

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

ANA JÚLIA MAYUMI PUPIN

Comparação de avaliações de ciclo de vida de embalagens de água envasada

São Paulo

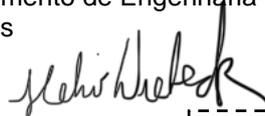
2022

ANA JÚLIA MAYUMI PUPIN

Comparação de avaliações de ciclo de vida de embalagens de água envasada

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia Metalúrgica e de
Materiais



Orientador: Prof. Dr. Hélio Wiebeck

Ok

Aprovado

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Pupin, Ana Júlia Mayumi

Comparação de avaliações de ciclo de vida de embalagens de água envasada / A. J. M. Pupin -- São Paulo, 2022.

78 p.

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Avaliação de ciclo de vida 2.Embalagens plásticas 3.Embalagens cartonadas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais II.t.

RESUMO

As embalagens de alimentos e bebidas têm um importante papel funcional e estético na contenção, preservação, proteção e identificação de produtos. No entanto, o intenso consumo de embalagens e o descarte deste materiais em lixões, meio natural e aterros sanitários consistem em fatores de atenção pelo público em relação aos impactos ambientais gerados. Uma das ferramentas que vem crescendo na avaliação e mitigação de impactos ambientais é a Avaliação de Ciclo de Vida, que analisa quantitativamente o desempenho ambiental de produtos nos seus diferentes estágios de ciclo de vida. Frente à este panorama, o presente estudo pretendeu avaliar os impactos associados a dois tipos de embalagem de água envasada através da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida, garrafas PET e caixas cartonadas. As embalagens avaliadas basearam-se em valores médios de embalagens encontradas no mercado brasileiro e os dados de impacto associados às diferentes etapas produtivas destas embalagens foram obtidos de bases de dados de Avaliação de Ciclo de Vida para representar condições de produção e transporte no Brasil, como o Ecoinvest e a SICV Brasil. A análise demonstrou que as garrafas PET apresentam menor impacto ambiental sob a perspectiva de Potencial de Aquecimento Global e as etapas produtivas consideradas na avaliação. Sendo as principais etapas contribuintes para os impactos ambientais de garrafas PET e caixas cartonadas: a produção de energia elétrica, transporte e a produção da principal matéria prima de cada um dos sistemas de produto analisados (pellets de PET ou papel kraft). Além disso, o estudo analisou os efeitos do teor de material reciclado sobre os impactos ambientais das embalagens, de forma que o maior percentual de material reciclado foi capaz de reduzir o Potencial de Aquecimento Global em 13% para as caixas cartonadas e 11% para as garrafas PET, sendo tal fenômeno associado à redução do consumo de matéria prima primária.

Palavras-chave: Embalagens plásticas. Caixas cartonadas. Reciclagem. Potencial de Aquecimento Global. Avaliação de Ciclo de Vida.

ABSTRACT

Food and beverage packaging plays an important functional and aesthetic role in containing, preserving, protecting and identifying products. However, the intense consumption of packaging and the disposal of these materials in the natural environment and sanitary landfills are factors of attention by the public in relation to the environmental impacts generated. One of the tools that has been growing in the evaluation and mitigation of environmental impacts is the Life Cycle Assessment, which quantitatively analyzes the environmental performance of products in their different life cycle stages. The present study intended to evaluate the impacts associated with two types of bottled water packaging through the Life Cycle Assessment methodology, PET bottles and cartons. The evaluated packages were based on average values of packages found in the Brazilian market and the impact data associated with the different production stages of these packages were obtained from Life Cycle Assessment databases to represent production and transport conditions in Brazil, such as Ecoinvest and SICV Brazil. The analysis showed that PET bottles can have a lower environmental impact from the perspective of Global Warming Potential and the production stages considered in the evaluation. The main steps contributing to the environmental impacts of PET bottles and cartons are: the production of electricity, transportation and the production of the main raw material of each of the analyzed product systems (PET pellets or kraft paper). In addition, the study analyzed the effects of the recycled material content on the environmental impacts of packaging, so that the highest percentage of recycled material was able to reduce the Global Warming Potential by 13% for carton boxes and 11% for PET bottles, and this phenomenon is associated with the reduction in the consumption of primary raw materials.

Keywords: Plastic packaging. Carton boxes. Recycling. Global Warming Potential. Life Cycle Assessment.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Produção percentual de bebidas não alcoólicas no mercado brasileiro (2021)	2
Figura 2- Número de publicações de artigos relacionados à Avaliação de Ciclo de Vida	14
Figura 3 - Etapas da Avaliação de Ciclo de Vida	20
Figure 4 - Garrafas PET de volume entre 500ml à 510ml do mercado brasileiro.....	22
Figure 5 – Caixas cartonadas de volume de 500ml do mercado brasileiro.....	23
Figure 6 - Fronteiras de sistema e fluxos de fabricação de embalagem PET	26
Figure 7 - Fronteiras de sistema e fluxos de fabricação de embalagem cartonada	27
Figure 8 – Carcterísticas do sismeta de produto e fluxos de fabricação de embalagem PET para Cenário 1.....	33
Figure 9 – Carcterísticas do sismeta de produto e fluxos de fabricação de embalagem PET para Cenário 2.....	35
Figure 10 – Carcterísticas do sismeta de produto e fluxos de fabricação de embalagem cartonadas para bebida para Cenário 1.....	37
Figure 11 – Carcterísticas do sismeta de produto e fluxos de fabricação de embalagem cartonadas para bebida para Cenário 2.....	39
Figure 12 – Distribuição de Potencial de Aquecimento Global entre sistemas de produto e etapas produtivas	41
Figure 13 – Distribuição de Potencial de Aquecimento Global em etapas produtivas de garrafa PET (Cenário 1)	42
Figure 14 – Distribuição de Potencial de Aquecimento Global em etapas produtivas de garrafa PET (Cenário 2)	43
Figure 15 – Distribuição do consumo de energia elétrica entre as etapas produtivas de garrafa PET.....	44
Figure 16 – Distribuição de Potencial de Aquecimento Global em etapas produtivas de caixa cartonada (Cenário 1).....	45
Figure 17 – Distribuição de Potencial de Aquecimento Global em etapas produtivas de caixa cartonada (Cenário 2).....	46
Figure 18 – Distribuição do consumo de energia elétrica entre as etapas produtivas de caixas cartonadas	47

