem / 5 aterro	*	%	Dados Secundários Literatura (Guiso, 2017; Gallego-Schmid, 2019)

4. RESULTADOS

Os resultados que serão descritos de forma detalhada correspondem aos indicadores ambientais obtidos para cada cenário de embalagem, considerando as diferentes alternativas de fim de vida (aterro, incineração, reciclagem e reuso). A avaliação foi realizada com base no método *ReCiPe H* em nível de *midpoint*, amplamente reconhecido pela sua capacidade de caracterizar impactos ambientais de forma abrangente e comparável, a partir de dados de LCI.

A adoção deste método fundamentou-se na revisão pelo método PRISMA da literatura, na qual foram analisados artigos científicos processados e sistematizados com apoio do software R-Studio. A análise demonstrou que o *ReCiPe Hierarchical (H)* em *midpoint* representa a abordagem mais consistente e amplamente aplicada em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida de embalagens, sobretudo por contemplar uma ampla gama de categorias de impacto que permitem identificar os principais hotspots ambientais, garantindo maior transparência digital (Haddaway, Page, Pritchard, & McGuinness, 2022).

Essa abordagem comparativa permite compreender os impactos associados às diferentes alternativas de fim de vida das embalagens. Ao realizar essa comparação, é possível identificar até que ponto as variações observadas entre os cenários decorrem não apenas do consumo energético direto, mas também de diferenças estruturais relacionadas ao transporte, engarrafamento, tratamento de resíduos e processos de recuperação de materiais. O método admite a aplicação de duas abordagens: o nível médio, orientado para o problema, com 18 categorias de impacto, e o nível de ponto final, orientado para danos, com três macrocategorias: danos à saúde humana, danos aos ecossistemas e consumo de recursos (Ferrara & De Feo, 2023).

A análise aqui apresentada prioriza a consistência dos resultados e a identificação dos principais pontos críticos (*hotspots*) ao longo do ciclo de vida da embalagem, possibilitando a formulação de estratégias mais eficazes de gestão ambiental.

A interpretação dos gráficos obtidos a partir da modelação dos dados será apresentada na seguinte ordem de embalagem: vidro, PET, Lata e Bag-in-Box, evidenciando os impactos das diferentes alternativas de fim de vida da embalagem de azeite. Em cada cenário, serão analisados os seguintes indicadores ambientais:

- Climate Change, default, excl. biogenic carbon [kg CO₂ eq.] – Potencial de Aquecimento Global;
- Fine Particulate Matter Formation [kg PM_{2.5} eq.] – Formação de Partículas Finas,;

- Freshwater Consumption [m³] – Consumo de Água Doce;
- Freshwater Ecotoxicity [kg 1,4-DB eq.] – Ecotoxicidade em Água Doce;
- Human Toxicity, non-cancer [kg 1,4-DB eq.] – Toxicidade Humana Não Carcinogênica;

A consideração conjunta desses indicadores permitirá não apenas uma análise em termos de emissões de gases de efeito estufa, mas também uma visão abrangente dos efeitos sobre a saúde humana, o uso de recursos naturais e a integridade dos ecossistemas.

4.1 Embalagem de Vidro

A avaliação dos cenários de fim de vida da embalagem de vidro para azeite, abrangendo os processos de reuso, reciclagem e aterro, evidencia diferenças significativas no desempenho ambiental, especialmente no que se refere ao GWP, conforme apresentado na Figura 13.

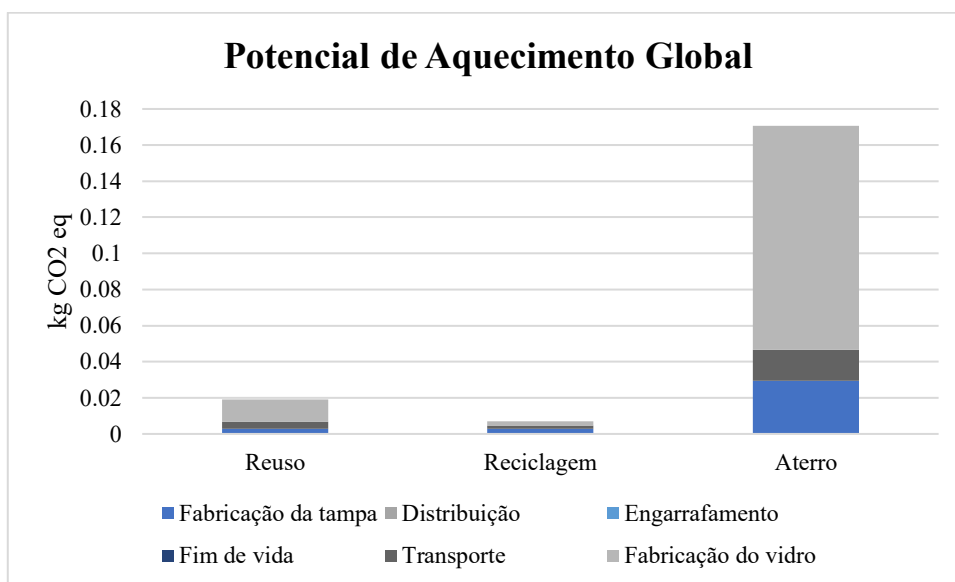


Figura 13: Estimativa do Impacte na categoria GWP dos cenários de fim de vida para embalagem de vidro

No cenário de aterro, observa-se o maior valor absoluto de GWP, configurando-se como a opção ambientalmente menos favorável. Esse resultado decorre principalmente do fato de que o vidro, ao ser destinado ao descarte final, deixa de ser reintegrado ao ciclo produtivo, perdendo seu potencial de substituição de matérias-primas e de contribuição para a economia circular. Além disso, etapas como o transporte até o local de disposição

final e as operações de gestão do aterro geram emissões indiretas de gases de efeito estufa, agravando o impacto total do sistema (Assamoi & Lawryshyn, 2012).

O cenário de reciclagem apresenta um impacto intermediário em termos de GWP. As emissões observadas estão associadas principalmente às etapas de recolha, transporte, triagem e fusão do vidro pós-consumo, que demandam considerável consumo energético. No entanto, a reciclagem proporciona benefícios ambientais indiretos, ao reduzir a extração e o beneficiamento de matérias-primas, o que diminui o consumo energético e a pressão sobre os recursos naturais (Alsheyab, 2021). Assim, mesmo apresentando custos energéticos imediatos, a reciclagem se destaca como uma estratégia essencial de economia circular, promovendo a reintrodução do material na cadeia produtiva e mitigando impactos cumulativos ao longo do tempo.

Por fim, o cenário de reuso destaca-se como o mais favorável do ponto de vista ambiental, apresentando o menor valor de GWP entre as alternativas analisadas. Esse desempenho deve-se à extensão da vida útil das embalagens, reduzindo substancialmente a necessidade de fabricar novas unidades. Dessa forma, são evitadas as emissões associadas às etapas mais intensivas em energia, como a extração de matérias-primas, fusão e moldagem do vidro. Embora o reuso envolva processos adicionais de transporte e esterilização, esses possuem impacto energético relativamente baixo quando comparados à produção primária, resultando em um balanço ambiental positivo. Estudos recentes confirmam que, mesmo considerando as emissões decorrentes da logística reversa, o reuso continua sendo a estratégia mais eficaz na redução das emissões de gases com efeito estufa, especialmente em sistemas com alta taxa de retorno e processos de limpeza otimizados (Kim et al., 2023).

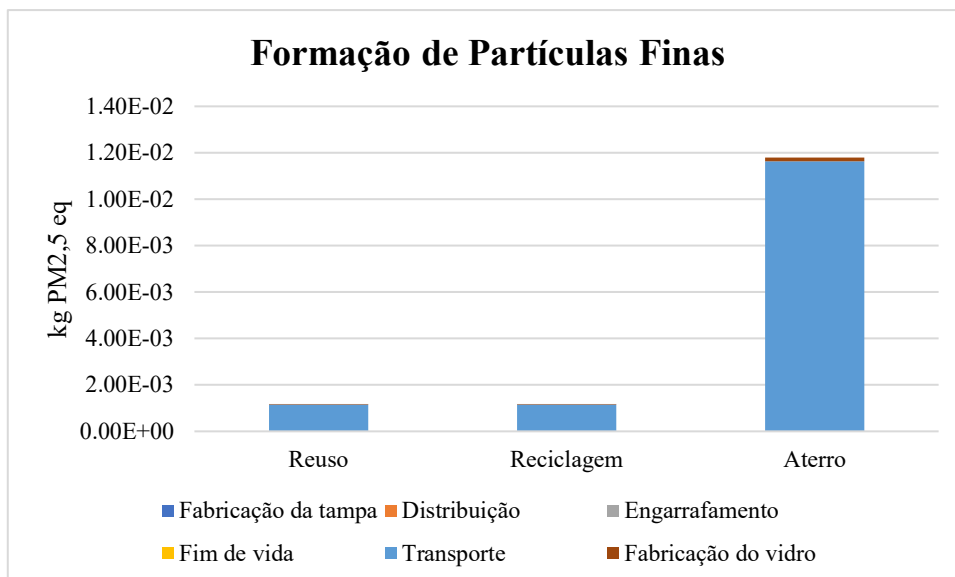


Figura 14: Estimativa do Impacte na categoria FPF dos cenários de fim de vida para embalagem de vidro

A análise dos cenários de fim de vida da embalagem de vidro para azeite aterro, reciclagem e reuso evidencia diferenças marcantes na categoria de impacto Formação de Partículas Finas (PM_{2,5}), conforme ilustrado na Figura 14. Esta categoria está intimamente associada à emissão de poluentes atmosféricos, como óxidos de azoto (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂) e partículas primárias (PM₁₀ e PM_{2,5}), que afetam diretamente a qualidade do ar e a saúde humana. Trata-se, portanto, de um indicador relevante na ACV de sistemas de gestão de resíduos.

O cenário de aterro apresentou o maior impacto na formação de partículas finas, configurando-se como a alternativa ambientalmente menos favorável. Embora o vidro seja um material inerte e não liberte poluentes diretos durante a deposição, as operações associadas ao ciclo logístico e à gestão do aterro incluindo transporte, movimentação de resíduos e uso de maquinaria pesada geram emissões significativas de partículas e precursores gasosos. Além disso, a degradação de frações orgânicas residuais em resíduos mistos pode originar compostos como CO₂, CH₄ e COVs, que participam de reações fotoquímicas responsáveis pela formação secundária de partículas. Assim, o impacto não decorre da composição do vidro em si, mas das atividades energéticas e operacionais associadas ao sistema de deposição final, que ampliam o potencial de impacto atmosférico.

O cenário de reciclagem apresentou um impacto intermédio. As etapas de recolha, transporte, triagem e fusão do vidro pós-consumo implicam consumo energético elevado e utilização de combustíveis fósseis, resultando na emissão de SO₂ e NO_x principais precursores das partículas secundárias. No entanto, sob uma perspetiva sistémica, a

reciclagem compensa parte dessas emissões ao evitar a produção de vidro primário, processo consideravelmente mais intensivo em energia. Estudos demonstram que o aumento das taxas de reciclagem se associa à redução das concentrações de $PM_{2,5}$ em áreas urbanas, devido à diminuição da procura por energia e matérias-primas, o que reforça a relevância desta prática para a mitigação da poluição atmosférica e a melhoria da saúde pública.

Por sua vez, o cenário de reuso demonstrou ser o mais vantajoso, apresentando os menores valores absolutos de impacto. O prolongamento da vida útil das embalagens reduz substancialmente a necessidade de novos processos produtivos nomeadamente as etapas de fusão e fabricação do vidro, que são as principais fontes de emissões. As operações adicionais de transporte e higienização geram apenas impactos marginais, geralmente inferiores aos observados nas demais rotas de fim de vida. Ainda que sistemas de reuso possam apresentar incrementos localizados de emissões quando a lavagem ou o transporte são energeticamente intensivos, o balanço ambiental global mantém-se amplamente positivo, confirmando o papel estratégico do reuso como medida prioritária na hierarquia de gestão de resíduos e como vetor de circularidade no setor oleícola.

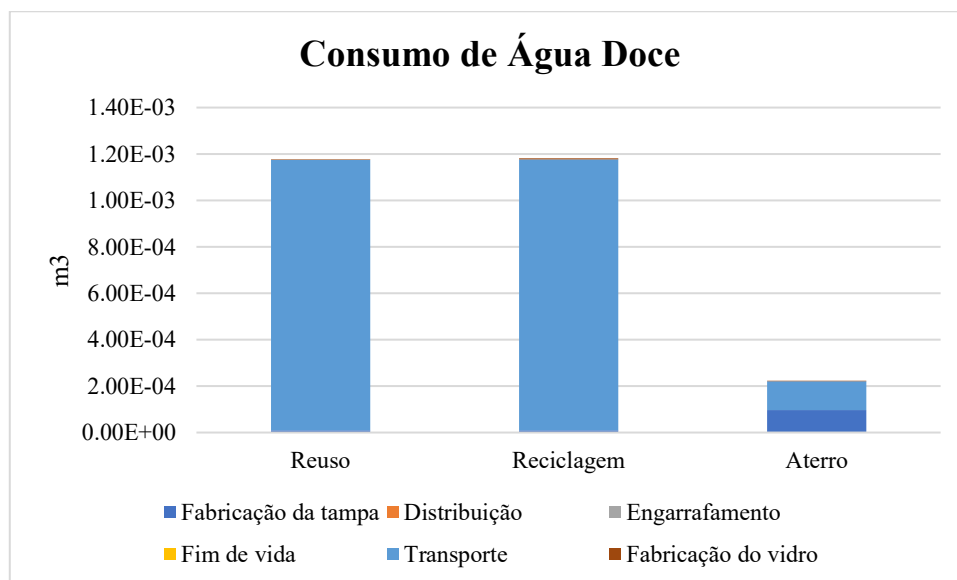


Figura 15: Estimativa do Impacte na categoria CAD dos cenários de fim de vida para as embalagens de vidro

A análise dos cenários de fim de vida da embalagem de vidro para azeite como: aterro, reciclagem e reuso evidência contrastes expressivos na categoria de impacto Consumo de Água Doce, conforme ilustrado na Figura 15. Este indicador reflete o volume total de água utilizado ao longo das diferentes etapas do ciclo de vida, incluindo processos

industriais, de transporte e de preparação das embalagens, representando, assim, um parâmetro crítico de sustentabilidade na ACV.

O cenário de reciclagem apresentou o maior consumo absoluto de água, resultado diretamente associado às etapas industriais de reprocessamento do vidro. Durante o ciclo de reciclagem, o lavamento do vidro pós-consumo, seguido das operações de fusão e controle de qualidade, requer volumes substanciais de água para garantir a pureza, viscosidade e integridade físico-química do material reciclado. Além disso, o sistema de arrefecimento utilizado nos fornos de fusão, geralmente baseado em circuitos hídricos abertos ou semiabertos, intensifica a dependência hídrica do processo. Assim, embora a reciclagem represente uma estratégia circular essencial, ao reduzir a extração de matérias-primas e os impactos energéticos da produção primária, o seu balanço hídrico global deve ser analisado de forma crítica no contexto da ACV (Naik, Nakkeeran & Roy, 2024).

O cenário de reuso, embora amplamente reconhecido como ambientalmente vantajoso em outras categorias de impacto, apresentou valores de consumo de água comparáveis aos da reciclagem. Esse comportamento decorre principalmente da etapa de higienização e esterilização das embalagens, necessária para garantir a segurança e a qualidade do produto nas sucessivas utilizações. Tais processos, frequentemente baseados em lavagens a alta temperatura e no uso de soluções químicas alcalinas, aumentam a demanda hídrica direta do sistema. Dessa forma, ainda que o reuso reduza substancialmente a necessidade de fabricação de novas embalagens e prolongue a vida útil do material, o impacto relacionado ao uso de água torna seu desempenho semelhante ao da reciclagem neste indicador específico (Kim et al., 2023).

No cenário de aterro sanitário, observou-se o menor consumo direto de água entre as rotas de fim de vida avaliadas. Esse resultado, contudo, reflete principalmente a natureza inerte do vidro, que não requer etapas adicionais de processamento hídrico, como lavagem ou fusão, nas fases pós-consumo. Assim, o baixo consumo de água está associado às características físico-químicas do material e à simplicidade do tratamento envolvido, e não à ausência de impacto ambiental. Apesar de o vidro não interagir quimicamente com o meio nem liberar substâncias dissolvidas, o próprio sistema de disposição final pode originar efeitos indiretos sobre os recursos hídricos. A operação de aterros envolve processos como drenagem, compactação e gestão de resíduos mistos, que podem gerar lixiviados contendo compostos orgânicos, metais pesados e sais dissolvidos, sobretudo em contextos de impermeabilização ou controle insuficiente. Tais efluentes

representam um risco potencial de contaminação de águas superficiais e subterrâneas, com efeitos ambientais persistentes em longo prazo.

Dessa forma, o resultado observado nesta categoria de impacto traduz a condição de inércia do vidro, que minimiza o consumo direto de água, mas não elimina completamente os riscos associados ao contexto operacional do sistema de disposição.

Em síntese, enquanto a reciclagem e o reúso demandam maior volume de água em virtude das etapas operacionais intensivas, o aterro, embora menos exigente hidricamente, apresenta riscos potenciais de poluição hídrica. Essa análise reforça a importância de estratégias que otimizem a eficiência no uso de água em processos de reúso e reciclagem, associadas a práticas de gestão integrada que minimizem a geração e o impacto de efluentes industriais.

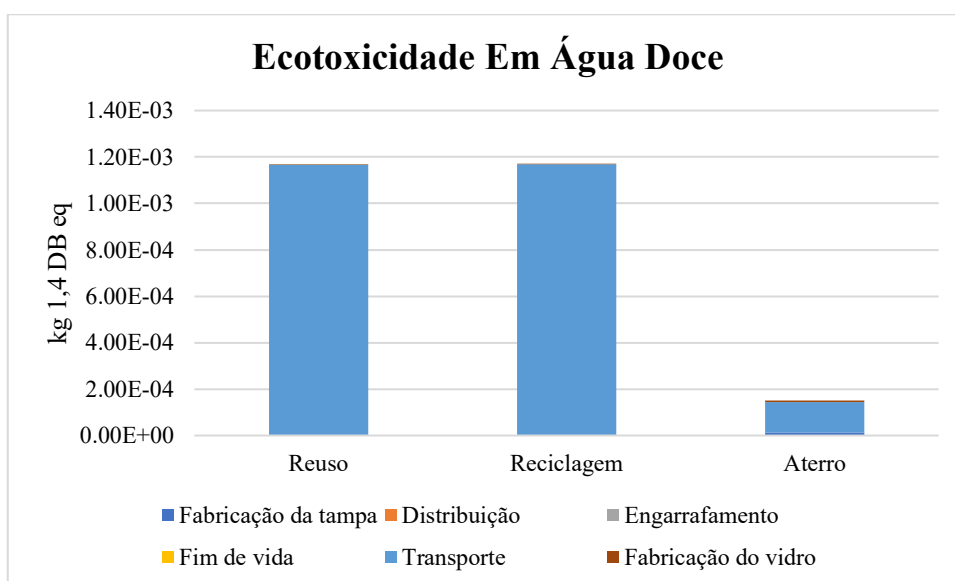


Figura 16: Estimativa do Impacte na categoria EAD e (kg 1,4-DB eq.) dos cenários de fim de vida para as embalagens de vidro

A Ecotoxicidade em Água Doce representa o potencial de danos aos ecossistemas aquáticos decorrentes da libertação de substâncias tóxicas líquidas ou sólidas durante o ciclo de vida das embalagens. Conforme apresentado na Figura 16, os cenários de reciclagem, reúso e aterro evidenciam diferenças significativas nesse indicador, refletindo os distintos níveis de interação entre os processos industriais e os recursos hídricos.