LISTA DE ABREVIATURAS

ABIR	Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes e de Bebidas não Alcoólicas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
ILCD	Sistema Internacional de Dados de Referência sobre Ciclo de Vida
ISO	Organização Internacional de Normalização
LCA	Análise de Ciclo de Vida
LCC	Análise de Custo de Ciclo de Vida
LCI	Iniciativa de Ciclo de Vida
N ₂ O	Dióxido nitroso
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PET	Politereftalato de etileno
PP	Polipropileno
REPA	Análise de Recursos e Perfil Ambiental
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre
SETAC	Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental
S-LCA	Análise de Ciclo de Vida Social
SBS	<i>Solid Bleached Sulfate</i>

UF Unidade Funcional

UNEP Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
2	OBJETIVO	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1	O desenvolvimento e papel de embalagens.....	4
3	Propriedades de embalagens de uso único para bebidas.....	7
3.1	Garrafas de Polietileno Tereftalato (PET).....	7
3.2	Caixas cartonadas	9
3.2	Metodologia de avaliação de ciclo de vida	11
3.1.1	Definição	11
3.1.2	Progressão histórica.....	12
3.1.3	Metodologias de avaliação de Ciclo de Vida.....	15
4	Metodologia.....	20
5	Resultados	21
5.1	Definição de objetivo e escopo	21
5.1.1	Definição de Objetivo	21
5.1.2	Definição de Escopo	21
5.1.2.1	Definição de sistemas de produto e unidade funcional.....	21
5.1.2.2	Metodologia de alocação e reciclagem na análise de ciclo de vida	24
5.1.2.3	Definição de fronteiras do sistema e procedimento de inventário de ciclo de vida	25
5.1.2.4	Definição de categorias de impacto	27
5.1.2.5	Inventário de Ciclo de Vida	28
5.1.2.5.1	Garrafa de plástico.....	28
5.1.2.5.2	Caixa cartonada.....	30
5.1.2.6	Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida	32
5.1.2.6.1	Garrafa plástica	32
5.1.2.6.2	Caixa cartonada.....	36
6.	Discussão e interpretação	41
7.	Conclusões	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
	ANEXO A – QUADRO DE FUNÇÕES FUNDAMENTAIS DE EMBALAGENS	54
	ANEXO B – QUADROS DE PARÂMETROS DE ETAPAS DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA.....	55
	ANEXO C – QUADRO DE BASES DE DADOS PARA AVALIAÇÃO DE PROCESSOS EM INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA	64

ANEXO D – TABELA DE PRODUTOS REFERÊNCIA PARA UNIDADE FUNCIONAL MÉDIA PARA GARRAFA PET	67
ANEXO E – TABELA DE PRODUTOS REFERÊNCIA PARA UNIDADE FUNCIONAL MÉDIA PARA CAIXA CARTONADA	68
ANEXO F – TABELA DE DETALHAMENTO DE POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DE ETAPAS DO SISTEMA DE GARRAFAS PET	69
ANEXO G – TABELA DE DETALHAMENTO DE POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL DE ETAPAS DO SISTEMA DE CAIXA CARTONADA.....	70

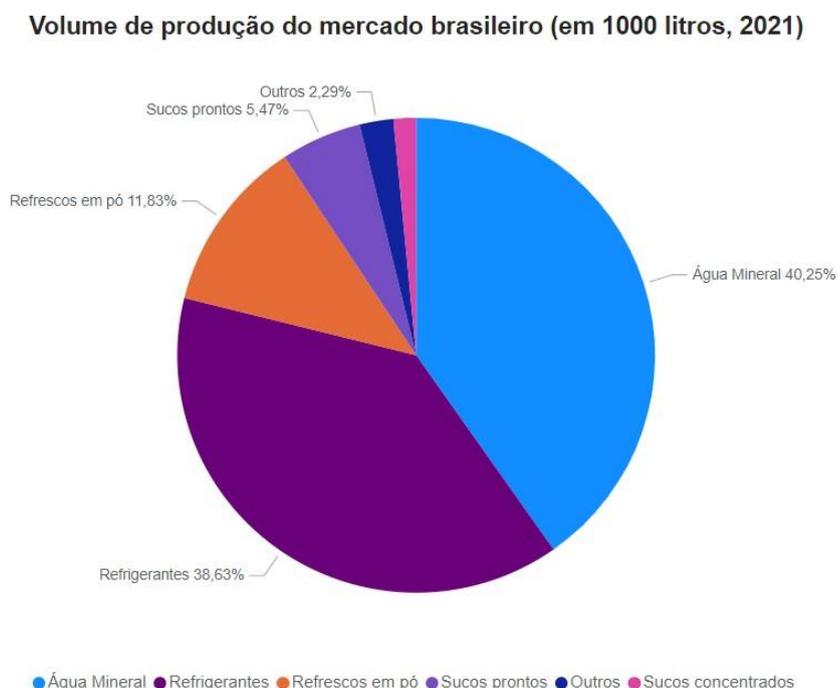
1 INTRODUÇÃO

As embalagens alimentícias e de bebidas têm um importante papel funcional e estético na contenção, preservação, proteção e identificação de produtos, atuando desde a manufatura e transporte do produto até sua promoção e venda ao consumidor final. Esta pode ser encontrada em diferentes formatos e materiais para um mesmo produto - como embalagens metálicas, cartonadas, plásticas e vítreas – conferindo diversos *designs*, processos produtivos, propriedades mecânicas e apelo ao consumidor (COLES; MCDOWELL; KIRWAN, 2003).

De acordo com o banco de dados da Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes e de Bebidas não Alcoólicas (ABIR), a água mineral ou envasada consiste na bebida não alcoólica mais consumida no Brasil em 2021, seguido de refrigerantes e refrescos em pó. De forma que o volume de água mineral produzida no país cresceu em 40,6% entre 2021 (13.225.921 mil litros) e 2011 (7.544.286 mil litros).

A Figura 1 ilustra o percentual de produção de diferentes categorias de bebidas não alcoólicas de acordo com dados coletados pela ABIR em 2021, de forma que se observa a participação considerável da água mineral no setor.

Figura 1 - Produção percentual de bebidas não alcoólicas no mercado brasileiro (2021)



Fonte: Adaptação de ABIR, [S.I.].

O elevado consumo de água mineral envasada pode ser relacionada ao maior acesso econômico pela população, a maior distribuição destes produtos em embalagens descartáveis, à maior demanda por produtos de percepção natural e saudável e à maiores demandas associadas a escassez de água para consumo devido à contaminação de mananciais de água doce e escassez sazonal (ASLANI *et al*, 2021; GORINI, 2000).

Este produto é comumente envasado sob diferentes volumes e em garrafas ou galões de polietileno tereftalato (PET), sendo este material amplamente aplicado devido à sua leveza, baixo custo, versatilidade e durabilidade.

No entanto, o intenso uso de embalagens e o descarte inadequado deste material reciclável em lixões e aterros sanitários consistem em fatores de atenção pelo público (ASLANI *et al*, 2021; DE MARCHI *et al.*, 2020). Estima-se que, após a popularização do uso de plástico na década de 1950, 6.300 milhões de toneladas métricas de resíduos plásticos primários e secundários foram produzidos até 2015. Além disso, cerca de 60% de todo o plástico descartado encontra-se acumulado em aterros sanitários ou no ambiente natural (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

A popularização do uso de plásticos pode ser relacionada à indústria de embalagens, que aplica deste material pela sua versatilidade e durabilidade especialmente em embalagens de uso único. Estas têm forte demanda pelo consumidor final e são majoritariamente descartadas no mesmo ano em que são produzidas. Dado tal cenário, estima-se que cerca de 12.000 milhões de toneladas métricas de resíduos plásticos estarão em aterros ou no ambiente natural até 2050 caso mantidas as atuais tendências de produção e gestão de resíduos (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Frente a este desafio, diferentes iniciativas vêm sendo tomadas por fabricantes de produtos embalados e organizações públicas para reduzir o descarte e impactos ambientais de embalagens. Entre as iniciativas, novos materiais para embalagem de água vêm sendo explorados e novos formatos se estabelecendo no mercado. Exemplos de novas embalagem de água incluem latas de alumínio, embalagens flexíveis, embalagens plásticas com menor consumo de material e embalagens cartonadas (NOBLE *et al.*, 2009).

No entanto, o impacto associado a diferentes produtos e suas respectivas embalagens são complexos de serem mensurados e interpretados. De forma que metodologias como a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) contribuem para a

compreensão dos impactos ambientais de produtos, materiais, serviços e sistemas industriais. De tal modo que tal avaliação permite a seleção de opções de menor impacto com base em métricas e critérios determinados e específicos para cada estudo (ISO 14040:2006).

Frente a essas novas alternativas ao uso de plástico em embalagens de água envasada e o crescimento de metodologias que contribuem para a compreensão de impactos ambientais, como a Avaliação de Ciclo de Vida; o estudo a seguir pretende comparar os potenciais impactos ambientais de diferentes formatos de embalagem para água envasada encontrados no mercado brasileiro através da lente de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV).

2 OBJETIVO

O presente trabalho teve como objetivo compreender quais tipos de embalagem de água envasada encontrados no mercado brasileiro apresenta menor impacto ambiental sob a perspectiva de Potencial de Aquecimento Global através da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida.

Para tal, o trabalho contextualizou a metodologia de avaliação de ciclo de vida e sua aplicação na análise de impactos ambientais de embalagens de alimentos e bebidas. De modo a estabelecer os parâmetros, limitações e observações que foram aplicadas para realizar o estudo de ciclo de vida.