De modo geral, os cenários de reciclagem e reúso apresentaram valores superiores de ecotoxicidade em comparação ao aterro, resultado da necessidade de operações que envolvem uso intensivo de água e agentes químicos. Na reciclagem, as etapas de lavagem, fusão e purificação do vidro pós-consumo podem gerar efluentes com traços de metais pesados e aditivos químicos oriundos de impurezas do material recolhido. Quando não há

gestão adequada desses efluentes, há risco de libertação de substâncias tóxicas, com efeitos diretos sobre organismos aquáticos e o equilíbrio ecológico.

No cenário de reúso, embora o impacto seja inferior ao da reciclagem, as etapas de lavagem e esterilização também requerem volumes consideráveis de água e o uso de detergentes ou desinfetantes, cuja descarga inadequada pode contribuir para a toxicidade aquática. A adoção de tecnologias de recirculação de água, bem como o uso de agentes biodegradáveis, pode mitigar substancialmente esses efeitos, reforçando o potencial do reúso como prática circular e ambientalmente vantajosa.

O aterro sanitário, por sua vez, apresentou o menor valor direto de ecotoxicidade, o que traduz a condição de inércia química do vidro. O material, por possuir baixa solubilidade e estabilidade molecular elevada, não libera substâncias tóxicas em quantidades significativas. Contudo, os impactos indiretos não devem ser desconsiderados: a decomposição de resíduos orgânicos ou mistos no mesmo local pode gerar lixiviados contendo metais e compostos orgânicos recalcitrantes, que, se mal geridos, afetam a qualidade das águas subterrâneas e superficiais. Assim, o impacto nesta categoria reflete menos o comportamento do vidro e mais as condições operacionais e ambientais do sistema de disposição final.

De forma integrada, os resultados reforçam que o desempenho ambiental do vidro em termos de ecotoxicidade depende sobretudo da gestão dos efluentes industriais e do tratamento das águas residuais associados às etapas de reúso e reciclagem. A mitigação desse impacto requer investimentos em tecnologias limpas, tratamento de efluentes e eficiência hídrica, alinhando o setor às metas de redução de poluição aquática e aos princípios da economia circular.

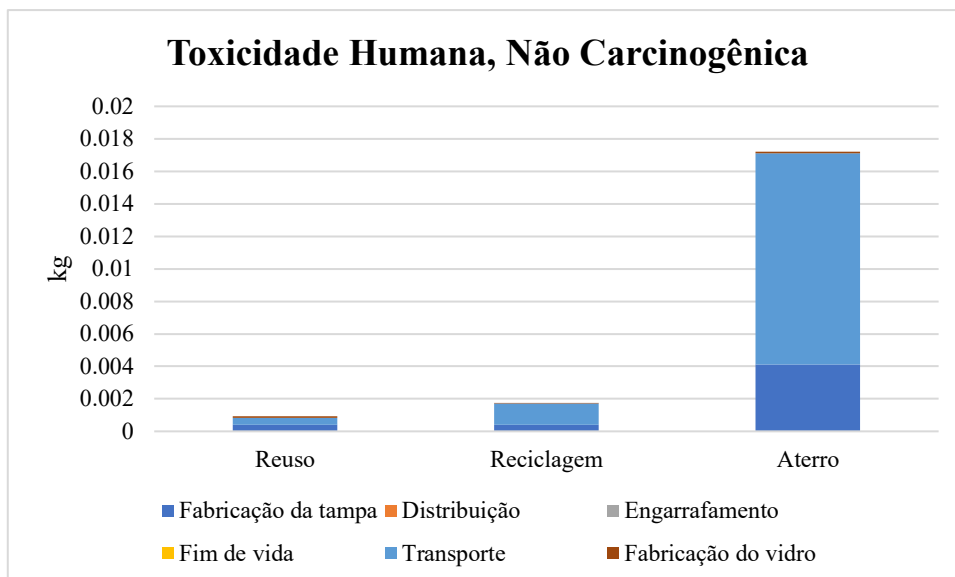


Figura 17: Estimativa do Impacte na categoria TH nc dos cenários de fim de vida para as embalagens de vidro

Na categoria Toxicidade Humana, não carcinogênica, observam-se diferenças expressivas entre os cenários de fim de vida da embalagem de vidro para azeite como: reuso, reciclagem e aterro conforme apresentado na Figura 17. Esse indicador reflete o potencial de exposição humana a substâncias tóxicas, tanto por inalação de poluentes atmosféricos quanto por contaminação de solos e águas subterrâneas, sendo fortemente influenciado pelas emissões e efluentes gerados nas diferentes etapas do ciclo de vida.

O cenário de aterro apresentou o maior impacto nesta categoria, configurando-se como a alternativa menos favorável do ponto de vista toxicológico. Tal resultado, está associado principalmente às emissões provenientes da degradação de resíduos e à queima de materiais mistos que frequentemente acompanham o descarte. Esses processos podem liberar metais pesados, COVs e gases tóxicos, os quais representam risco significativo à saúde humana. Além disso, os lixiviados gerados no aterro podem infiltrar-se em solos e lençóis freáticos, provocando exposição indireta de populações locais por meio do consumo de água contaminada ou pela absorção de contaminantes pela cadeia alimentar. A combinação entre emissões atmosféricas e poluição difusa do solo e da água justifica o elevado valor de toxicidade observado nesse cenário.

O cenário de reciclagem apresentou impacto intermediário, com valores menores de toxicidade não cancerígena em relação ao aterro, mas ainda relevantes do ponto de vista ambiental. As etapas industriais de reprocessamento do vidro, especialmente a fusão e o refino do material, podem gerar efluentes líquidos e emissões gasosas contendo óxidos metálicos e substâncias voláteis. Esses contaminantes, se não forem devidamente

controlados, contribuem para a exposição humana a compostos tóxicos. Apesar disso, a reciclagem constitui uma estratégia ambientalmente vantajosa, uma vez que reduz a necessidade de extração e processamento de matérias-primas. Para otimizar o seu desempenho toxicológico, é essencial a adoção de tecnologias limpas e de sistemas eficazes de controle e tratamento de emissões, capazes de mitigar os efeitos adversos sobre a saúde (Cho et al., 2024).

Por sua vez, o cenário de reuso destacou-se como o mais benéfico em termos de Toxicidade Humana, não cancerígena, apresentando os menores valores absolutos entre as alternativas avaliadas. O prolongamento da vida útil das embalagens reduz de forma significativa a necessidade de novas etapas produtivas, evitando emissões associadas à extração, fusão e moldagem do vidro, que são as fases mais críticas do ponto de vista toxicológico. As operações adicionais de higienização e transporte contribuíram apenas de forma marginal para o impacto total, uma vez que envolvem quantidades reduzidas de insumos químicos e energia. Assim, o reuso se consolida como a estratégia mais preventiva frente à exposição humana a agentes tóxicos, promovendo eficiência de recursos, redução de emissões e fortalecimento da economia circular (Sandin & Peters, 2018).

4.2 Embalagem PET

A análise dos resultados da categoria GWP, apresentada na Figura 18, evidencia diferenças expressivas entre os quatro cenários de gestão de resíduos de embalagens PET como aterro sanitário, reciclagem química, incineração e reciclagem mecânica demonstrando como a rota de fim de vida influencia diretamente o desempenho ambiental do ciclo de vida do material.

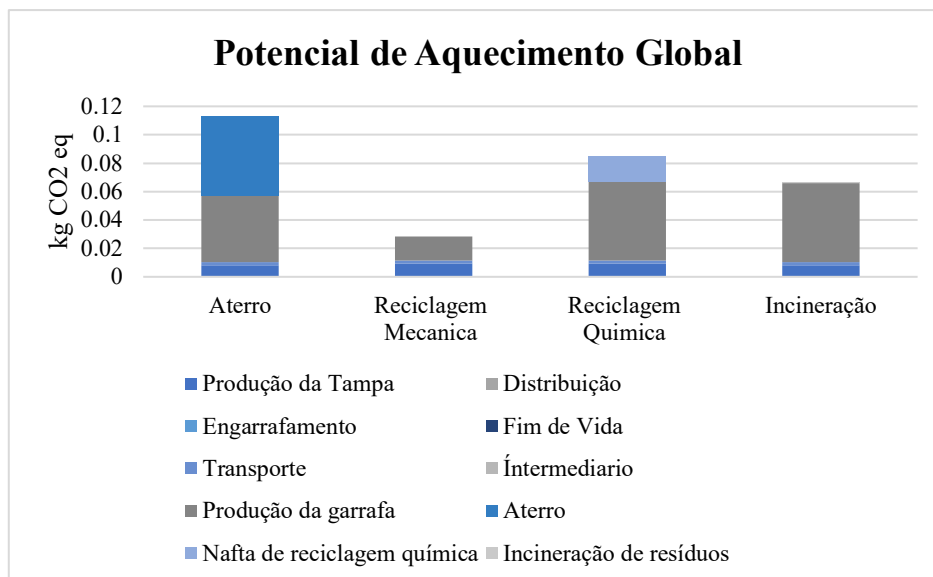


Figura 18: Estimativa do Impacte na categoria GWP dos cenários de fim de vida para as embalagens de PET

Na categoria GWP, expressa em kg CO₂ eq., observou-se que o aterro sanitário apresentou o maior valor de emissões de GEE, configurando-se como o cenário mais impactante. Embora o PET seja um polímero de elevada resistência e baixa biodegradabilidade, parte da sua fração orgânica residual pode sofrer decomposição anaeróbia, resultando na libertação de metano (CH₄), gás com potencial de aquecimento global cerca de 28 vezes superior ao do CO₂. Além disso, as operações de transporte, compactação e cobertura dos resíduos, típicas do manejo em aterros, geram emissões indiretas de CO₂ e NO_x devido ao uso de combustíveis fósseis e maquinário pesado, agravando o impacto total. A ausência de reaproveitamento do material e o desperdício de potencial energético tornam o aterro a alternativa menos favorável sob a ótica climática.

A reciclagem química apresentou valores ligeiramente inferiores aos do aterro, configurando-se como o segundo cenário mais impactante. Este resultado está associado ao uso intensivo de energia térmica e elétrica e à necessidade de reagentes químicos como nafta, solventes e catalisadores empregados durante o processo de despolimerização do PET. Essas etapas envolvem a quebra molecular do polímero, libertando emissões indiretas de CO₂ eq. devido à origem fóssil dos insumos e ao consumo energético elevado. Apesar de permitir a recuperação de monómeros de alta pureza, semelhantes aos da resina virgem, o benefício climático é parcialmente compensado pelo gasto energético e pela dependência de matérias-primas fósseis.

A reciclagem mecânica, por outro lado, destacou-se como o cenário mais favorável em termos de emissões de GEE. O processo, baseado na trituração, lavagem e regranulação do PET pós-consumo, requer menor input energético e não utiliza reagentes químicos, resultando em reduções significativas nas emissões de CO₂. Além disso, a substituição parcial de resina virgem por R-PET proporciona créditos ambientais relevantes, uma vez que evita a produção de polímero primário uma das etapas mais intensivas em energia de todo o ciclo de vida do material. Assim, o desempenho da reciclagem mecânica evidencia o seu papel estratégico na mitigação das alterações climáticas e na promoção de sistemas produtivos circulares.

A incineração, por sua vez, apresentou impacto intermédio, superior apenas à reciclagem mecânica. Embora possibilite a recuperação parcial de energia térmica, o carbono contido no polímero é quase totalmente convertido em gases de efeito estufa durante a combustão (CO₂, CH₄ e NO_x), o que limita o benefício ambiental líquido do processo. Assim, apesar de contribuir para a redução do volume de resíduos destinados ao aterro, o balanço climático global da incineração permanece desfavorável, sobretudo quando comparado às rotas de reciclagem, em especial à mecânica.

De modo geral, os resultados confirmam que a reciclagem mecânica do PET representa a alternativa mais eficiente sob a ótica climática, conciliando menores emissões de GEE, menor dependência energética e elevada circularidade material. A reciclagem química, embora tecnicamente avançada e útil para fluxos contaminados, ainda apresenta limitações energéticas que reduzem seu benefício ambiental líquido. O aterro e a incineração, por sua vez, configuram-se como rotas de fim de vida com maior contribuição para o aquecimento global, devendo ser progressivamente substituídas por estratégias de reuso e reciclagem de ciclo fechado.

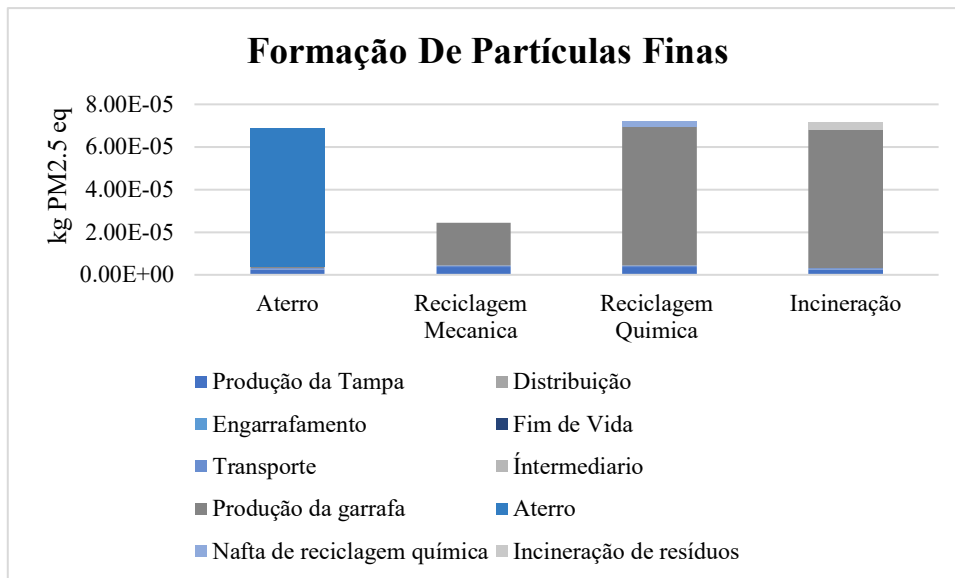


Figura 19: Estimativa do Impacte na categoria FPF dos cenários de fim de vida para as embalagens de PET

No que se refere à categoria de impacto Formação de Partículas Finas (PM_{2,5} eq.), observou-se que os diferentes cenários de destinação do PET como: reciclagem química, aterro, incineração e reciclagem mecânica, apresentaram valores de mesma ordem de grandeza, embora com diferenças significativas no desempenho ambiental, conforme ilustrado na Figura 19. Esse indicador está diretamente relacionado à emissão de material particulado primário e de precursores gasosos (NO_x, SO_x, VOCs), cuja formação resulta, em grande parte, das etapas energéticas e logísticas do ciclo de vida do material.

O cenário de reciclagem química apresentou o maior impacto potencial na formação de partículas finas. Esse resultado está associado principalmente ao elevado consumo energético das etapas de quebra molecular (despolimerização) e reprocessamento químico do polímero, que requerem altas temperaturas e o uso intensivo de insumos térmicos e elétricos. O fornecimento dessa energia, frequentemente proveniente de matrizes fósseis, resulta na emissão indireta de partículas e de precursores atmosféricos originados da geração de energia e dos processos industriais complementares. Apesar disso, a reciclagem química possui importância estratégica dentro do ciclo de vida do PET, especialmente para o tratamento de fluxos de resíduos complexos ou materiais não recicláveis mecanicamente, permitindo a recuperação de monômeros de alta qualidade (Vinci et al., 2024).

O aterro sanitário apresentou impacto elevado, embora inferior ao da reciclagem química. As emissões associadas ao transporte e às operações de manejo de resíduos, incluindo compactação, movimentação e cobertura diária, contribuem para a formação indireta de partículas finas, principalmente em função da combustão de combustíveis

fósseis utilizados em veículos e maquinários. Além disso, processos secundários como a oxidação de compostos orgânicos voláteis e as emissões de motores a diesel agravam a presença de partículas em suspensão, impactando a qualidade do ar local (Cherubini et al., 2009).

A incineração apresentou desempenho intermediário, com valores significativos de emissões diretas de material particulado e de precursores gasosos (SO_x e NO_x) gerados durante a combustão do PET. Embora esse processo proporcione recuperação energética parcial, a liberação de partículas e gases tóxicos é inevitável, representando risco potencial tanto à qualidade do ar quanto à saúde humana. Além disso, a eficiência dos sistemas de filtragem e o controle das condições de combustão exercem influência determinante sobre o impacto final (Vlasopoulos et al., 2023).

Por fim, a reciclagem mecânica destacou-se como o cenário ambientalmente mais favorável, apresentando a menor formação de partículas finas entre as rotas analisadas. As emissões associadas às etapas de transporte, trituração, lavagem e reprocessamento do PET são consideravelmente reduzidas em comparação às demais alternativas, sobretudo devido à baixa dependência de combustíveis fósseis e à eficiência energética dos processos. Assim, a reciclagem mecânica confirma-se como a alternativa mais sustentável no contexto da gestão de embalagens plásticas, promovendo redução de emissões atmosféricas, economia de recursos primários e fortalecimento da circularidade do material (Ruggeri et al., 2025).