As embalagens analisadas são caixas cartonadas e garrafas PET para quinhentos mililitros de água. Sendo os parâmetros aplicados baseados em amostras de embalagens produzidas no Brasil e comercializadas para um mercado consumidor em São Paulo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O desenvolvimento e papel de embalagens

Diferentes eventos históricos e mudanças sociais contribuíram para o desenvolvimento das embalagens como são conhecidas atualmente em suas funções, materiais e formatos. Estas desenvolveram-se junto com as necessidades da sociedade e contribuíram em diversas escalas para a proteção, preservação, transporte, comunicação e conveniência dos seus produtos associados (EMBLEM; EMBLEM, 2012).

Diferentes formas de embalagem estão presentes desde os princípios da sociedade para a proteger e transportar alimentos e outros produtos. Uma das primeiras formas de “embalagem” aplicadas pelo ser humano foi o embalado de carnes

e outros alimentos com folhas para o transporte frente à possibilidade de falta de recursos durante a movimentação de tribos.

O desenvolvimento de conhecimentos sobre materiais e seus processos de produção pela sociedade humana contribuiu para a evolução de métodos de proteção, embalagem e transporte dos alimentos e mercadorias. Potes de argila datados de 8000 A.C, por exemplo, eram utilizados para contenção de grãos, sal e óleos.

A evolução da sociedade moderna após a Revolução Industrial resultou no desenvolvimento e estabelecimento de novas funções para as embalagens frente às novas necessidades, como a demanda de transporte de grandes quantidades de produto de locais de produção até pontos de vendas em comunidades e cidades afastadas, a individualização em produtos pré-embalados para a compra pelo consumidor final e a identificação dos mesmos em relação à sua marca e quantidade para garantir sua qualidade e confiabilidade do produto (COLES; MCDOWELL; KIRWAN, 2003).

Tais necessidades e funções resultaram na aplicação de novos materiais e métodos produtivos que contribuíram para o desenvolvimento de tecnologias de embalagens. Em 1810, por exemplo, o comerciante inglês Peter Durand desenvolveu a primeira patente de preservação e comercialização de alimentos em latas soldadas, o que garantia a proteção, higiene, qualidade e conveniência dos produtos comercializados por este método (EMBLEM; EMBLEM, 2012).

Finalmente, os eventos de globalização e mudanças no estilo de vida e padrões de consumo na sociedade implicaram na exacerbação de demandas sobre as cadeias de mantimentos, os produtos e embalagens associadas. A globalização de produção e comercialização, por exemplo, implicou em mercadorias sendo transportadas sob longas distâncias e em grandes quantidades, de forma a serem expostas a diferentes condições climáticas e requisitos mecânicos; ressaltando o papel de proteção e preservação por parte das embalagens. Enquanto que, o elevado volume e variedade de produtos embalados em porções individualizadas resultou em pontos de venda e mercados com grandes e complexos armazenamentos que requerem formatos de embalagens de rápido estoque e identificação (COLES; MCDOWELL; KIRWAN, 2003).

Assim, a progressão histórica dos padrões de consumo e transporte de produtos demonstra as elevadas demandas e papel das embalagens sobre a qualidade e comercialização de produtos. De forma que a importância das

embalagens na sociedade moderna pode ser sintetizada nas suas funções básicas de (COLES; MCDOWELL; KIRWAN, 2003; EMBLEM; EMBLEM, 2012):

1. Contenção;
2. Proteção;
3. Preservação;
4. Conveniência;
5. Informação;
6. Comunicação e promoção de produto;
7. Responsabilidade ambiental;

A descrição de cada função descrita anteriormente pode ser encontrada no Anexo A.

A importância relativa de cada uma das funções das embalagens varia com o produto. Produtos mais frágeis, por exemplo, requerem embalagens com funções de proteção contra danos físicos mais robustas; enquanto que produtos alimentícios e para bebidas geralmente requerem funções mais rigorosas de contenção e selagem do produto. De forma que, a maioria dos fabricantes buscam desenvolver e aplicar de embalagens que atendem as funções exigidas sob menores e mais eficientes custos (COLES; MCDOWELL; KIRWAN, 2003).

No entanto, deve se destacar o importante papel das embalagens na redução de:

- desperdícios de produtos por contaminação;
- danificação física e deterioração;
- custos de transporte de mercadorias com sistemas seguros e eficientes de manuseio;
- riscos de adulteração;
- ocorrências de doenças associadas à contaminação e higiene de produtos;

Estima-se que perdas de produtos alimentícios em países menos economicamente desenvolvidos atingem níveis de 30% à 50% de todo o alimento produzido, devido ao uso de meios inadequados de preservação, proteção, armazenamento e transporte. Enquanto que locais com sistemas modernos de processamento, embalagem e distribuição de alimentos são capazes de reduzir os desperdícios para níveis de 2% à 3%; de forma a ressaltar a importância destes

recursos na redução de desperdícios e impactos ambientais (COLES; MCDOWELL; KIRWAN, 2003; EMBLEM; EMBLEM, 2012).

Assim, as embalagens desempenham um papel fundamental para a qualidade e eficiência dos produtos; desenvolvendo-se no decorrer do tempo para se adaptar às novas necessidades da sociedade. O uso adequado de embalagens, a redução de consumo de recursos naturais e o descarte adequado das mesmas são fatores de atenção para a redução de seus impactos ambientais. De forma que embalagens de formatos e materiais mais ambientalmente sustentáveis podem ser selecionadas por fabricantes e consumidores finais para priorizar decisões mais sustentáveis e manter as funções essenciais e complementares de contenção, proteção, preservação e comunicação da mesma.

3 Propriedades de embalagens de uso único para bebidas

Embalagens de uso único para bebidas podem apresentar diferentes formatos e materiais para atender aos requisitos básicos de embalagens. Dentre os materiais encontrados no mercado, as embalagens plásticas de PET são as mais aplicadas para produtos de água mineral e refrigerantes. Mas materiais alternativos incluem embalagens cartonadas, garrafas de vidro e latas de alumínio (PASQUALINO, MENESES, CASTELLS, 2011).

As propriedades e processos produtivos associados aos tipos de embalagens citados influenciam na sua aplicabilidade como embalagem para água envasada e nas considerações realizadas sobre seus impactos ambientais. De forma que tais parâmetros são explorados à seguir.

3.1 Garrafas de Polietileno Tereftalato (PET)

As garrafas de PET são o principal tipo de embalagem encontrado para água envasada em diversos volumes devido aos seus atributos de baixo custo, leveza, versatilidade, fácil processamento e durabilidade (PASQUALINO, MENESES, CASTELLS, 2011; DE MARCHI *et al.*, 2020).

No entanto, o uso e descarte intenso desse tipo de embalagem está associado a impactos ambientais de acúmulo de detritos plásticos no meio ambiente. Tal panorama é agravado pela durabilidade de PET, que leva cerca de 400 anos para se decompor no ambiente natural; de forma a contribuir para seu acúmulo em aterros

sanitários e lixões e para a contaminando do solo e água. (ASLANI *et al*, 2021; DE MARCHI *et al.*, 2020))

No Brasil, os materiais plásticos correspondem à 20% dos resíduos sólidos urbanos (2005), sendo 20% dos resíduos sólidos urbanos plásticos apenas relacionados a produtos de PET (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009).

A fabricação de garrafas de PET inclui etapas de: extração de matéria-prima (gás natural e petróleo), fabricação de resina polietileno tereftalato, injeção de pré-forma e conformação da pré-forma por sopro via injeção com estiramento.

A resina PET é fabricada a partir da policondensação de ácido tereftálico e etileno glicol, produzidos a partir de xileno e etileno. Após tal fabricação, a resina PET aplicada na confecção de garrafas ainda passa por processos adicionais de polimerização no estado sólido, pela necessidade de alta viscosidade intrínseca e massa molar para obter melhores propriedades mecânicas associadas a esta aplicação (viscosidade entre 0.72 e 0.86 dL/g) (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009). Assim, o PET fundido pode ser peletizado ou extrudado na forma de filamento para ser armazenado, comercializado e posteriormente refundidos na fabricação do produto final (EPA, 1991).

Os pellets são aplicados para fabricação da pré-forma pela moldagem por injeção. Tal pré-forma é aquecida até o ponto de fusão para ser inflada e esticada com ar comprimido dentro de um molde de garrafa de forma a obter o formato final da garrafa.

As garrafas produzidas podem ser transportadas até empresas engarrafadoras de bebidas ou fabricadas nas próprias instalações de engarrafadoras devido ao seu alto volume e ineficiente transporte (KUCZENSKI; GEYER, 2011).

A produção da bebida final geralmente inclui a adição de rótulos e tampas à garrafa de PET. O rótulo e tampa podem ser fabricados de resinas plásticas como o polipropileno e polietileno de alta densidade, sendo o rótulo produzido pelo processo de extrusão e a tampa pelo processo de injeção.

Concluído o engarrafamento, a bebida embalada pode ser transportada e comercializada até o consumidor final, que após o consumo do produto descarta a embalagem em aterros sanitários, através de incineração ou direcionadas para reciclagem.

No Brasil, a reciclagem de embalagens de PET atingiu 55% dos produtos descartados em 2019, contabilizando 311 mil toneladas de produtos PET reciclados

(ABIPET, [S.I.]). Os maiores utilizadores deste material reciclado são: os fabricantes de garrafas e pré-formas (23%), indústria têxtil (22%), indústria de laminados e termoformados (17%), setor químico (15%), setor de fitas de arqueio (10%) e outros (10%).

Dentre os setores citados, deve se destacar a aplicação de PET reciclado em novas embalagens de garrafa e suas pré-formas. Tal indústria obteve considerável evolução tecnológica nos últimos anos, o que permitiu a produção de embalagens de grau alimentício com material reciclado (processo de “*bottle to bottle*”), de forma a ultrapassar o setor têxtil como maior consumidor de PET pós consume (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009).