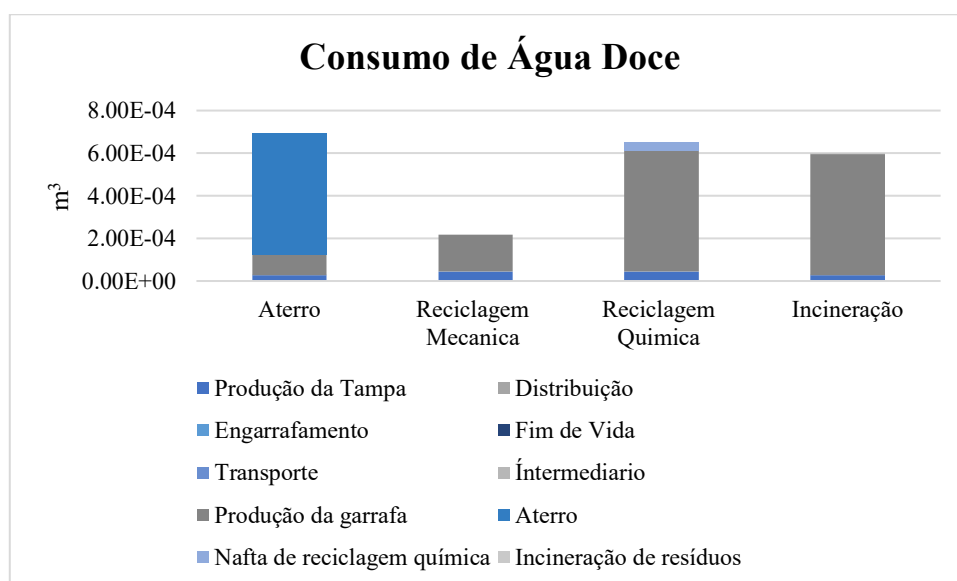


Figura 20: Estimativa do Impacte na categoria CAD dos cenários de fim de vida para as embalagens de PET

Na categoria Consumo de Água Doce, observou-se uma variação expressiva entre os diferentes cenários de destinação do PET reciclagem mecânica, reciclagem química, incineração e aterro conforme ilustrado na Figura 20. O desempenho hídrico de cada rota reflete, sobretudo, o nível de complexidade tecnológica e a intensidade das operações industriais envolvidas.

De modo geral, as rotas de reciclagem apresentaram maior consumo de água em comparação com as alternativas de eliminação (aterro e incineração), resultado da necessidade de processos úmidos para garantir a qualidade do material recuperado. A reciclagem mecânica, em particular, revelou o maior impacto nesta categoria, devido às etapas de lavagem, trituração e regranulação, que requerem grandes volumes de água para a remoção de impurezas e contaminantes. O uso adicional de água para resfriamento térmico e para a geração de energia elétrica e térmica amplifica esse consumo indireto, reforçando a importância de estratégias de reutilização e recirculação hídrica nas unidades de processamento.

A reciclagem química apresentou um perfil intermediário, combinando menor dependência de água direta com uma carga considerável de consumo indireto. Processos como despolimerização e purificação de monómeros utilizam reagentes e solventes que exigem sistemas líquidos de refrigeração e controle de temperatura, além de gerar efluentes que necessitam tratamento específico. Embora essa rota permita recuperar matéria-prima de alta qualidade, o balanço hídrico ainda depende fortemente da eficiência dos sistemas de contenção e reaproveitamento de água industrial.

Em contraste, os cenários de incineração e aterro demonstraram o menor consumo direto de água, já que não envolvem etapas úmidas intensivas. No entanto, essa aparente vantagem hídrica deve ser interpretada com cautela: tanto a incineração, com o uso pontual de água em sistemas de refrigeração de gases e cinzas, quanto o aterro sanitário, através das operações de umidificação de resíduos e gestão de lixiviados, apresentam usos localizados e contínuos de recursos hídricos. Além disso, no caso do aterro, há o risco de contaminação das águas superficiais e subterrâneas por chorume, o que evidencia que menor consumo não equivale necessariamente a menor impacto ambiental.

Em síntese, os resultados indicam que a reciclagem mecânica, embora ambientalmente vantajosa em termos de circularidade e redução de emissões, exige atenção especial à gestão hídrica e energética para evitar a transferência de impactos entre categorias. A reciclagem química surge como alternativa complementar, promissora em termos tecnológicos, mas ainda intensiva em recursos. Já o aterro e a incineração, apesar

de apresentarem menor consumo de água, permanecem como opções menos sustentáveis no balanço global do ciclo de vida. O avanço da sustentabilidade do PET dependerá, portanto, da integração entre eficiência material e hídrica, assegurando que as soluções circulares não gerem novos desequilíbrios ambientais.

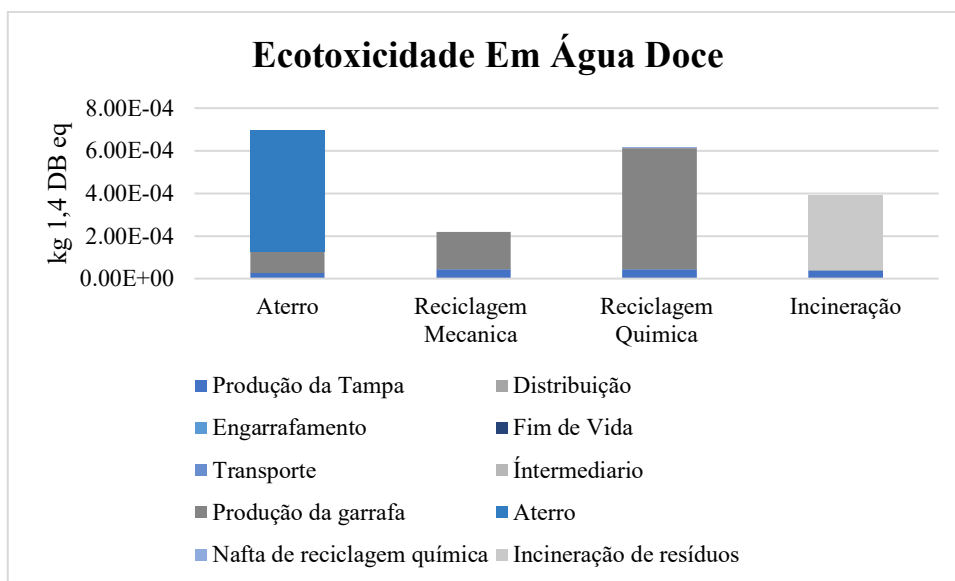


Figura 21: Estimativa do Impacte na categoria EAD dos cenários de fim de vida para as embalagens de PET

Na figura 21 o cenário de aterro apresentou o maior impacto de ecotoxicidade em água doce, principalmente devido à liberação e acumulação de substâncias tóxicas provenientes da decomposição e lixiviação de resíduos plásticos. Durante o período de disposição, os aditivos, pigmentos e microplásticos presentes no PET podem migrar para o percolado, atingindo águas subterrâneas e superficiais. Esse processo é agravado por condições ambientais variáveis de umidade, pressão e temperatura, que favorecem a dissolução de metais pesados e compostos orgânicos persistentes, elevando o potencial ecotóxico do aterro (Wan et al., 2021).

A reciclagem química apresentou o segundo maior impacto, explicado pelo uso intensivo de reagentes químicos e energia durante a etapa de despolimerização do PET. Esse processo gera efluentes líquidos e gasosos contendo PAHs, COVs e traços de solventes industriais, que exigem tratamento adequado antes do descarte. Apesar de permitir a recuperação de monômeros de alta pureza, o desempenho ambiental da reciclagem química depende da eficiência do controle de efluentes e emissões atmosféricas (Jalilian & Shahbaz, 2024).

O cenário de incineração apresentou um impacto intermediário, associado à formação de gases e cinzas residuais contendo metais-traço, como Cd, Pb e Zn. Durante

a combustão, ocorre a emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), dioxinas e furanos, que podem se depositar na atmosfera e atingir corpos d'água, afetando ecossistemas aquáticos sensíveis (Nam, Kim & An, 2022). Assim, embora a incineração reduza o volume de resíduos, o seu efeito ecotóxico decorre da liberação de poluentes persistentes e da geração de cinzas potencialmente contaminantes.

Por outro lado, a reciclagem mecânica apresentou o menor impacto ecotóxico, configurando-se como a alternativa ambientalmente mais favorável. O processo demanda menor consumo de reagentes químicos e energia, reduzindo significativamente as emissões e os efluentes associados. Apesar do uso de água nas etapas de lavagem e reprocessamento, os impactos são mitigáveis mediante tratamento adequado dos efluentes, que podem conter surfactantes, microplásticos e sólidos suspensos. Além disso, a reciclagem mecânica contribui para a circularidade do material, evitando a produção de polímeros e, conseqüentemente, a geração de novos contaminantes (Yang et al., 2024).

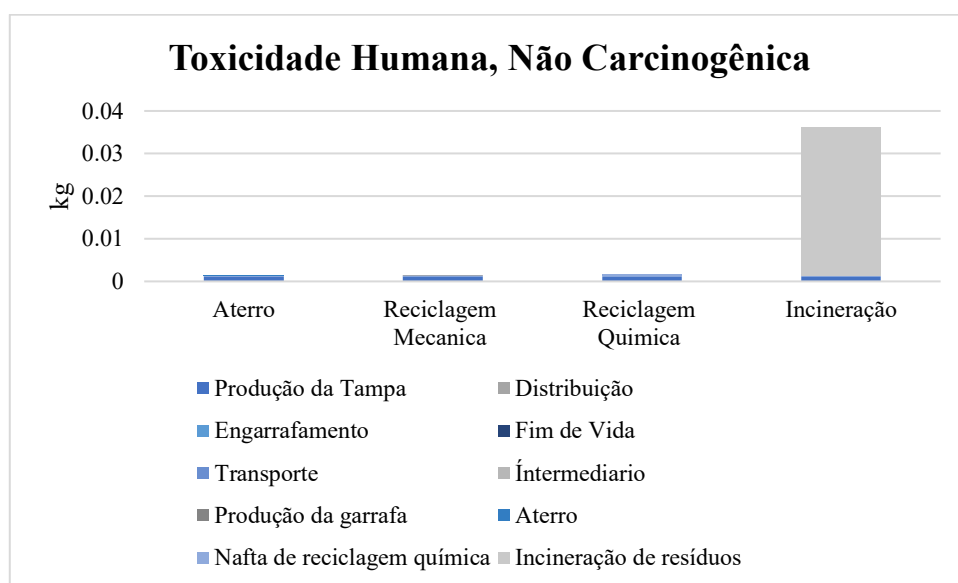


Figura 22: Estimativa do Impacto na categoria TH nc dos cenários de fim de vida para as embalagens de PET

Na categoria de impacto Toxicidade Humana, Não Cancerígena, observam-se diferenças expressivas entre os cenários de fim de vida do PET como: reciclagem química, aterro sanitário, incineração e reciclagem mecânica conforme apresentado na Figura 22. Essa categoria está associada ao potencial de exposição humana a substâncias tóxicas provenientes de emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos gerados ao longo do ciclo de vida do material.

O cenário de reciclagem química apresentou o maior potencial de impacto entre as alternativas avaliadas. Esse comportamento decorre do uso intensivo de reagentes

químicos e energia durante as etapas de despolimerização e reprocessamento, nas quais o PET é convertido em monômeros e oligômeros. Essas operações, realizadas sob altas temperaturas e pressões, favorecem a formação de COVs, resíduos ácidos e subprodutos tóxicos que exigem sistemas de controle e tratamento altamente eficientes. Embora essa tecnologia permita a recuperação de materiais de alta pureza e reduza a necessidade de matérias-primas, sua complexidade operacional, aliada à alta demanda energética, resulta em emissões indiretas e potenciais riscos à saúde humana (Jeswani et al., 2020).

O aterro sanitário apresentou um impacto considerável na mesma categoria, relacionado à liberação gradual de compostos tóxicos ao longo do tempo. Mesmo que o PET possua elevada estabilidade química, a degradação lenta e contínua de aditivos e pigmentos presentes na formulação do polímero pode liberar compostos orgânicos voláteis, metais pesados e plastificantes. Além disso, falhas nos sistemas de drenagem e tratamento do chorume podem favorecer a migração de substâncias tóxicas para o solo e águas subterrâneas, representando um risco crônico à saúde humana em aterros operados por longos períodos (Cherubini et al., 2009).

A incineração apresentou impacto intermediário, mas ainda relevante, em virtude da emissão atmosférica de poluentes tóxicos durante a combustão do PET. Entre os principais contaminantes destacam-se as dioxinas, furanos e metais-traço, originados de processos de combustão incompleta. Essas substâncias possuem alta persistência ambiental e podem bioacumular-se na cadeia alimentar, acarretando efeitos adversos à saúde. Ademais, a gestão inadequada das cinzas e resíduos sólidos gerados pela incineração pode gerar contaminação secundária de solos e corpos d'água, ampliando os impactos toxicológicos (Zhang & Nakatani, 2024).

Por fim, a reciclagem mecânica destacou-se como o cenário mais favorável na categoria de Toxicidade Humana Não Carcinogênica, apresentando os menores valores de impacto entre as opções analisadas. Embora envolva etapas de lavagem, trituração e reprocessamento do material, as emissões associadas são relativamente reduzidas, limitando-se ao consumo de energia e ao uso de aditivos estabilizantes. Essa rota tecnológica contribui significativamente para o fechamento do ciclo de vida do PET, reduzindo a dependência de resina virgem e evitando a geração de resíduos e emissões tóxicas associadas a processos de descarte. Dessa forma, a reciclagem mecânica consolida-se como a alternativa mais sustentável, aliando baixo risco à saúde humana e eficiência na gestão de recursos (Peantham & Varabuntoonvit, 2024)

4.3 Embalagem Lata

A análise do GWP revela diferenças expressivas entre os cenários de aterro sanitário e reciclagem das embalagens de alumínio, conforme ilustrado na Figura 23. Essa categoria de impacto está diretamente relacionada à emissão de GEE especialmente CO₂ ao longo das etapas de transporte, processamento e disposição final dos materiais.

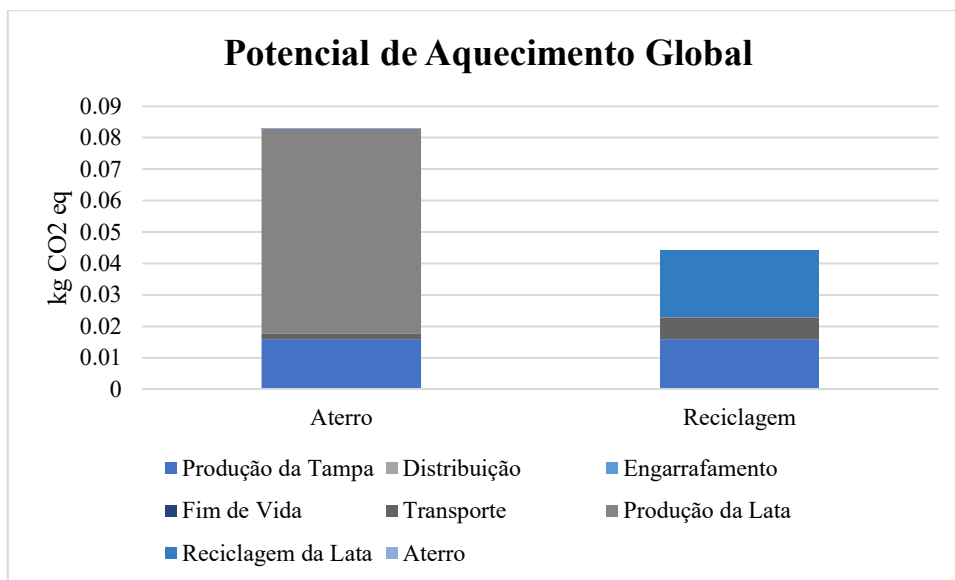


Figura 23: Estimativa do Impacte na categoria GWP dos cenários de fim de vida para as embalagens de lata

A figura 23 apresenta no cenário de aterro o maior valor de GWP, refletindo um desempenho ambiental menos favorável. Embora metais como alumínio e aço possuam alta estabilidade química e não sofram degradação biológica, o impacto climático associado à sua disposição decorre de três principais fatores: (i) emissões indiretas provenientes do transporte e das operações de compactação e cobertura no aterro; (ii) energia consumida nas atividades de gestão e tratamento de resíduos; e (iii) sobretudo, a perda do potencial de reciclagem. A não recuperação dos metais acarreta a necessidade de extração e refino de minérios primários, processos altamente intensivos em energia e responsáveis por emissões substanciais de CO₂. De acordo com Pizzol, Christensen, Schmidt e Thomsen (2011), a produção primária de alumínio é uma das etapas industriais com maior contribuição para o aquecimento global, dada a grande demanda energética na eletrólise da alumina e no refino da bauxita, o que reforça o impacto negativo do descarte direto em aterros.

Em contraste, o cenário de reciclagem apresenta um desempenho ambiental amplamente superior, evidenciando-se como a alternativa mais eficaz para mitigação das emissões de gases de efeito estufa. A reciclagem de sucata de alumínio requer apenas

cerca de 5% da energia necessária para a produção primária do metal, resultando em reduções significativas de CO₂ equivalente. De acordo com dados da European Aluminium (2020), enquanto a produção primária pode gerar até 8.455 kg de CO₂ eq. por tonelada, a reciclagem reduz esse valor para aproximadamente 80 kg de CO₂ eq. por tonelada, uma diminuição superior a 98% nas emissões diretas.

Essa redução expressiva está associada às etapas de fusão e refino secundário, que, embora ainda demandem energia térmica, utilizam fontes menos intensivas em carbono e preservam as propriedades metalúrgicas do alumínio, permitindo sua reintrodução quase infinita na cadeia produtiva. Além disso, a reciclagem gera créditos ambientais pela substituição da produção primária, compensando as emissões de processos anteriores e reforçando o conceito de fechamento de ciclo dentro da economia circular.

Por fim, a reciclagem de alumínio contribui não apenas para a redução do GWP, mas também para a conservação de recursos naturais, ao evitar a extração de bauxita e minimizar os impactos ecossistêmicos associados à mineração e ao refino primário. Estudos recentes destacam que a integração de sistemas de reciclagem eficientes reduz significativamente a pressão sobre os ecossistemas e o consumo de energia primária, consolidando o alumínio como um material de elevado potencial de circularidade (Pedneault et al., 2021).

Em síntese, os resultados confirmam que, enquanto o aterro sanitário acarreta perdas ambientais e energéticas expressivas, a reciclagem de alumínio representa a estratégia mais eficiente na mitigação do GWP, promovendo redução de emissões, conservação de recursos e prolongamento do ciclo de vida do material.

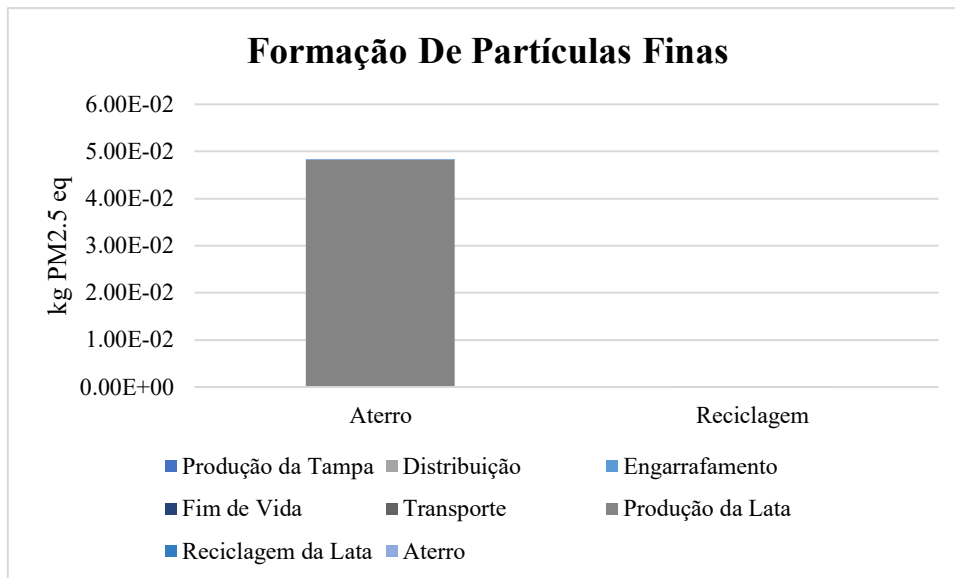


Figura 24: Estimativa do Impacte na categoria FPF dos cenários de fim de vida para as embalagens de lata.