3.2 Caixas cartonadas

As embalagens cartonadas são geralmente aplicadas para alimentos líquidos e bebidas, como leite, sucos, vinho, sopas, entre outros. Tal tipo de embalagem é composto por camadas de (PASQUALINO, MENESES, CASTELLS, 2011):

- Papel cartonado (75% em peso): camada externa que confere o formato e resistência para a embalagem;
- Folha de alumínio (5% em peso): camada intermediária que protege o conteúdo contra o ar, luz e microorganismos;
- Filme de polietileno de baixa densidade (PEBD) (20% em peso): camada interna que previne a contaminação do conteúdo com alumínio;

A manufatura da caixa cartonada a partir desses elementos ocorre através da impressão do papel cartonado, seguido da laminação do papel com o alumínio e filme plástico. De forma que a união dos três componentes descritos resulta em uma caixa cartonada de seis camadas, que é dobrada e colada no formato final. Certas embalagens cartonadas também podem conter uma tampa plástica acoplada à caixa, sendo tais componentes secundários geralmente composto de polietileno de alta densidade ou polipropileno (PASQUALINO, MENESES, CASTELLS, 2011; MOURAD *et. Al*, 2007).

Após a manufatura da embalagem, esta pode ser transportada para fabricantes de bebidas e engarrafadoras para serem preenchidas com o produto final e posteriormente direcionada para o consumidor final, de modo que a embalagem

cartonada garante a conservação do produto interno por até seis meses (MOURAD *et. Al*, 2007).

Devido ao caráter de multicamadas das embalagens cartonadas, o processo de reciclagem destes produtos é mais complexo que simples embalagens de papel. Tal processo requer etapas adicionais de pré-despolpamento do material e maior tempo de processo para separação das camadas da embalagem. Além disso, este processo requer equipamentos específicos, de forma que apenas uma companhia no Brasil realiza a reciclagem de embalagens laminadas (Zero Waste Europe, 2020; MOURAD *et. Al*, 2007).

Estima-se que 42,7% das caixas cartonadas para bebida foram recicladas no Brasil em 2020 por um dos principais fabricantes deste tipo de embalagem no país (Tetra Pak, 2021). De forma que este processo de reciclagem permite recuperar até 90% de todo o conteúdo de fibra das caixas cartonadas, além de produzir uma mistura de alumínio e polietileno resultante das demais camadas da embalagem.

No entanto, o papel reciclado a partir das caixas cartonadas tem limitadas aplicações na fabricação do mesmo tipo de embalagem; devido aos requisitos de resistência da embalagem que exige a aplicação de material virgem, como o papel Kraft. De forma que tal papel reciclado é geralmente aplicado em produtos com menores requisitos de resistência mecânica, como caixas corrugadas.

No entanto, estudos desenvolvidos por fabricantes de embalagens cartonadas buscam incrementar a reciclagem deste tipo de embalagem e introduzir percentuais de material reciclado nas embalagens cartonadas. Mourad (2007) identifica o uso de 2% à 22% de papel reciclado em embalagens cartonadas de leite entre 2000 e 2004, de forma que tal percentual é capaz de reduzir os impactos ambientais da embalagem total.

Enquanto que a mistura de alumínio e polietileno resultante das demais camadas da embalagem tem limitada aplicação em larga escala. Na Alemanha, tal material era aplicado para produção de pellets plástico, mas as unidades que realizavam tal processo foram fechadas em 2014 devido aos custos de tal processo em comparação com demais formas de descarte, como a incineração para recuperação de energia. Outras iniciativas existem para a aplicação de tal material em telhas e chapas através da compactação da mistura ou fabricação de parafina e recuperação de alumínio a partir de embalagens cartonadas de leite. (Zero Waste Europe, 2020; MOURAD *et. al*, 2007; SILVA, I. C. *et. al*, 2022)

3.2 Metodologia de avaliação de ciclo de vida

3.1.1 Definição

A avaliação de ciclo de vida consiste em uma metodologia de análise quantitativa do desempenho ambiental de um produto e seu sistema em todo o seu ciclo de vida através de diversos parâmetros e domínios; considerando cada estágio do mesmo, desde a aquisição de matéria-prima até a disposição final (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018; ISO 14040:2006).

Os produtos e sistemas analisado podem incluir diferentes tipos de produto físicos ou serviços, considerando seus aspectos tangíveis e intangíveis. Estes podem variar entre (GUINÉE *et al*, 2011; ISO 14040:2006):

- serviços, como transporte, hotéis e restaurantes;
- informações, como desenvolvimento de programas de computador e transmissão de conhecimento;
- equipamentos, como partes mecânicas de motor;
- materiais processados, como lubrificantes, embalagens de leite e lâmpadas;

Tal abrangência da Avaliação de Ciclo de Vida resulta das diferentes abordagens existentes para a metodologia, que permitem avaliar impactos diversos e sob diferentes contextos de acordo com o escopo do estudo (JOLLIET *et al.*, 2015).

Desta forma, a contribuição da metodologia na compreensão e tomada de decisão sobre problemas e questionamentos assoados à sustentabilidade e impacto ambiental é abrangente. O impacto da ACV pode variar desde na compreensão pelo consumidor final sobre quais alternativas de produto e padrões de consumo podem contribuir para sua redução de impactos até quais mudanças corporativas e de políticas públicas podem ser priorizadas para reduzir impactos ambientais em larga escala (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018).

De acordo com a norma internacional ISO 14044:2006, as aplicações e contribuição da metodologia de avaliação de ciclo de vida podem ser sintetizada em quatro campos principais: auxílio na identificação de pontos de melhoria de desempenho ambiental de produtos e suas etapas de ciclo de vida; auxílio na tomada de decisão por indústrias, governos, organizações não governamentais e indivíduos; identificação de indicadores de impacto ambiental; e marketing a partir de declarações ambientais.

No entanto, deve se ressaltar que tal metodologia não apresenta uma única abordagem e sua aplicação através da história e potenciais contextos – sejam estes

em escopo, geografia, setor de análise, entre outros fatores externos – pode apresentar diferentes resultados quantitativos e conclusões associadas à abordagem selecionada. De forma que, durante o desenvolvimento histórico da metodologia, estudos com diferentes abordagens metodológicas sobre um mesmo sistema de produto produziam resultados e conclusões divergentes; limitando a aplicabilidade e aceitação da ACV como importante ferramenta para análise quantitativa de impactos ambientais nos seus anos iniciais de desenvolvimento (GUINÉE *et al*, 2011).

A progressão histórica da ACV é abordada a seguir para compreender o processo de desenvolvimento da metodologia e os importantes passos tomados para parametrização e padronização da mesma.

3.1.2 Progressão histórica

Os primeiros estudos de avaliação de ciclo de vida surgiram nas décadas de 1960 e 1970 frente à ampliação de debates públicos e preocupações sobre questões como sustentabilidade, eficiência energética, controle de poluentes, escassez de recursos e redução de resíduos sólidos. Os estudos precursores à Avaliação de Ciclo de Vida, como é conhecida atualmente, focavam em perspectivas de eficiência energética e de matéria prima, sendo desenvolvidos a partir da parceria entre empresas privadas - como *Coca Cola Company* e *Basler & Hofman* - e institutos de pesquisa, sob a denominação de *Resource and Environmental Profile Analysis* (REPA).

Desde sua concepção, a Avaliação de Ciclo de Vida teve como principal objetivo a análise de todas as etapas do ciclo de vida do objeto de estudo; desde a extração de matéria prima, transporte, etapas produtivas, aplicação até seu descarte final; de forma a aplicar tal compreensão para quantificar os parâmetros de impacto de eficiência energética e consumo de matéria prima. A partir disso, observou-se o aprimoramento da metodologia com o desenvolvimento de novos estudos e escopos de análise, de modo a incluir avaliações de outros parâmetros de impacto, como: requisitos de recursos, carga de emissões, resíduos sólidos produzidos, impactos sociais e repercussões econômicas.

No entanto, os estudos iniciais de avaliação de ciclo de vida sofreram com a falta de metodologias parametrizadas e terminologia unificada, apresentando procedimentos, terminologias e resultados diversos. Tal panorama limitou a adoção inicial da avaliação de ciclo de vida como método de estudo, identificação e comparação de impactos ambientais.

A partir das décadas de 1990 e 2000, a estrutura e terminologia da metodologia passa a ser amplamente discutida e formalizada, culminando no estabelecimento do termo “Avaliação de Ciclo de Vida” e na publicação da primeira norma técnica internacional que regia sua estrutura geral. Esta norma foi primeiramente publicada pela *International Organization for Standardization (ISO)* em 1997 como “*ISO 14040:1997: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*”.

Diante dos esforços iniciais de discussão da metodologia, tal período também testemunhou os primeiros workshops e fóruns científicos para discussão e parametrização da Avaliação de Ciclo de Vida. De forma a culminar nas primeiras publicações de artigos científico, rótulos ecológicos, softwares de cálculo de impactos ambientais e documentos legislativos baseados na mesma (GUINÉE *et al*, 2011; HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018).

Dada a relevância da Avaliação de Ciclo de Vida como ferramenta de avaliação quantitativa do desempenho ambiental, tal metodologia amplia sua integração em políticas e órgãos ambientais no decorrer dos anos 2000.

Em 2002, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) em conjunto com a Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (SETAC) desenvolveram a Iniciativa de Ciclo de Vida (LCI) - organização com o objetivo de divulgar os conhecimentos de Avaliação de Ciclo de Vida e promover um fórum mundial de divulgação de metodologias baseadas em consensos científicos para incentivar melhores práticas e apoiar a tomada de decisões e desenvolvimento de políticas públicas de sustentabilidade. Assim, a organização segue emitindo relatórios anuais e setoriais sobre práticas e abordagens sólidas de Avaliação de Ciclo de Vida; além de promover cursos introdutórios e deter o maior banco de dados independente relacionado à ACV, o *Global LCA Data network (GLAD)* (GUINÉE *et al*, 2011; Life Cycle Initiative, [S.I.]).

Iniciativas locais também podem ser observadas no mesmo período. Em 2005, a Plataforma Europeia de Avaliação do Ciclo de Vida (“*European Platform on Life Cycle Assessment*”) foi desenvolvida pela União Europeia com o objetivo de promover a disponibilidade, troca e aplicação de dados, metodologias e estudos consolidados de Avaliação de Ciclo de Vida (GUINÉE *et al*, 2011).