A análise da categoria de impacto Formação de Partículas Finas (PM_{2,5} e PM₁₀) evidencia diferenças significativas entre os cenários de aterro sanitário e reciclagem de alumínio, conforme ilustrado na Figura 24. Esse indicador está associado à emissão direta e indireta de material particulado atmosférico proveniente das etapas de transporte, processamento e disposição final das embalagens metálicas.

No cenário de aterro sanitário, embora a contribuição para a emissão de partículas finas seja relativamente limitada, ela não é desprezível. As operações mecânicas envolvidas como transporte, movimentação, compactação e cobertura dos resíduos demandam combustíveis fósseis, que resultam em emissões de partículas primárias e precursores gasosos. Além disso, a oxidação superficial e a corrosão gradual das embalagens metálicas expostas às condições ambientais do aterro podem liberar pequenas quantidades de partículas metálicas para a atmosfera. Apesar de essas concentrações serem baixas, possuem potencial de afetar a qualidade do ar nas proximidades do local, contribuindo para impactos localizados na saúde humana e no ambiente (Giusti, 2009).

Em contrapartida, o cenário de reciclagem de alumínio demonstrou-se substancialmente mais favorável em termos de formação de partículas finas. O processo de reciclagem minimiza a necessidade de combustão direta e de processamento intensivo, reduzindo, portanto, as emissões atmosféricas de material particulado e gases precursores. Durante as etapas de coleta, trituração, fusão e refino secundário, as emissões são mais controladas e ocorrem sob condições industriais fechadas, o que limita a dispersão de partículas no ar.

Adicionalmente, a valorização do alumínio reciclado evita a extração e beneficiamento da bauxita, etapas reconhecidamente intensivas em energia e responsáveis por altas emissões de material particulado e gases de efeito estufa durante a eletrólise e o refino primário do metal (European Aluminium, 2020). Dessa forma, a reciclagem não apenas reduz as emissões diretas de partículas, mas também gera benefícios ambientais indiretos ao evitar os impactos associados à produção primária.

Em síntese, enquanto o aterro sanitário apresenta emissões pontuais e localizadas de partículas finas, associadas principalmente às operações logísticas e à corrosão superficial das embalagens, a reciclagem de alumínio destaca-se como a alternativa ambientalmente mais vantajosa, proporcionando redução expressiva das emissões atmosféricas e mitigação dos efeitos sobre a qualidade do ar e a saúde humana.

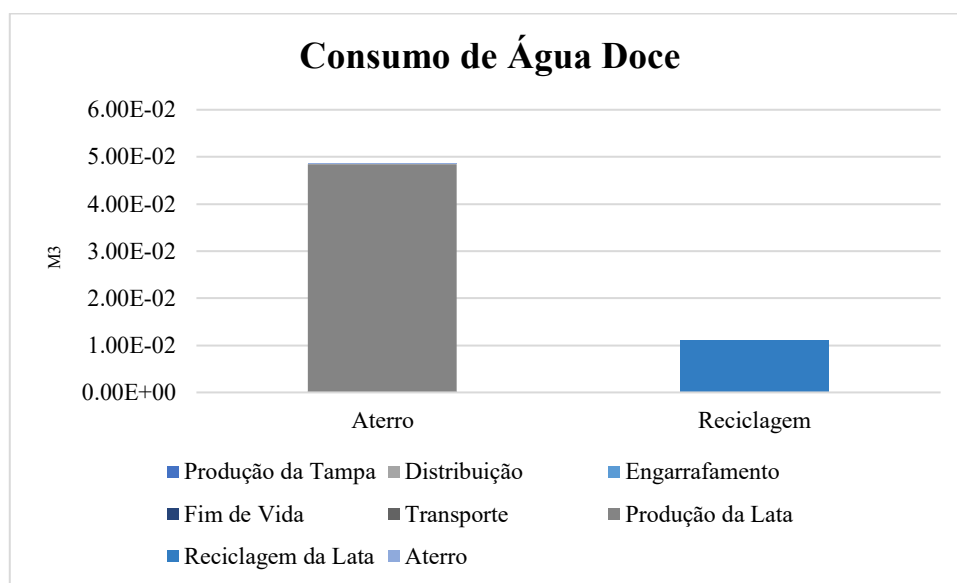


Figura 25: Estimativa do Impacte na categoria CAD dos cenários de fim de vida para as embalagens de lata

A análise da categoria de impacto Consumo de Água Doce evidencia diferenças significativas entre os cenários de aterro sanitário e reciclagem de alumínio, conforme apresentado na Figura 25. Essa categoria está associada à quantidade total de recursos hídricos utilizados ao longo do ciclo de vida das embalagens, abrangendo desde as etapas de produção e transporte até o fim de vida útil.

No cenário de aterro sanitário, o consumo direto de água é relativamente baixo, restringindo-se principalmente às atividades operacionais, como umidificação de resíduos, supressão de poeira e tratamento de chorume. No entanto, quando analisado sob a ótica do ciclo de vida ampliado, o aterro acarreta um custo hídrico indireto expressivo.

Isso ocorre porque o metal descartado deixa de retornar ao ciclo produtivo, exigindo nova extração e beneficiamento de minérios primários em processos altamente dependentes de água para etapas como lavagem, moagem e refinamento da bauxita, além da eletrólise e do resfriamento industrial (UNEP, 2013). Assim, o aterro não deve ser interpretado apenas como uma fase terminal de disposição, mas como uma interrupção do ciclo hidrometálico global, comprometendo a eficiência no uso dos recursos hídricos e ampliando a pegada hídrica total associada ao alumínio.

Por outro lado, o cenário de reciclagem de alumínio apresenta consumo de água consideravelmente reduzido, configurando-se como a alternativa mais eficiente e sustentável na gestão hídrica do material. O processo de refusão do alumínio secundário demanda aproximadamente 5% da água utilizada na produção primária, empregando volumes mínimos durante as etapas de fusão, resfriamento e limpeza do metal reciclado (European Aluminium, 2020). Além disso, a reutilização de água industrial em sistemas fechados e o controle de efluentes nas plantas de reciclagem contribuem para reduzir perdas e impactos sobre corpos hídricos.

Outro fator relevante é que a reciclagem evita a necessidade de extração de bauxita e refino de alumina, etapas que estão entre as principais responsáveis pelo consumo hídrico da cadeia do alumínio. Dessa forma, a recuperação de sucata metálica não apenas minimiza o uso direto de água, mas também previne impactos indiretos associados à mineração, geração de rejeitos e contaminação de mananciais.

Em síntese, o aterro sanitário representa uma rota de alto custo ambiental indireto, pois interrompe a circulação de materiais e perpetua a dependência de recursos primários, enquanto a reciclagem de alumínio se destaca como a estratégia mais eficiente para preservação dos recursos hídricos e redução do consumo de água doce ao longo do ciclo de vida do produto.

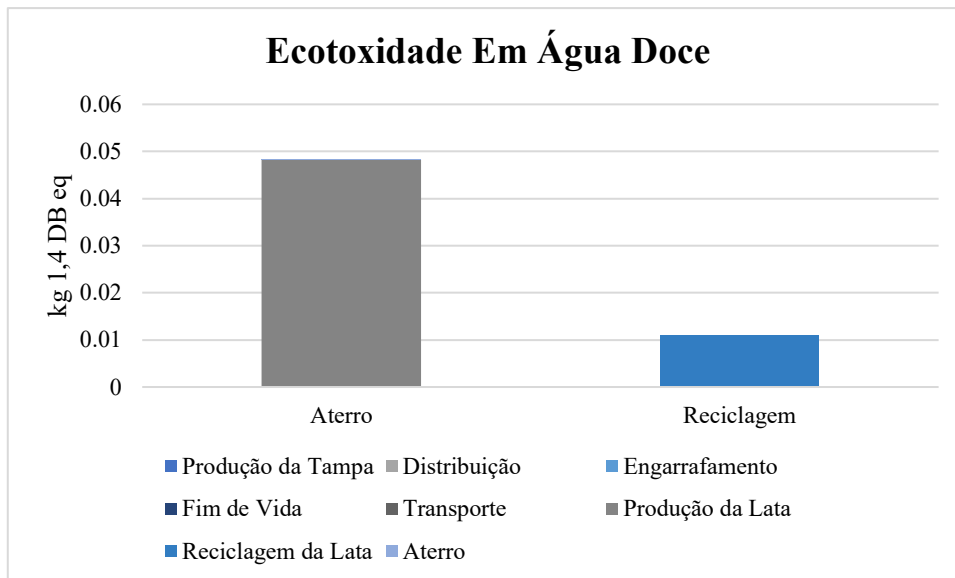


Figura 26: Estimativa do Impacte na categoria EAD dos cenários de fim de vida para as embalagens de lata

Na análise da Ecotoxicidade em Água Doce, os resultados evidenciam diferenças marcantes entre os cenários de fim de vida das embalagens metálicas, conforme ilustrado na Figura 26. O aterro sanitário apresentou o maior potencial de ecotoxicidade, resultado da lixiviação de íons metálicos e traços de metais pesados como alumínio, ferro, cobre e zinco provenientes das ligas metálicas e dos revestimentos internos das latas. Durante a percolação do chorume, esses contaminantes podem alcançar o solo e o lençol freático, sobretudo quando os sistemas de drenagem ou tratamento são ineficientes. Tal processo acarreta efeitos tóxicos crônicos sobre organismos aquáticos, afetando peixes, algas e microcrustáceos, e comprometendo o equilíbrio ecológico dos corpos hídricos.

Em contraste, o cenário de reciclagem apresentou valores substancialmente inferiores de ecotoxicidade, configurando-se como a alternativa ambientalmente mais favorável. A recuperação de sucata metálica evita etapas críticas do processo primário, como a extração da bauxita e o refino da alumina, que são reconhecidamente responsáveis pela libertação de metais, fluoretos e resíduos alcalinos em efluentes líquidos, alterando o pH e degradando a qualidade da água. Nas fases de fusão e refino secundário, embora ainda haja consumo energético e geração de resíduos, o controlo industrial mais eficiente e a menor carga de emissões conferem à reciclagem um desempenho hídrico e ecotóxico claramente superior.

Além disso, o reaproveitamento do alumínio reciclado gera créditos ambientais significativos por evitar a necessidade de mineração e beneficiamento, contribuindo simultaneamente para a preservação dos recursos hídricos e a redução do risco de toxicidade aquática ao longo do ciclo de vida do produto.

Em síntese, o aterro sanitário representa uma rota de alto risco para a contaminação hídrica devido à lixiviação de metais e ao potencial de falhas no tratamento de efluentes, enquanto a reciclagem do alumínio destaca-se como uma estratégia de baixo impacto ecotóxico, alinhada aos princípios da circularidade e da eficiência no uso de recursos.

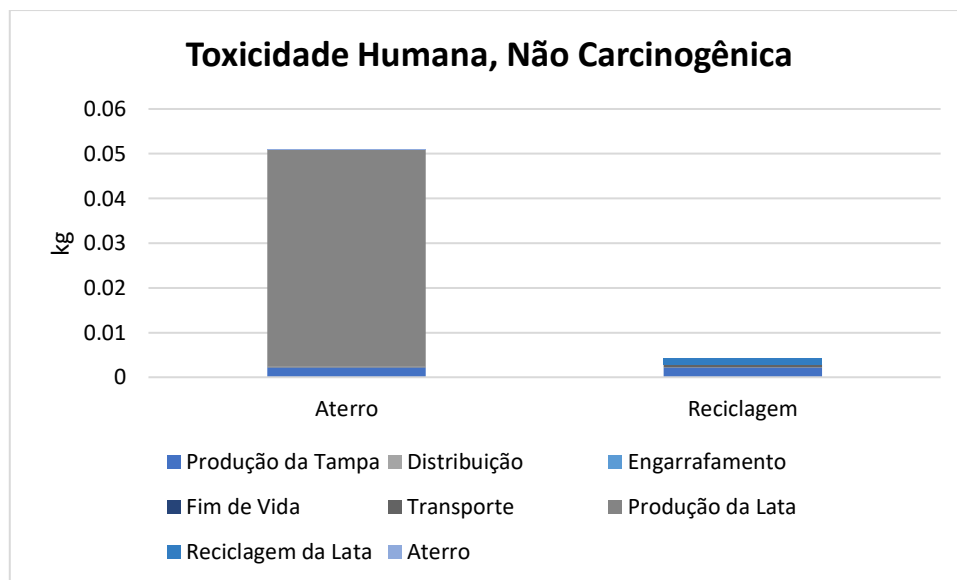


Figura 27: Estimativa do Impacte na categoria TH nc de fim de vida para as embalagens de lata

Os resultados obtidos para a Toxicidade Humana Não Carcinogênica evidenciam diferenças expressivas entre os cenários de aterro sanitário e reciclagem das embalagens metálicas, conforme apresentado na Figura 27. O aterro revelou o maior potencial de impacto nesta categoria, consequência da lixiviação de compostos metálicos solúveis presentes nas ligas e revestimentos das latas. Elementos como alumínio, manganês, ferro e zinco podem migrar para o percolado sob condições de elevada humidade e pH ácido, atingindo o solo e as águas subterrâneas. Apesar das concentrações libertadas tenderem a ser baixas, a bioacumulação e a persistência ambiental desses metais elevam o risco de exposição crónica em áreas próximas a aterros com barreiras geossintéticas ou drenagem ineficientes.

Adicionalmente, as operações de transporte, compactação e cobertura de resíduos contribuem para a emissão difusa de partículas metálicas e gases secundários, ampliando a exposição potencial das populações locais. Esses fatores, em conjunto, reforçam o carácter localmente concentrado e de longo prazo do impacto associado ao aterro, particularmente em contextos com gestão de efluentes deficiente.

Por outro lado, o cenário de reciclagem do alumínio apresenta valores substancialmente inferiores de toxicidade humana, refletindo a redução das emissões

tóxicas e o menor uso de alumínio primário. O processo de refusão secundária é conduzido sob condições industriais controladas, com sistemas de filtragem e tratamento de efluentes gasosos e líquidos que limitam significativamente a libertação de compostos metálicos. Além disso, a reciclagem gera créditos ambientais por evitar as etapas mais impactantes da cadeia produtiva a extração da bauxita e o refino da alumina, reconhecidas por elevadas emissões de fluoretos, óxidos metálicos e resíduos perigosos.

Em termos globais, a reciclagem consolida-se como uma estratégia preventiva de baixo impacto toxicológico, ao combinar eficiência energética, redução de emissões e mitigação da exposição ambiental. Já o aterro mantém-se como uma rota de risco elevado e persistente à saúde humana, exigindo sistemas eficazes de impermeabilização, monitorização e tratamento de chorume para conter os efeitos adversos associados à libertação gradual de metais.

4.4 Bag-in-Box

A embalagem BIB não foi modelada quantitativamente nesta etapa da ACV devido à indisponibilidade de dados específicos de inventário no software utilizado. Contudo, informações fornecidas pela empresa produtora permitiram a caracterização técnica do sistema, que apresenta uma estrutura multicamada PET12/ALU7/NY15/PE100, composta pelas seguintes camadas funcionais: PET12 (polietileno tereftalato, 12 μm de espessura), responsável por conferir resistência mecânica, estabilidade térmica e suporte à impressão; ALU7 (folha de alumínio, 7 μm), que atua como barreira a gases, vapor d'água e radiação luminosa, garantindo a preservação do conteúdo; NY15 (camada de náilon – poliamida, 15 μm), cuja função é proporcionar resistência à perfuração e reforço estrutural; e PE100 (polietileno, 100 μm), camada interna em contato direto com o produto, responsável por assegurar impermeabilidade, inércia química e eficiência de vedação térmica.

Considerando o desempenho funcional típico da embalagem BIB e as evidências disponíveis na literatura, é possível inferir que esse sistema apresenta baixo GWP e reduzida formação de partículas finas por UF, quando comparado a embalagens rígidas de vidro. Em determinadas condições, inclusive, o desempenho ambiental do BIB pode ser competitivo ou superior ao do PET reciclado mecanicamente, em virtude da menor massa de material por volume de produto acondicionado e da eficiência logística associada (Kanzig, Anex & Jolliet, 2003).

As principais vantagens ambientais do sistema BIB derivam de sua leveza estrutural e eficiência volumétrica, características que reduzem significativamente os impactos relacionados ao transporte e à energia incorporada por litro de produto. O baixo peso por unidade de volume, resultante da combinação entre o saco interno flexível de polietileno e o cartão externo reciclável, contribui para a diminuição das emissões de CO₂ na cadeia logística, sobretudo quando comparado a garrafas de vidro. Adicionalmente, o cartão reciclável apresenta menor potencial de aquecimento global por quilograma de material em relação ao vidro e ao alumínio, enquanto o saco interno monomaterial tende a possuir menor massa e impactos ambientais mais reduzidos em comparação a embalagens rígidas equivalentes (Kanzig, Anex & Jolliet, 2003).

Entretanto, os benefícios ambientais potenciais da embalagem BIB estão fortemente condicionados à sua composição e ao sistema de gestão de resíduos adotado. A presença de filmes multicamadas com barreiras metálicas, como o alumínio, dificulta o processo de reciclagem e aumenta os impactos ambientais na etapa de fim de vida, devido à complexidade técnica e aos custos elevados associados à separação e recuperação dos materiais constituintes (Xu, Li, Hu, Liu & Geng, 2016). Assim, o desempenho ambiental global da embalagem depende não apenas de sua eficiência durante o uso e transporte, mas também da viabilidade tecnológica das estratégias de reciclagem e reaproveitamento pós-consumo.

4.5 Avaliação Complementar de Embalagens

O aumento das preocupações com a sustentabilidade tem impulsionado a busca por soluções inovadoras para reduzir o impacto ambiental causado pelas embalagens. Nesse contexto, destaca-se o Circular Packaging Digital Assessment Tool, uma iniciativa da The Recycling Partnership, como uma ferramenta estratégica projetada para analisar e aprimorar a reciclabilidade das embalagens. Seu objetivo principal é fornecer avaliações detalhadas sobre o design e os materiais utilizados, identificando áreas de melhoria para promover a circularidade. De acordo com Smith e Johnson (2022), "ferramentas digitais de avaliação são fundamentais para orientar a transição para embalagens mais sustentáveis, permitindo análises baseadas em dados e recomendações direcionadas". Ao oferecer insights precisos, essa ferramenta auxilia empresas e designers na adoção de práticas alinhadas aos princípios da economia circular, contribuindo para a redução do desperdício e a otimização dos processos de reciclagem.

Diante da urgência de migrar para um modelo de produção e consumo mais sustentável, compreender e aplicar as orientações desse recurso torna-se essencial para promover a reciclagem eficaz e minimizar os impactos ambientais da indústria de embalagens. Um exemplo prático dessa aplicação foi a utilização da ferramenta na avaliação de cada embalagem de azeite, tem demonstrando seu potencial para transformar o design e a gestão de embalagens em direção a um futuro mais circular e sustentável.

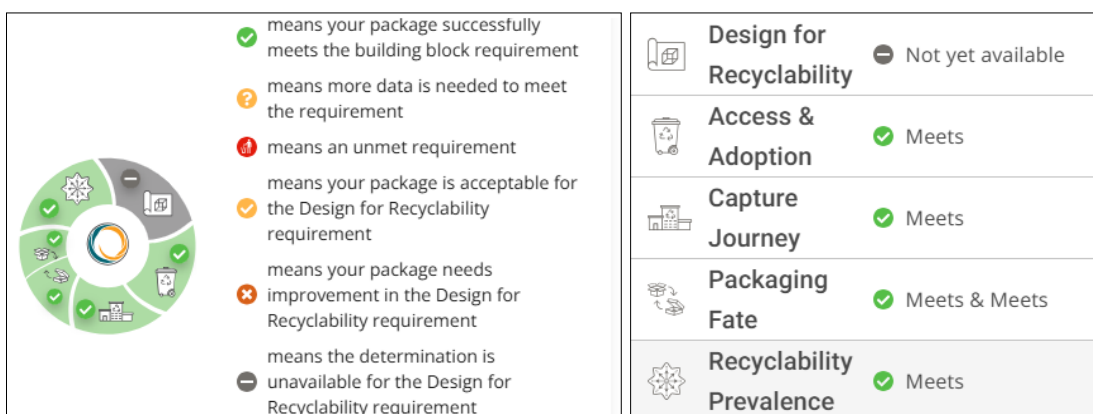


Figura 28: Embalagem de Vidro Fonte: The Recycling Partnership (2022).

A aplicação da Ferramenta de Avaliação de Circularidade de Embalagens (*Circular Packaging Assessment Tool*), desenvolvida no âmbito da The Recycling Partnership, permitiu obter informações relevantes sobre a reciclabilidade da embalagem de vidro de azeite, evidenciando desafios e oportunidades de melhoria no seu design e ciclo de vida. Esta ferramenta digital integra diferentes módulos de análise, designadamente:

- Design para a Reciclabilidade (*Design for Recyclability*);
- Acesso e Adoção (*Access and Adoption*);
- Captura e Percurso (*Capture and Journey*);
- Destino da Embalagem (*Packaging Fate*);
- Prevalência de Reciclabilidade (*Recyclability Prevalence*).

Estes cinco eixos de avaliação estão representados na Figura 28 Embalagem de Vidro, a qual sintetiza graficamente o desempenho da embalagem face aos critérios de circularidade estabelecidos pela ferramenta.

A análise resultante da aplicação da ferramenta revelou insights importantes sobre a reciclabilidade da embalagem de vidro, destacando as áreas prioritárias para otimização. A seguir, apresentam-se os principais resultados e recomendações, organizados de acordo com os eixos temáticos que compõem o modelo:

Design para a Reciclabilidade (*Design for Recyclability*)

A reciclabilidade das embalagens de azeite ainda carece de diretrizes específicas no âmbito da Avaliação da Circularidade de Embalagens. Para colmatar essa lacuna, recomenda-se a análise dos elementos essenciais da circularidade, com base no modelo *Pathway to Circularity Building Blocks*. Componentes como adesivos, metais e corantes podem afetar negativamente a capacidade de reciclagem, exigindo atenção na fase de design. Além disso, embalagens de fibra devem ser avaliadas através da ferramenta *ReMA Fiber Recycling Readiness Tool*, de modo a minimizar contaminantes e garantir maior compatibilidade com os processos de reciclagem.

Acesso e Adoção (Access and Adoption)

Para que uma embalagem seja considerada reciclável, é necessário que pelo menos 60% da população tenha acesso à infraestrutura de recolha e reciclagem do material em questão. A inclusão de rotulagem clara e precisa sobre a reciclabilidade da embalagem é fundamental para aumentar a participação dos consumidores e reduzir a contaminação dos fluxos de reciclagem.

Captura e Percurso (Capture and Journey)

A embalagem deve ser corretamente classificada e separada numa Instalação de Recuperação de Materiais (MRF), evitando o seu descarte como resíduo. Para garantir uma triagem eficaz, recomenda-se a realização de testes de classificação, alinhados com as normas do *Institute of Scrap Recycling Industries (ISRI)* e com programas de certificação específicos, como o *Glass MRF Certification Program*.

Destino da Embalagem (Packaging Fate)

A indústria tem vindo a desenvolver diretrizes específicas para a incorporação de material reciclado pós-consumo nas embalagens de vidro. Recomenda-se o aumento progressivo dessa proporção, com o objetivo de atingir ou superar 90% de conteúdo reciclado. Recursos como o *Programa Demand Champions* e o banco de dados *Plastic IQ* podem apoiar a implementação dessas melhorias.

Prevalência de Reciclabilidade (Recyclability Prevalence)

Para ser considerada reciclável, a embalagem deve atender ao critério de que pelo menos 75% das embalagens similares na mesma categoria sejam efetivamente recicláveis. A validação dessa condição pode ser realizada com base em dados independentes da indústria e informações de mercado. Além disso, o fortalecimento dos mercados finais de reciclagem, especialmente no setor do vidro, é essencial para assegurar um ciclo produtivo mais eficiente e sustentável das embalagens de azeite.

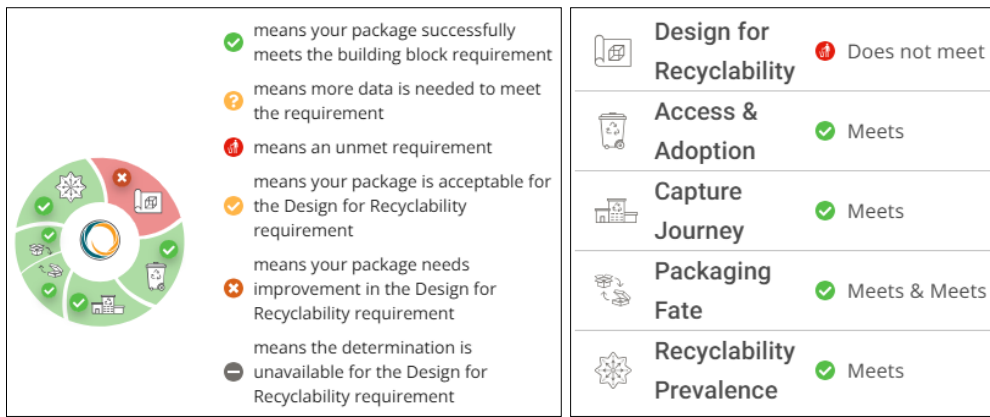


Figura 29 Embalagem de PET. Fonte: The Recycling Partnership (2022).

A aplicação da Ferramenta de Avaliação de Circularidade de Embalagens (*Circular Packaging Assessment Tool*) à embalagem de PET revelou desafios e oportunidades relevantes para a melhoria da reciclabilidade das embalagens de azeite. Esta ferramenta, desenvolvida pela The Recycling Partnership, permite avaliar a circularidade das embalagens com base em cinco eixos principais:

A Figura 29 embalagem de PET apresenta graficamente o desempenho desta tipologia de embalagem em relação aos critérios definidos pela ferramenta, evidenciando o seu grau de conformidade com os requisitos de circularidade.

Com base nessa avaliação, foram identificadas as principais recomendações e oportunidades de otimização, organizadas segundo os eixos temáticos do modelo:

Design para a Reciclabilidade (Design for Recyclability)

A reciclabilidade das embalagens de azeite em PET ainda carece de diretrizes específicas no âmbito da Avaliação da Circularidade de Embalagens. De acordo com o *Guia de Design* da *Association of Plastic Recyclers (APR)*, a embalagem foi classificada como “tolerada, mas requer melhorias”. Elementos como cores escuras (pretas ou opacas), valor de luminosidade $L > 40$ ou refletância NIR $> 10\%$ podem comprometer a triagem e a eficiência do processo de reciclagem. Para aperfeiçoar o design, recomenda-se a consulta ao *APR Design Guide*, que fornece orientações detalhadas sobre componentes preferenciais e materiais a evitar, promovendo a compatibilidade com as linhas de reciclagem existentes.

Acesso e Adoção (Access and Adoption)

Para que uma embalagem seja efetivamente reciclável, é necessário que pelo menos 60% da população tenha acesso à infraestrutura de reciclagem do material correspondente.

Os dados sobre cobertura e acesso são disponibilizados pelo *National Recycling Database*

da *The Recycling Partnership*. Além disso, o setor de embalagens deve assegurar a conformidade com os requisitos legais de rotulagem, estabelecidos pela *Comissão Federal de Comércio dos EUA*. A rotulagem clara e padronizada sobre a reciclabilidade da embalagem é essencial para incentivar a participação do consumidor e reduzir a contaminação dos fluxos de reciclagem.

Captura e Percurso (Capture and Journey)

A embalagem deve ser corretamente identificada e separada nas Instalações de Recuperação de Materiais (MRF), evitando o descarte como resíduo indiferenciado. Para garantir a eficiência da triagem, recomenda-se a realização de testes de classificação, de acordo com os padrões definidos pelo *Institute of Scrap Recycling Industries (ISRI)*. A adoção de programas de certificação, como o *Glass MRF Certification Program*, pode contribuir para a padronização dos processos e para a melhoria da rastreabilidade dos fluxos de materiais.

Destino da Embalagem (Packaging Fate)

Embora ainda não existam diretrizes universais específicas para o PET, recomenda-se consultar o *Glass Packaging Institute* e outras entidades de referência para orientações técnicas sobre boas práticas de reciclagem. A incorporação de material reciclado pós-consumo (PCR) é altamente recomendada para aumentar a sustentabilidade do ciclo de vida do PET. Nos casos em que o conteúdo reciclado já atinge cerca de 90%, podem ser exploradas estratégias de melhoria de qualidade e aumento da pureza do material reciclado. Ferramentas como o *Plastic IQ*, o *Programa Demand Champions* e o *Guia de Design para Conteúdo Reciclado* da *Sustainable Packaging Coalition* são instrumentos úteis para apoiar esse processo.

Prevalência de Reciclabilidade (Recyclability Prevalence)

Para que uma embalagem seja considerada reciclável, pelo menos 75% das embalagens semelhantes na mesma categoria devem ser recicláveis. Embalagens que não atendem a esse critério contribuem para contaminação dos fluxos de reciclagem e reduzem a confiança do consumidor no sistema. A validação desse requisito pode ser feita com base em dados independentes da indústria e relatórios de participação de mercado. Além disso, o fortalecimento dos mercados finais para o PET reciclado é essencial para assegurar um ciclo produtivo mais eficiente e sustentável para as embalagens de azeite.

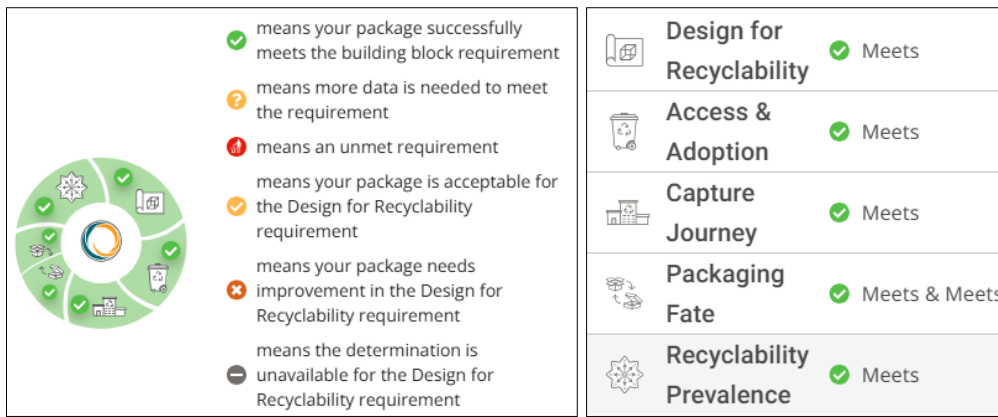


Figura 30 Embalagem de Lata. Fonte: The Recycling Partnership (2022)

A aplicação da Ferramenta de Avaliação de Circularidade de Embalagens (*Circular Packaging Assessment Tool*), desenvolvida pela The Recycling Partnership, proporcionou insights valiosos sobre a reciclabilidade das embalagens de alumínio utilizadas para azeite, destacando o seu desempenho nos eixos de análise e as oportunidades de otimização para um ciclo de vida mais sustentável.

A Figura 30 embalagem de Alumínio apresenta graficamente o resultado da avaliação da embalagem de alumínio de azeite, evidenciando o cumprimento dos critérios definidos pela ferramenta e o seu posicionamento global em relação aos requisitos de circularidade.

Com base nessa avaliação, foram identificados os principais pontos fortes e as áreas de melhoria, que se encontram detalhados a seguir segundo os eixos temáticos que compõem o modelo.

Design para a Reciclabilidade (Design for Recyclability)

A embalagem de alumínio para azeite foi desenvolvida em conformidade com o *Guia de Design da Associação de Alumínio (Aluminum Association Design Guide)* e classificada como “preferida” na Avaliação de Embalagem Circular. Para reforçar a sustentabilidade do sistema, recomenda-se a incorporação de material reciclado pós-consumo (PCR), aumentando a proporção de alumínio secundário no processo produtivo. Ferramentas como o *Plastic IQ Database*, o *Programa Demand Champions* e o *Guia de Design para Conteúdo Reciclado da Sustainable Packaging Coalition* podem apoiar a implementação dessas melhorias.

Acesso e Adoção (Access and Adoption)

A embalagem cumpre os requisitos da Comissão Federal de Comércio dos Estados Unidos (FTC), garantindo que pelo menos 60% da população tenha acesso à infraestrutura de reciclagem adequada ao alumínio. Os dados de acesso são obtidos a

partir do *National Recycling Database* da *The Recycling Partnership*. Para aumentar a participação do consumidor e reduzir a contaminação dos fluxos de reciclagem, recomenda-se a inclusão de rotulagem clara e informativa sobre a reciclabilidade da embalagem. Ferramentas complementares, como o *Recycling Check* da *The Recycling Partnership* e o programa de rótulos *How2Recycle®* da *Sustainable Packaging Coalition*, podem facilitar essa comunicação.

Captura e Percurso (Capture and Journey)

A embalagem cumpre os requisitos de classificação e separação eficiente em Instalações de Recuperação de Materiais (MRF), o que assegura o seu encaminhamento correto para reciclagem. Para prevenir desvios para aterros, recomenda-se a realização de testes de triagem e separação, seguindo protocolos como o *MRF Capture Rate Limit and Protocol*, garantindo a eficiência e rastreabilidade do processo de reciclagem.

Destino da Embalagem (Packaging Fate)

A embalagem de alumínio cumpre as especificações técnicas do Institute of Scrap Recycling Industries (ISRI), o que confirma a sua adequação ao processamento e à fusão em sistemas de reciclagem industrial. Os mercados finais para o alumínio reciclado são considerados estáveis e economicamente viáveis, o que reforça a sustentabilidade do material e incentiva a sua valorização no ciclo produtivo. Para manter um fluxo limpo de material reciclado, recomenda-se a adesão às práticas promovidas pela *Glass Recycling Coalition* e outras entidades voltadas à qualidade do material pós-consumo.

Prevalência de Reciclabilidade (Recyclability Prevalence)

A embalagem de alumínio para azeite enquadra-se na categoria “lata de alumínio para bebidas”, atendendo ao requisito de prevalência mínima de 75% de reciclabilidade dentro da sua categoria de produto. Essa elevada taxa contribui para evitar a contaminação dos fluxos de reciclagem e fortalecer a confiança do consumidor no sistema. A validação da reciclabilidade pode ser comprovada através de relatórios setoriais e dados de participação de mercado, assegurando a rastreabilidade dos resultados. O fortalecimento contínuo dos mercados finais de alumínio reciclado representa, portanto, um passo essencial para tornar o ciclo das embalagens de azeite mais eficiente e sustentável.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A fim de sintetizar e comparar o desempenho ambiental das diferentes tipologias de embalagens de azeite e seus cenários de fim de vida, elaborou-se a Figura 31, que apresenta as principais categorias de impacto ambiental normalizadas em percentagem. Essa abordagem permite avaliar de forma proporcional a contribuição relativa de cada material vidro, PET e lata considerando os destinos finais analisados (reciclagem, aterro, incineração e reuso).

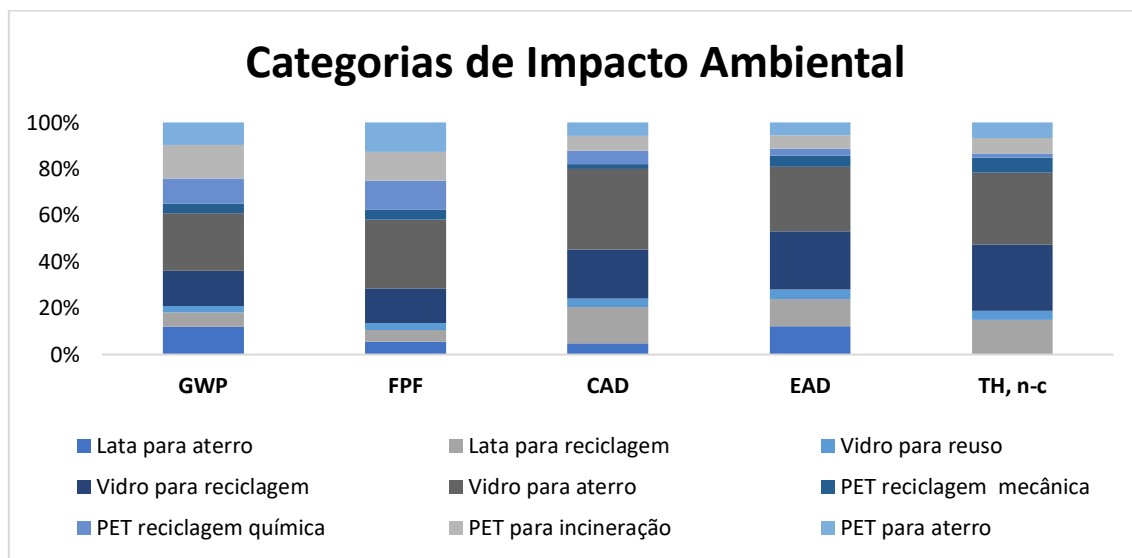


Figura 31 Gráfico categorias de impacto ambiental todas as embalagens.

Os resultados apresentados no gráfico foram convertidos para valores percentuais, permitindo uma comparação direta e proporcional entre as categorias de impacto ambiental. Essa normalização possibilita uma melhor visualização da contribuição relativa de cada tipo de embalagem e cenário de fim de vida: reciclagem, aterro, incineração e reuso nas principais categorias de impacto, como GWP, FPF, CAD, EAD TH, n-c.

Observa-se que a embalagem de vidro tende a apresentar maior contribuição percentual nas categorias associadas ao consumo energético e emissões de gases de efeito estufa, reflexo direto de seu elevado peso e da energia necessária para a fusão do material. Por outro lado, as embalagens de alumínio e PET demonstram desempenho mais equilibrado, especialmente nos cenários de reciclagem, onde o reaproveitamento do material reduz significativamente os impactos associados à produção primária.

A conversão dos resultados em percentuais evidencia ainda a importância do fim de vida da embalagem: a reciclagem do alumínio e do PET gera créditos ambientais expressivos, enquanto o aterro sanitário contribui de forma desproporcional para

categorias como toxicidade humana e ecotoxicidade aquática, devido à lixiviação de metais e à degradação incompleta de polímeros.

Essas tendências estão alinhadas aos resultados reportados por Navarro et al. (2018), que destacam que o impacto da embalagem pode representar de 2% a 196% do impacto total do ciclo de vida do azeite virgem, dependendo da categoria e do material analisado. O estudo também reforça que a redução do peso do vidro e o aumento da fração reciclada são medidas eficazes de ecodesign para mitigar esses impactos e promover a circularidade dos sistemas de embalagem.

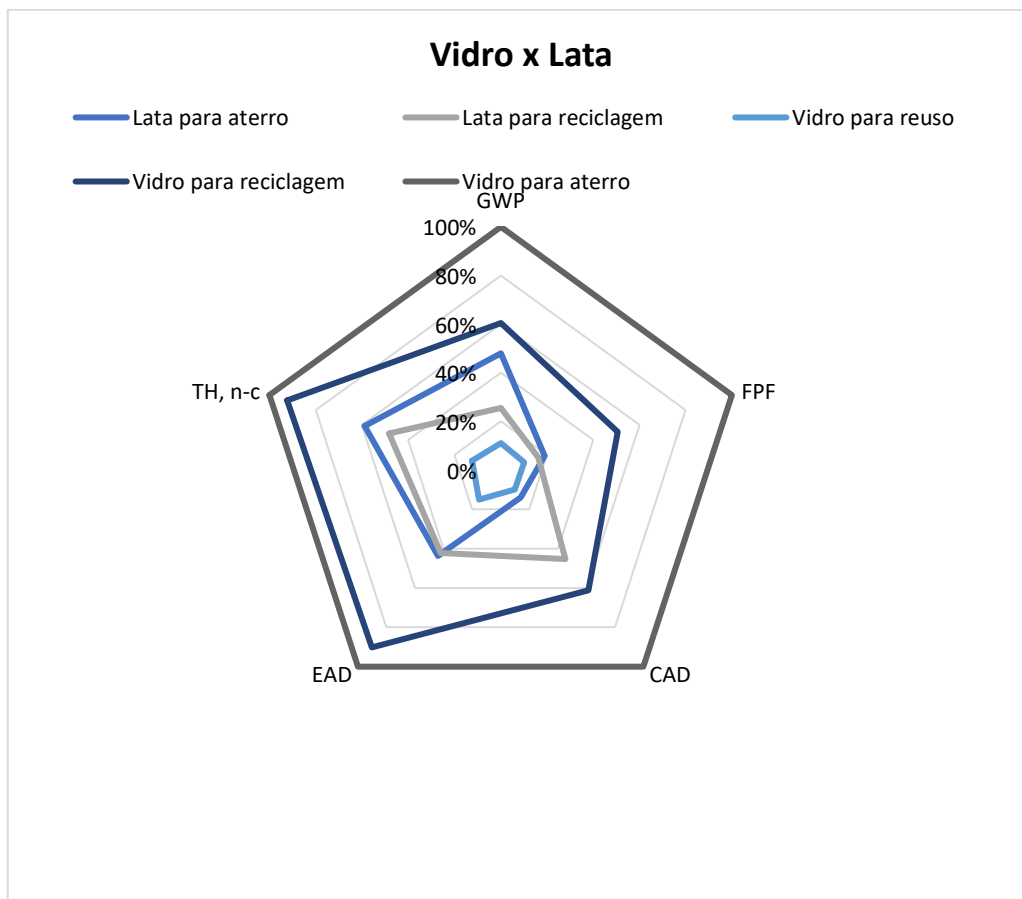


Figura 32 Gráfico Embalagem de Vidro x Lata.

Para fins comparativos, a garrafa de vidro no cenário de aterro foi adotada como referência (padrão), e, a partir dela, foram determinadas as variações percentuais relativas das demais alternativas de embalagem e cenários de fim de vida apresentada na figura 32. Essa abordagem permitiu uma análise visual e proporcional dos impactos ambientais por categoria, conforme representado nos gráficos tipo radar, evidenciando as diferenças entre Vidro x Lata e Vidro x PET.

De modo geral, observa-se que o vidro destinado ao aterro apresenta os maiores impactos relativos em todas as categorias avaliadas: PAC, FPF, CAD, EAD e TH,n-c.

Essa tendência decorre do alto peso específico e do elevado consumo energético associado à produção e transporte de embalagens de vidro, corroborando os achados de Ferrara e De Feo (2023), que identificaram reduções superiores a 40% no impacto total quando a embalagem de vidro foi substituída por garrafas de PET 100% reciclado (R-PET).

No comparativo entre vidro e lata, o cenário de reciclagem da lata demonstra redução significativa nas categorias de PAC e EAD, resultado do alto valor de recuperação do alumínio, que gera créditos ambientais expressivos pela substituição da produção primária. Contudo, no cenário de aterro, a lata apresenta incremento relevante em TH,n-c, devido à lixiviação de metais pesados no percolado, como alumínio e manganês, potencialmente tóxicos à saúde humana aspecto também apontado pela ATSDR (2012) e reforçado por Navarro et al. (2018) ao discutirem os efeitos da gestão inadequada do fim de vida das embalagens metálicas.

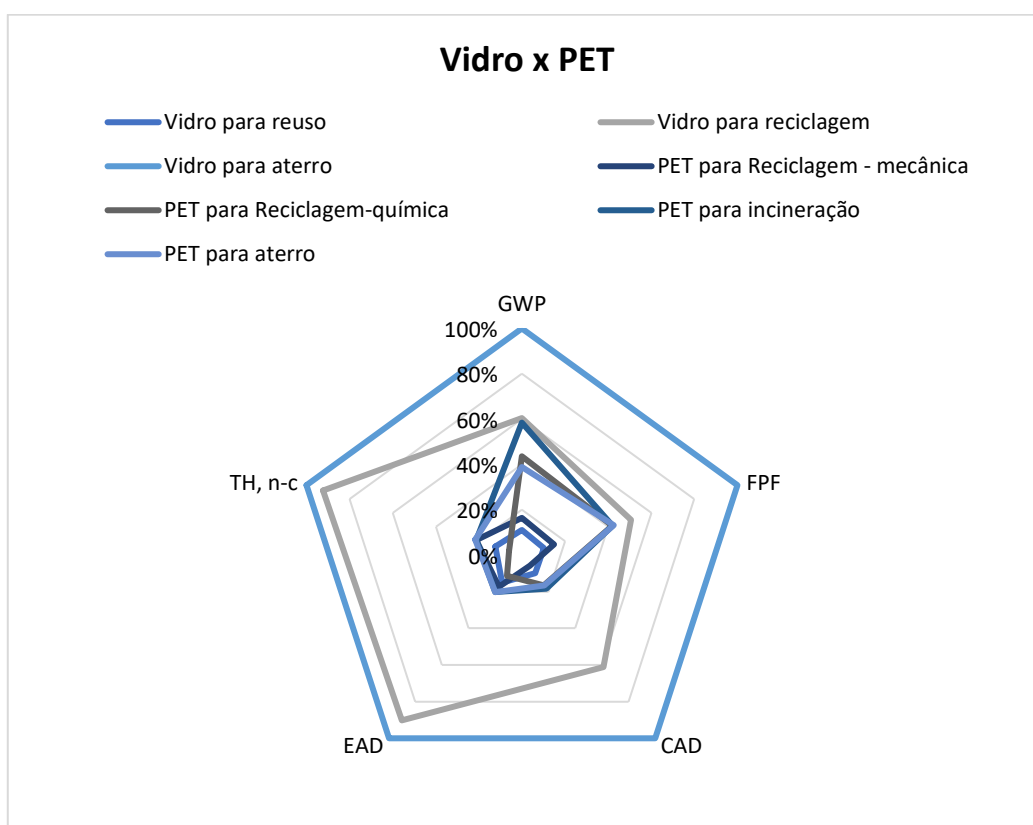


Figura 33 Grafico VidroxPET.

A análise comparativa entre embalagens de vidro e PET na figura 33 que evidencia contrastes marcantes nas principais categorias de impacto ambiental, especialmente quando a garrafa de vidro em cenário de aterro é utilizada como referência padrão para normalização dos resultados. Esse procedimento permite visualizar, de forma

percentual, o desempenho relativo das demais alternativas, evidenciando a magnitude dos ganhos ou perdas ambientais associados à reciclagem e ao reuso dos materiais.

De modo geral, o vidro apresenta desempenho inferior ao PET em todas as categorias avaliadas, com destaque para o GWP e o CAD. Essa tendência é explicada pelo alto peso específico do vidro e pela elevada demanda energética nos processos de fusão e moldagem, o que contribui significativamente para as emissões de CO₂ e o uso de energia fóssil. Além disso, o transporte de garrafas de vidro, devido à sua densidade e fragilidade, amplia o impacto logístico por UF. Tais resultados estão em consonância com Ferrara e De Feo (2023), que identificaram que as garrafas de vidro geram entre 790 e 1137 kg CO₂ eq, enquanto o R-PET apresenta valores significativamente inferiores, variando de 459 a 634 kg CO₂ eq.

Nas categorias FPF e EAD, o PET reciclado mecanicamente se destaca como a alternativa de menor impacto, resultado da menor massa total da embalagem, da eficiência energética dos processos de reciclagem e da ausência de combustão direta. Por outro lado, o vidro, mesmo quando destinado à reciclagem, mantém uma contribuição mais elevada nessas categorias, devido ao gasto energético na fusão e às emissões associadas aos fornos industriais. Conforme destacado por Navarro et al. (2018), a reciclagem do vidro apresenta benefícios ambientais apenas quando há elevadas taxas de recuperação e otimização dos processos de coleta, sendo que os ganhos são rapidamente neutralizados quando há perdas no ciclo de retorno.

Em relação à TH_{n-c}, o PET reciclado apresenta desempenho amplamente superior, uma vez que não envolve lixiviação de metais pesados durante o uso ou descarte, ao contrário do vidro e de outras embalagens metálicas. Esse resultado é consistente com as observações de Navarro et al. (2018), que destacam que a toxicidade relacionada às embalagens está frequentemente associada à liberação de íons metálicos e aditivos em cenários de disposição inadequada.

A reciclagem química do PET, embora apresente um leve aumento de impacto em PAC e CAD devido ao uso intensivo de reagentes e energia, ainda se mostra vantajosa frente ao vidro aterrado, especialmente por reintroduzir o polímero no ciclo produtivo e reduzir a dependência de matéria-prima virgem. Essa constatação reforça o argumento de Ferrara e De Feo (2023) de que a substituição parcial de vidro por PET reciclado representa uma estratégia eficaz para a mitigação dos impactos ambientais do setor de azeites, desde que acompanhada por sistemas eficientes de coleta e reciclagem.

Em síntese, os resultados obtidos neste estudo corroboram amplamente os achados de Navarro et al. (2018) e Ferrara e De Feo (2023), confirmando que o PET reciclado, especialmente o R-PET, apresenta o melhor desempenho ambiental global entre as alternativas analisadas. Sua leveza, eficiência energética e alta reciclabilidade o posicionam como a opção mais sustentável para o envase de azeite virgem extra, enquanto o vidro, embora valorizado pela percepção de qualidade, mantém elevada pegada ambiental, sobretudo quando destinado ao aterro ou submetido a ciclos de reciclagem de baixa eficiência.

6. CONCLUSÃO

A ACV das diferentes embalagens de azeite vidro, PET, lata e BIB permitiu compreender, de forma abrangente, o desempenho ambiental de cada sistema ao longo de todas as etapas do ciclo de vida, desde a produção até ao fim de vida. Os resultados obtidos evidenciam que as escolhas de material, design e destinação final exercem influência determinante sobre os impactes ambientais globais e específicos, reforçando a importância da embalagem como elemento estratégico para a sustentabilidade do setor oleícola.

De modo geral, verificou-se que a embalagem de vidro, amplamente utilizada no envase de azeites virgem extra, apresenta maior carga ambiental em praticamente todas as categorias de impacto analisadas, sobretudo no potencial de aquecimento global e no consumo de água doce. Esse desempenho está associado ao alto peso específico do vidro, ao elevado consumo energético nos processos de fusão e moldagem e às emissões provenientes do transporte. Embora o vidro apresente elevada reciclabilidade e boa estabilidade química, o seu impacto por UF mantém-se superior ao de materiais mais leves, como o PET e o alumínio.

As embalagens de PET demonstraram melhor desempenho ambiental global, destacando-se nos cenários de reciclagem mecânica e química. O R-PET revelou reduções expressivas nas emissões de gases com efeito de estufa, no consumo energético e nos impactes sobre a ecotoxicidade aquática, refletindo um ciclo produtivo mais eficiente e circular. Esse desempenho está relacionado à baixa massa do material, à eficiência energética dos processos de reprocessamento e à redução da dependência de matéria-prima virgem. Contudo, verificou-se que a incineração e o aterro de resíduos de PET originam impactes significativos em toxicidade humana e ecotoxicidade, o que reforça a importância de gestão adequada dos resíduos plásticos e do fortalecimento das cadeias de reciclagem.

A embalagem de lata apresentou um comportamento intermédio, com desempenho favorável no cenário de reciclagem, devido à alta taxa de recuperação do alumínio secundário, que gera créditos ambientais relevantes. A reciclagem do metal reduz substancialmente o consumo de energia em comparação com a produção primária, tornando essa opção altamente eficiente do ponto de vista energético e climático. Contudo, no cenário de aterro, a lixiviação de metais demonstrou potencial de impacto à

saúde humana e aos ecossistemas aquáticos, evidenciando que o bom desempenho ambiental da lata depende da existência de sistemas de reciclagem eficazes e controlados.

A embalagem BIB, embora não tenha modelada quantitativamente, apresentou-se teoricamente promissora. A sua leveza, eficiência volumétrica e baixo consumo de material por litro de produto contribuem para reduções expressivas nas emissões e no consumo energético, sobretudo quando comparada às embalagens rígidas. No entanto, a complexidade dos filmes multicamadas, geralmente compostos por polímeros e alumínio, limita a reciclabilidade e aumenta os impactos no fim de vida. A sua sustentabilidade depende, portanto, do avanço tecnológico no desenvolvimento de soluções monomateriais e na eficiência dos sistemas de separação de resíduos.

De forma transversal, as análises demonstram que o cenário de reciclagem é o fator mais determinante para o desempenho ambiental das embalagens, reduzindo de forma significativa os impactos nas categorias de aquecimento global, acidificação e toxicidade humana. A conversão dos resultados em valores relativos, tomando a garrafa de vidro em aterro como referência, evidenciou que as embalagens de PET e alumínio reciclados representam as estratégias mais eficazes para mitigar emissões, otimizar o uso de recursos e preservar a qualidade ambiental. Em contrapartida, o aterro sanitário, para qualquer material, revelou-se o cenário mais impactante, associado à emissão de gases, lixiviação de metais e geração de efluentes tóxicos.

Em síntese, conclui-se que o PET reciclado mecanicamente apresenta o melhor desempenho ambiental global, combinando baixa pegada climática, menor toxicidade e elevada circularidade. A reciclagem do alumínio destaca-se em termos energéticos e de recuperação de valor, enquanto o vidro, apesar das suas qualidades funcionais e culturais, necessita de melhorias logísticas e do aumento das taxas de reutilização para se tornar ambientalmente competitivo. Já o BIB configura-se como uma opção de transição, com potencial para evoluir mediante inovações tecnológicas na sua estrutura e nos sistemas de reciclagem.

Assim, esta análise confirma que a escolha do material de embalagem é um fator decisivo para a sustentabilidade do azeite virgem extra, e que a transição para modelos circulares de produção e consumo, baseados em reciclagem, reutilização e redução de massa, representa o caminho mais eficaz para minimizar os impactos ambientais do setor. A implementação de políticas públicas que incentivem o ecodesign, a reciclagem eficiente e a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, distribuidores e consumidores é essencial para consolidar um sistema de embalagens verdadeiramente

sustentável, alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e aos princípios da Economia Circular.

REFERÊNCIAS

Accorsi, R., Versari, L., & Manzini, R. (2015). Glass vs. plastic: Life cycle assessment of extra-virgin olive oil bottles in global supply chains. **Sustainability**, *7*(3), 2818–2840.

Alsheyab, M. A. T. (2021). Recycling of construction and demolition waste and its impact on climate change and sustainable development. **International Journal of Environmental Science and Technology**, *19*(3), 2129–2138.

Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification: A review. **Waste Management**, *32*(4), 625–639.

Babaei, M., Jalilian, M., & Shahbaz, K. (2024). Chemical recycling of polyethylene terephthalate: A mini-review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, *12*(3), 112507.

Bakker, C. A., Wever, R., Teoh, C., & De Clercq, S. (2009). *Designing cradle-to-cradle products: A reality check*. Delft University of Technology.

Baldam, R. (2020). *Workshop de bibliometria: Biblioshiny – Science Mapping* [Material de workshop]. Universidade Federal do Espírito Santo.

Barão, M. Z. (2011). *Embalagens para produtos alimentícios*. Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR).

Bezeraj, E., Debrie, S., Arraez, F. J., Reyes, P., Van Steenberge, P. H. M., D'hooge, D. R., & Edeleva, M. (2025). State of the art of industrial mechanical recycling of PET: Technologies, contamination impact, and decision guidelines. **RSC Sustainability**, *3*(5), 1996–2047.

Campos, A. Q., & Dias, A. R. (2019). Sintaxe visual, design e comunicação publicitária das marcas comerciais: A construção de significados. **Actas de Diseño**, *28*, 116–122.

Cesar, A. P., de Paula, D. A., & Krom, V. (s.d.). *Importância da reciclagem do vidro*. Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento – Universidade do Vale do Paraíba.

Cherubini, F., Bargigli, S., & Ulgiati, S. (2009). Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration. **Energy**, *34*(3), 211–220.

Cho, Y., Withana, P. A., Rhee, J. H., Lim, S. T., Lim, J. Y., Park, S. W., & Ok, Y. S. (2024). Achieving the sustainable waste management of medical plastic packaging using a life cycle assessment approach. **Heliyon**, *10*(19), e38185.

Conselho Oleícola Internacional. (s.d.). *Campanha 2020/21: Produção em queda, consumo em alta*.

Cunha, M. S. V. da. (2014). *Análise do ciclo de vida do azeite: Caso de estudo do azeite de Trás-os-Montes* [Dissertação de Mestrado]. ESA-IPB.

Delgado, C., Gómez-Rico, A., & Guinard, J.-X. (2013). Packaging and labeling on consumer preferences, purchase intentions, and expectations for extra virgin olive oil. **Food Research International**, **54**(1), 1497–1503.

Ecochain. (2024, junho 10). *Coca-Cola's first LCA in 1969 — A brief history of LCA*.

Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Completing the picture: How the circular economy tackles climate change*. Ellen MacArthur Foundation.

European Aluminium Association. (2021). *The sustainability of aluminium packaging: Recycling and carbon footprint reduction*.

European Commission. (2008). *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives*. **Official Journal of the European Union**, **L 312**, 3–30.

European Commission. (2015). *Closing the loop: An EU action plan for the circular economy*.

European Environment Agency. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: Technical guidance to prepare national emission inventories*. Publications Office of the European Union.

European Glass Federation. (2021). *Glass packaging: Environmental and economic impact report*.

Ferrara, C., & De Feo, G. (2023). Comparative life cycle assessment of two different packaging systems for extra virgin olive oil: Glass bottle vs. 100% recycled PET bottle. **Sustainability**.

Foteinis, S., & Chatzisyneon, E. (2016). Environmental sustainability of olive oil production: A comparative life cycle assessment study. **Journal of Cleaner Production**, **139**, 401–410.

Gallego-Schmid, A., Mendoza, J. M. F., & Azapagic, A. (2019). Environmental impacts of take-away food containers. **Journal of Cleaner Production**, **211**, 415–427.

Giovanis, E. (2014). *Relationship between recycling rate and air pollution in the state of Massachusetts (MPRA Paper No. 64403)*. MPRA.

Giusti, L. (2009). A review of waste management practices and their impact on human health. **Waste Management**, **29**(8), 2227–2239.

Guiso, A., Parenti, A., Masella, P., Guerrini, L., Baldi, F., & Spugnoli, P. (2017). Environmental impact assessment of three packages for high-quality extra virgin olive oil. **Environmental Impact Assessment Review**, **62**, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.09.002>

Haddaway, N. R., Page, M. J., Pritchard, C. C., & McGuinness, L. A. (2022). PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant

flow diagrams with interactivity for optimized digital transparency and open synthesis. **Campbell Systematic Reviews**, **18**(2), e1230.

Hu, Y., Bakker, M. C. M., & de Heij, P. G. (2011). Recovery and distribution of incinerated aluminum packaging residues. **Waste Management**, **31**(12), 2422–2430.

Hunt, R. G., & Franklin, W. E. (1996). LCA—How it came about: Personal reflections on the origin and the development of LCA in the USA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, **1**(1), 4–7.

Ideia Circular. (2025, novembro). *Cradle to Cradle e economia circular*.

ISO. (2006a). *ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework* (2^a ed.). International Organization for Standardization.

ISO. (2006b). *ISO 14044: Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines* (2^a ed.). International Organization for Standardization.

Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. **Resources, Conservation and Recycling**, **127**, 221–232.

Krell, K., Keller, F., & Grabner, M. (2025). Life cycle greenhouse gas emissions assessment of chemical recycling of post-consumer waste based on pyrolysis. **Waste Management**, **115**, 115090.

Mistretta, M., Guarnaccia, C., & Tedesco, P. (2021). Life cycle assessment of PET and glass olive oil bottles: An environmental comparison. **Sustainability**, **13**(5), 2567.

Navarro, A., Puig, R., Martí, E., Bala, A., & Fullana-i-Palmer, P. (2018). Addressing the relevance of packaging in life cycle assessment of virgin olive oil and the environmental consequences of regulation. **Environmental Management**, **62**, 277–294.

Niero, M., Hauschild, M. Z., Hoffmeyer, S. B., & Olsen, S. I. (2017). Combining eco-efficiency and eco-effectiveness for continuous loop beverage packaging systems: Learnings from the Carlsberg Circular Community. **Journal of Industrial Ecology**, **21**(3), 742–753.

Plastics Europe. (2022). *The impact of plastic packaging on sustainability and the circular economy*.

Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. **Waste Management**, **69**, 24–58.

Rodrigues, M. (s.d.). *A economia circular como um meio para um futuro sustentável*. ISCAP, Instituto Politécnico do Porto.

Silva, R. E. G., & Mantoan, A. (2024). A embalagem e seu design além de seu papel primordial: Uma ferramenta de comunicação e marketing. **Revista de Design e Comunicação**, **12**(2), 45–59.

Vlasopoulos, A., Malinauskaite, J., Żabnieńska-Góra, A., & Jouhara, H. (2023). Life cycle assessment of plastic waste and energy recovery. *Energy*, **277**, 127576.

LISTA DE ANEXOS

Anexo I – Modelação do Cenário de Fim de Vida em Aterro para a Embalagem de Vidro

Anexo II – Modelação do Cenário de Fim de Vida em Reuso para a Embalagem de Vidro

Anexo III – Modelação do Cenário de Fim de Vida para Reciclagem para a Embalagem de Vidro

Anexo IV – Modelação do Cenário de Fim de Vida para Reciclagem Mecânica para a Embalagem de PET

Anexo V – Modelação do Cenário de Fim de Vida para Reciclagem Química para a Embalagem de PET

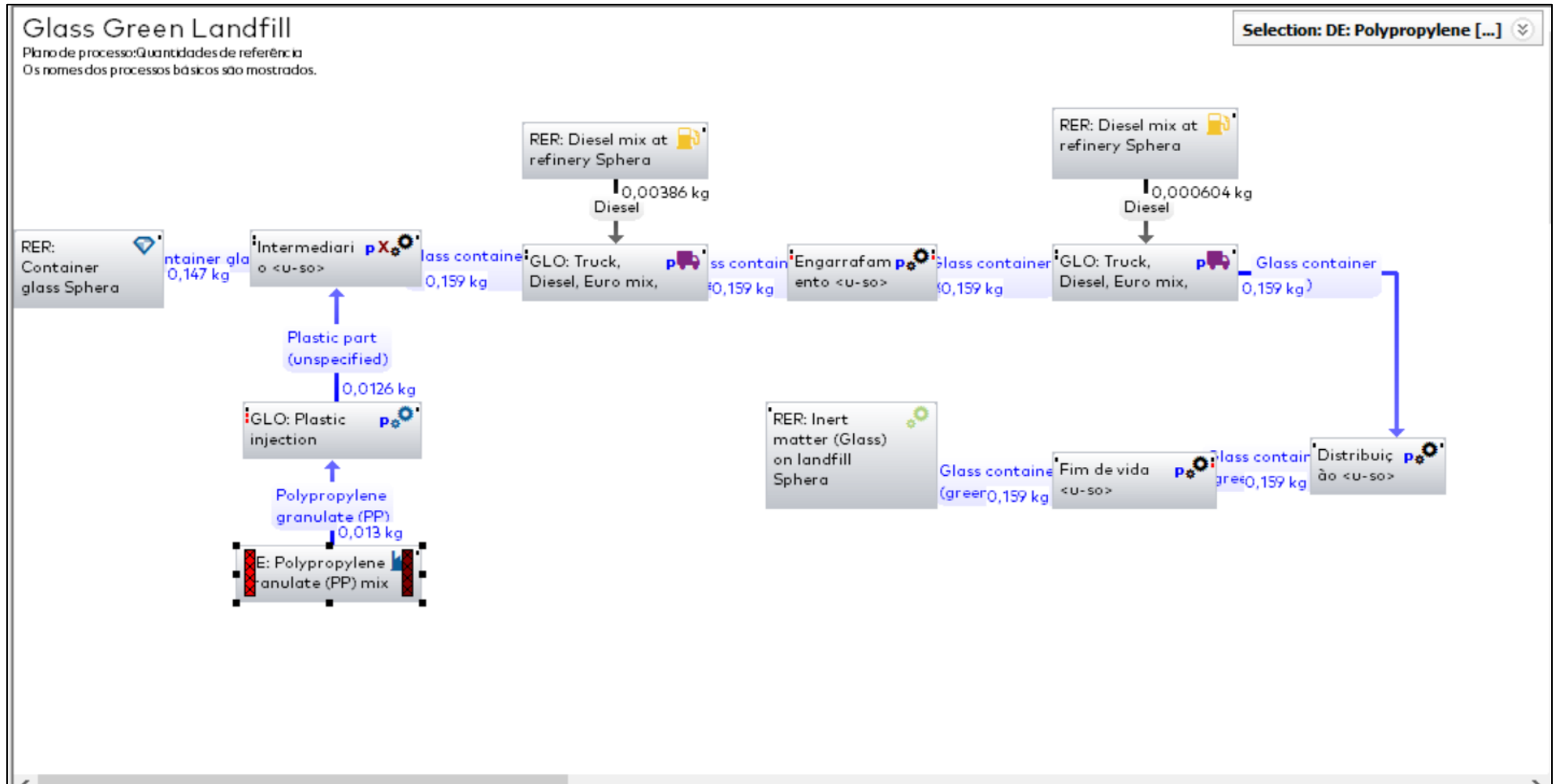
Anexo VI – Modelação do Cenário de Fim de Vida para Incineração para a Embalagem de PET

Anexo VII – Modelação do Cenário de Fim de Vida para Aterro para a Embalagem de PET

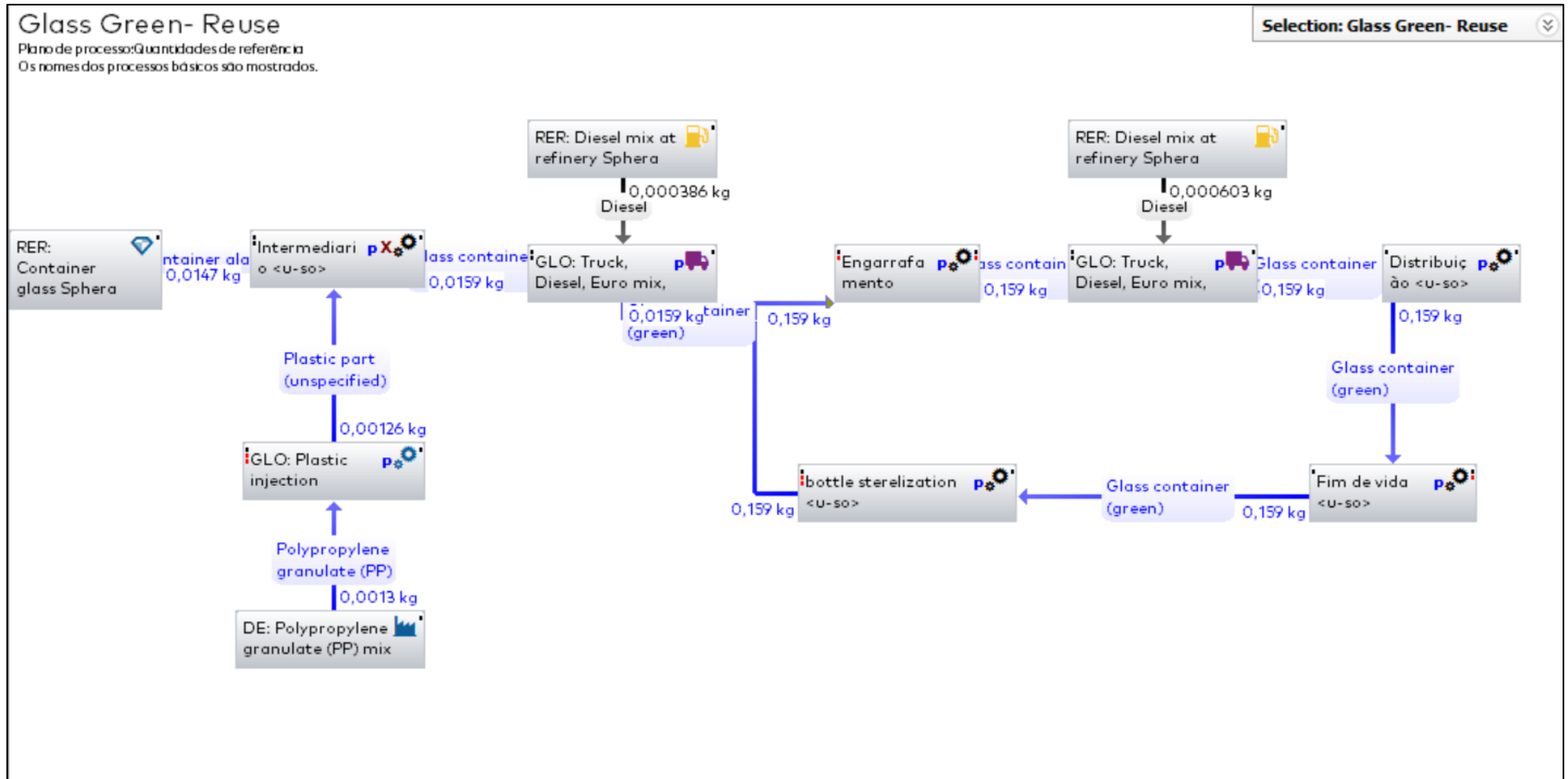
Anexo VIII – Modelação do Cenário de Fim de Vida para Aterro para a Embalagem de Lata

Anexo IX – Modelação do Cenário de Fim de Vida para Reciclagem para a Embalagem de Lata

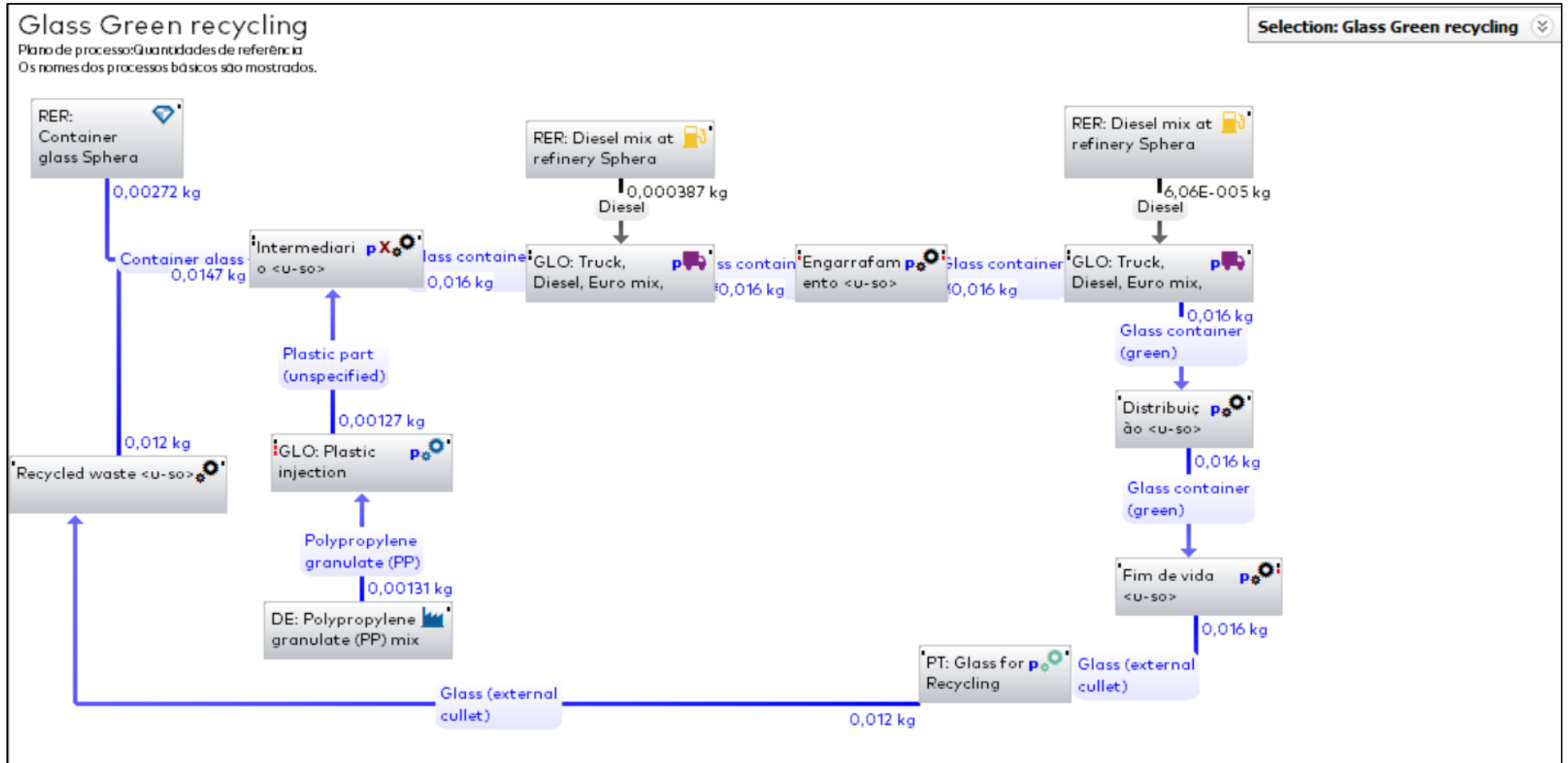
Anexo I – Modelação do Cenário de Fim de Vida em Aterro para a Embalagem de Vidro



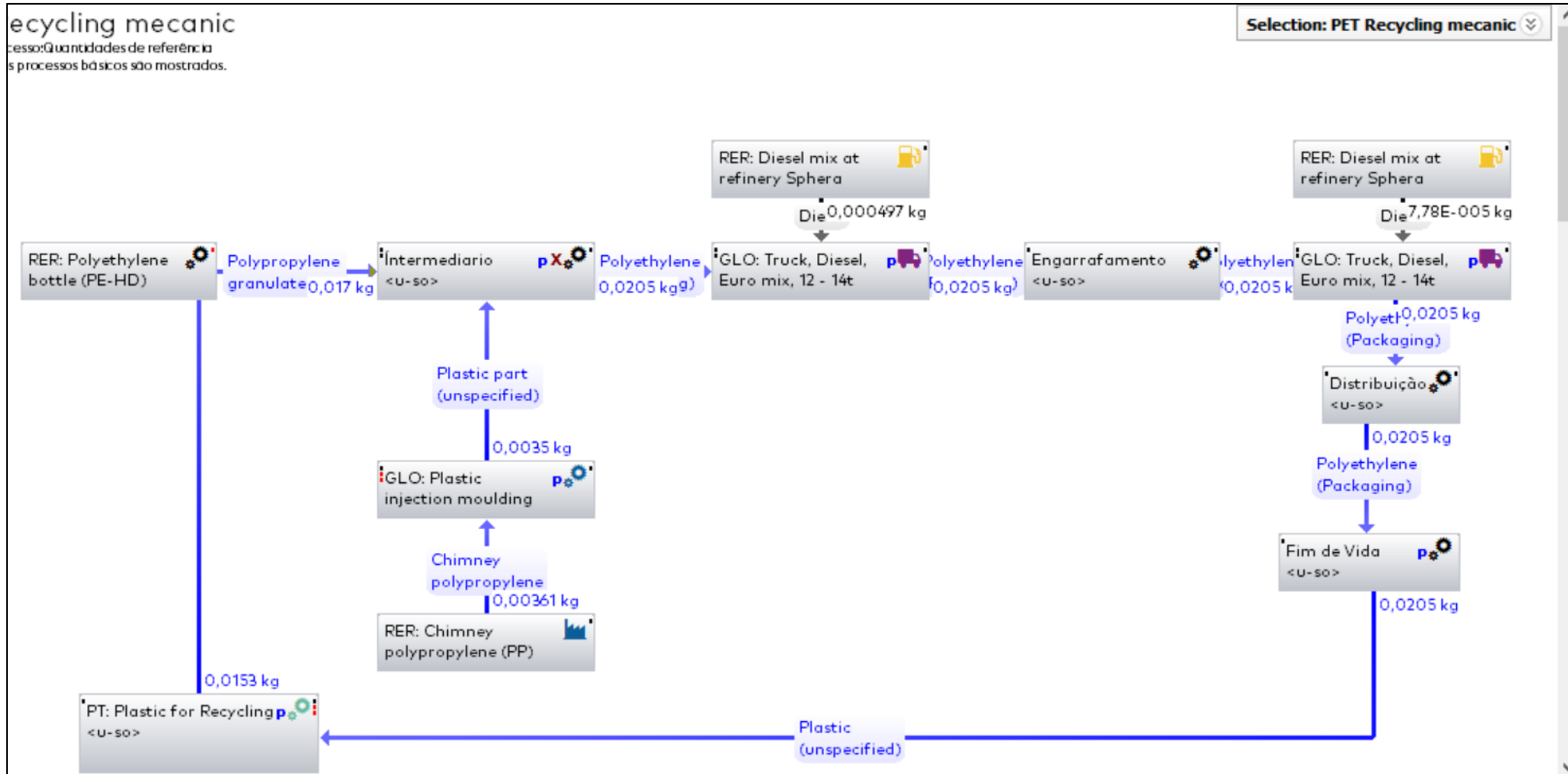
Anexo II – Modelação do Cenário de Fim de Vida em Reuso para a Embalagem de Vidro



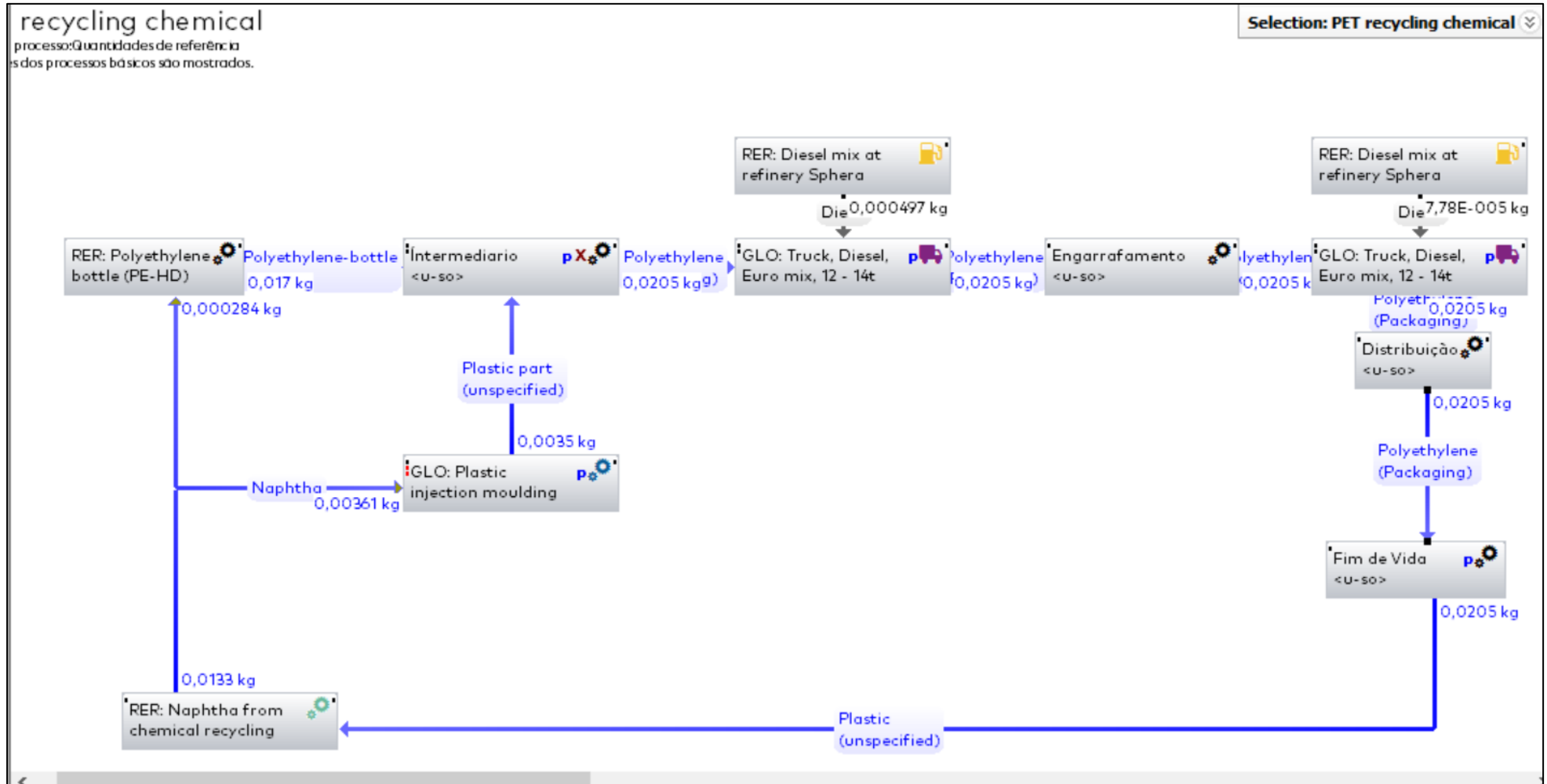
Anexo III – Modelação do Cenário de Fim de Vida para Reciclagem para a Embalagem de Vidro



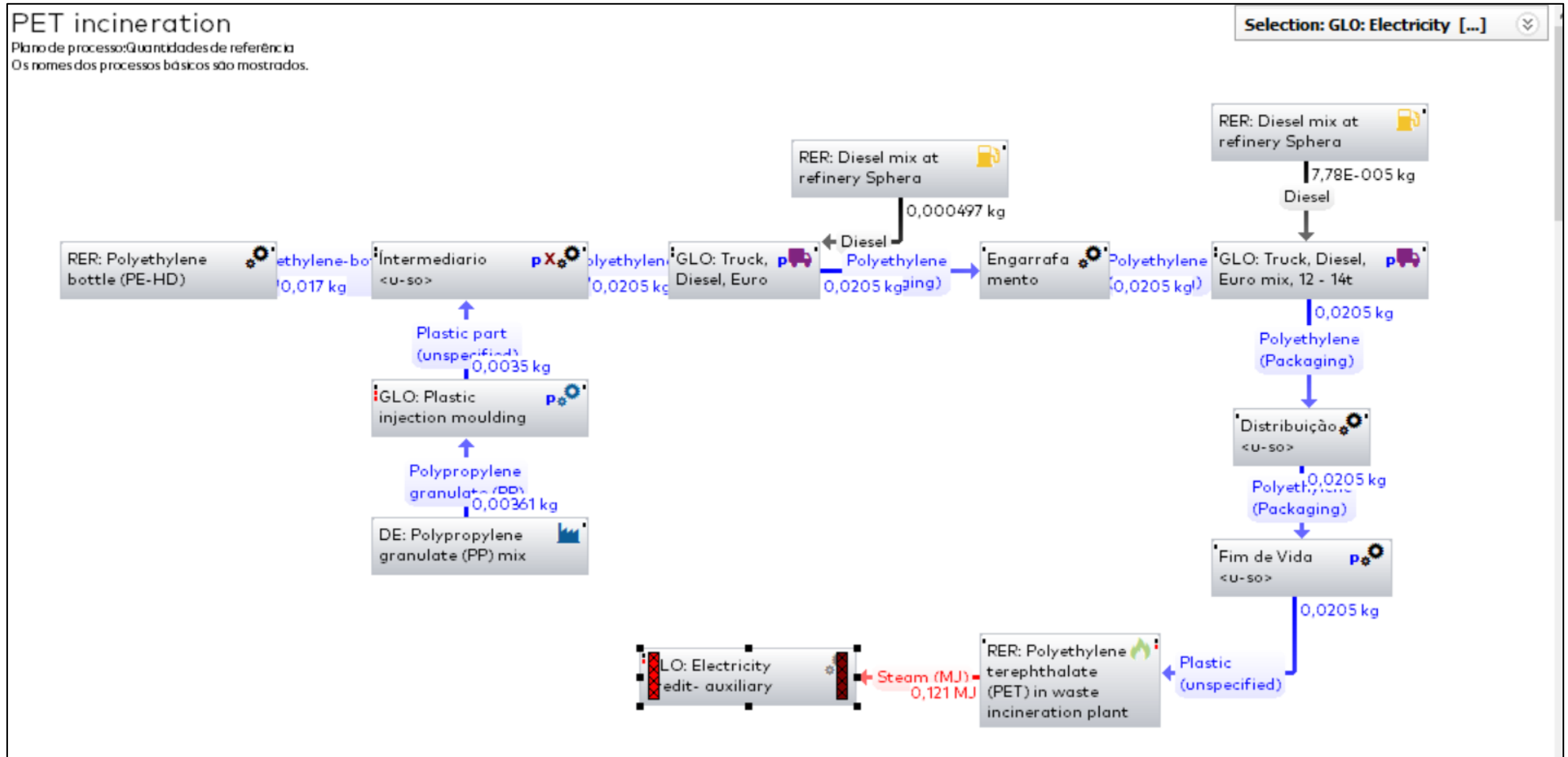
Anexo IV – Modelação do Cenário de Fim de Vida para Reciclagem Mecânica para a Embalagem de PET



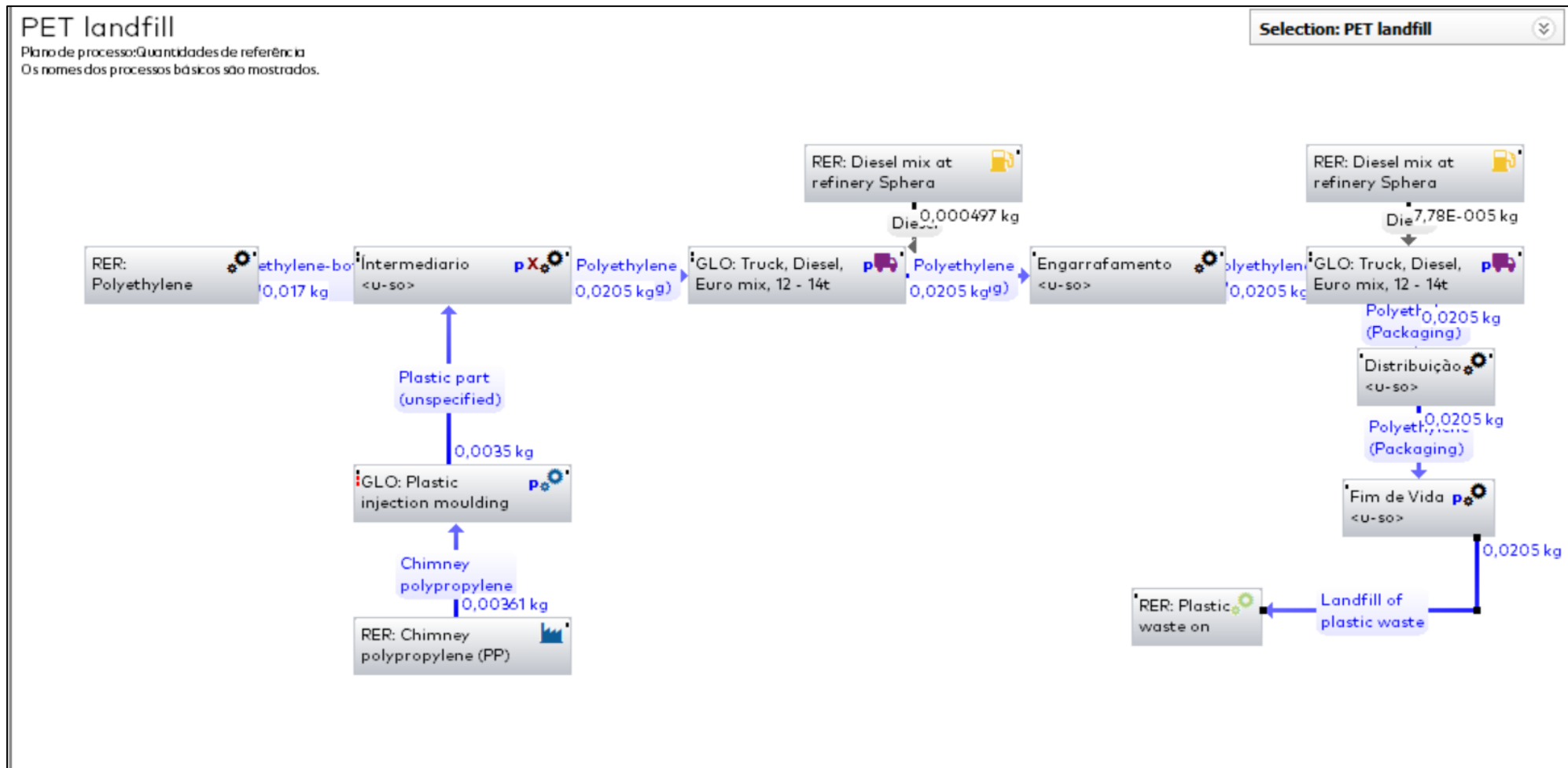
Anexo V – Modelação do Cenário de Fim de Vida para Reciclagem Química para a Embalagem de PET



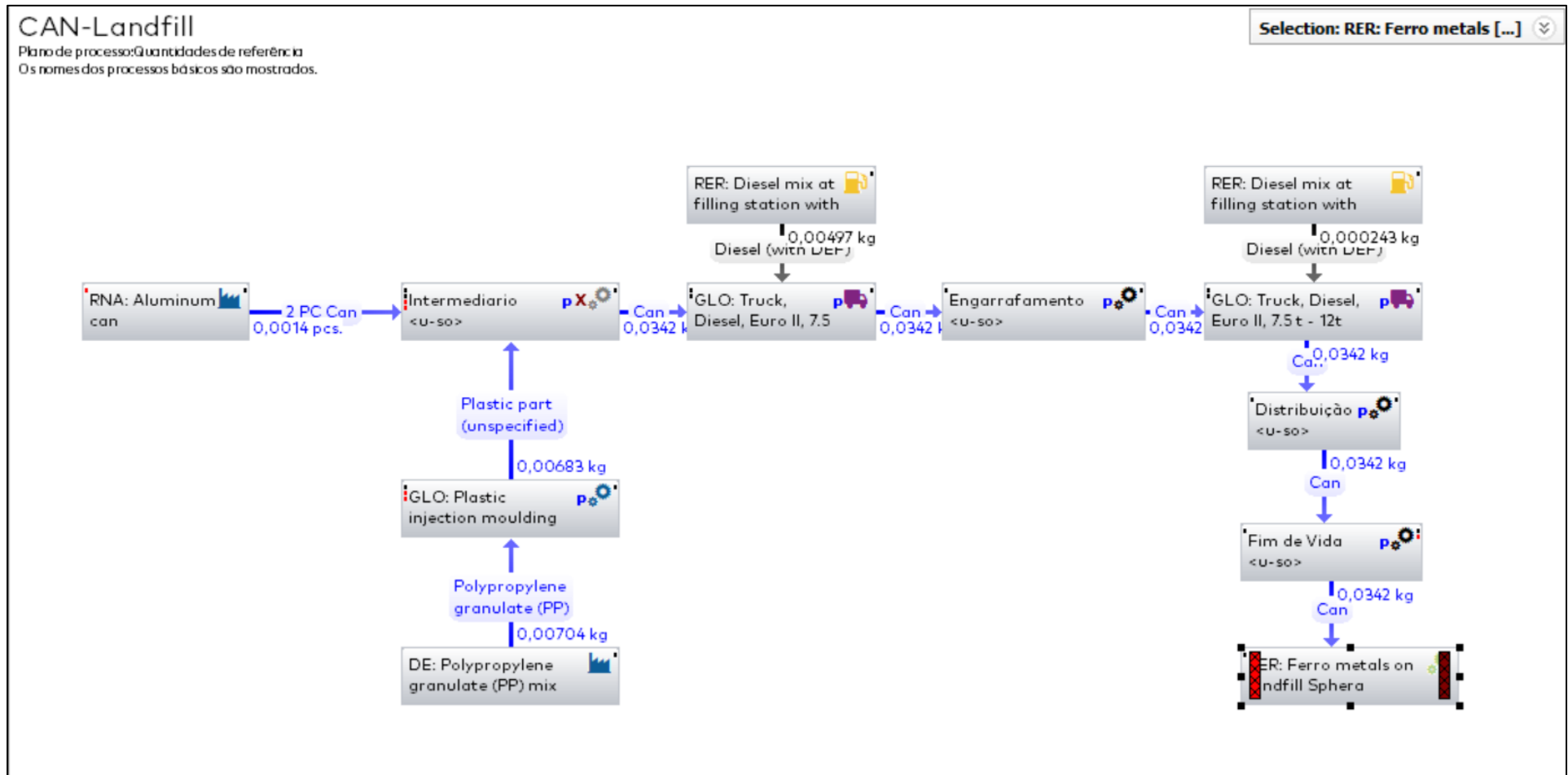
Anexo VI – Modelação do Cenário de Fim de Vida para Incineração para a Embalagem de PET



Anexo VII – Modelação do Cenário de Fim de Vida para Aterro para a Embalagem de PET



Anexo VIII – Modelação do Cenário de Fim de Vida para Aterro para a Embalagem de Lata



Anexo IX – Modelação do Cenário de Fim de Vida para Reciclagem para a Embalagem de Lata