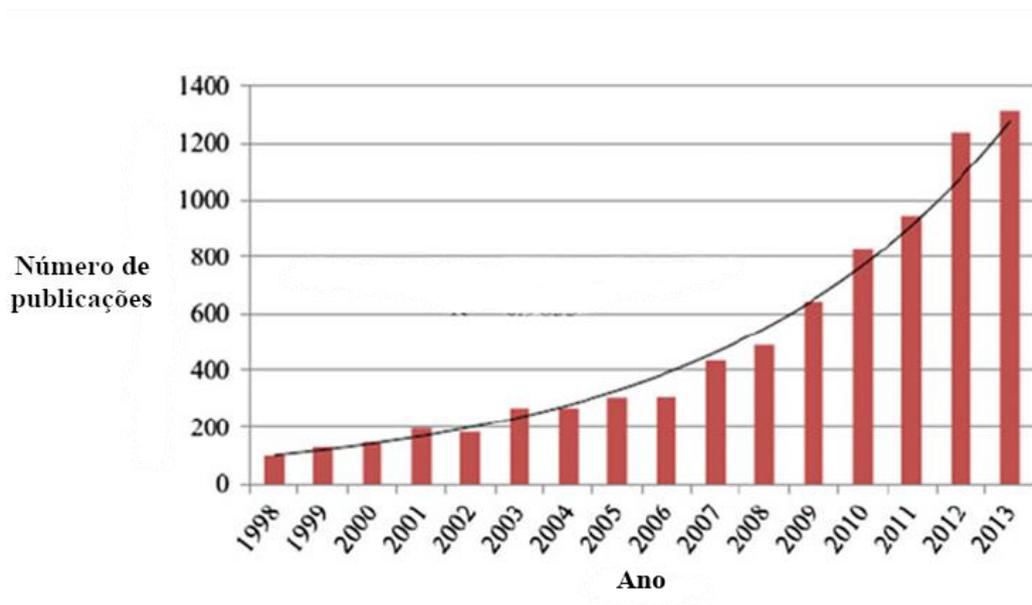
No Brasil, a primeira plataforma informativa sobre o tema (SICV Brasil) foi desenvolvida em 2007 pelo Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia

(Ibict), com objetivo semelhante de disseminar a metodologia de ACV e de reunir produções relevantes e aplicáveis sobre o tema na realidade brasileira (ACV Ibict, [S.I.]).

Desta forma, a disseminação de informações associadas ao tema por instituições governamentais e o investimento em estudos pelo setor privados indicam o estabelecimento da metodologia como ferramenta importante em diagnósticos de impactos ambientais e em iniciativas de sustentabilidade. De modo que se observa um crescimento exponencial nas publicações de artigos científicos e estudos sobre a metodologia e suas abordagens no período entre 1990 e 2013 (CHEN *et al.*, 2014).

De acordo com Chen (2014), as publicações de artigos relacionados à avaliação de ciclo de vida cresceram de 98 artigos em 1998 para 1313 artigos em 2013, sendo estes originários principalmente de países da Europa e América do Norte. A Figura 2 ilustra o crescimento exponencial em publicações relacionadas à metodologia de ACV em inglês de acordo com o *Web of Science*.

Figura 2- Número de publicações de artigos relacionados à Avaliação de Ciclo de Vida



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2014)

Assim, tais estudos de Avaliação de Ciclo de Vida podem ser encontrados em iniciativas de estratégia de negócios, pesquisa e desenvolvimento de produto e processos produtivos, rotulagem de produtos, educação e no desenvolvimento de políticas públicas em setores importantes como agricultura (56%), alimentos (62%), bens de consumo (38%) e energia (37%) (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN,

2018; JOLLIET *et al.*, 2015). Sendo estes regidos pelas duas normas internacionais vigentes sobre a avaliação de ciclo de vida:

- ISO 14040:2006 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura (“*Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*”)
- ISO 14044:2006 – Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações (“*Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*”)

Ambos os documentos são atualizações das normas originalmente redigidas em 1997 e ambas estabelecem uma estrutura geral para ACV, mas esclarecem que não existe uma metodologia única para a mesma (GUINÉE *et al.*, 2011).

No Brasil, as mesmas normas técnicas foram adaptadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) inicialmente em 2001 e as normas vigentes são identificadas como ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT NBR ISO 14044: 2009, respectivamente (ABNT ISO NBR 14040:2009)

Dado que as normas vigentes não têm como objetivo padronizar e detalhar a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida, as diferentes abordagens devem ser compreendidas em seu escopo e relevância para as análises e contextos específicos de cada estudo. De modo que, as normas técnicas vigentes e as principais abordagens da metodologia são estudadas a seguir a partir do enfoque em análises de impacto ambiental de embalagens de alimentos e bebidas.

3.1.3 Metodologias de avaliação de Ciclo de Vida

As normas internacionais vigentes para estabelecimento dos princípios, estrutura, requisitos e orientações para a metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ISO 14040:2006 e ISO 14044:2006) determinam as diretrizes gerais e terminologia de ACV mas não determinam uma abordagem única da mesma. No entanto, tais normas ainda têm importante papel em guiar as diferentes abordagens desenvolvidas da metodologia e em orientar as diretrizes de organizações internacionais associadas à metodologia, como a Plataforma Europeia de Avaliação de Ciclo de Vida (*EPLCA - European Platform on Life Cycle Assessment*) e a Iniciativa de Ciclo de Vida (*Life Cycle Initiative*) (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018).

A ISO 14040:2006 (“*Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*”) estabelece quatro fases principais na estrutura geral para o desenvolvimento de um estudo de Avaliação de Ciclo de Vida:

1. Definição de objetivo e escopo: A avaliação de ciclo de vida inicia-se com a definição de objetivo e escopo claros. Tal processo contribui para que a interpretação de resultados, conclusões e recomendações obtidas nos estágios seguintes sejam coerentes e válidas para a finalidade e aplicação específica do estudo.

O objetivo inicial da Avaliação de Ciclo de Vida deve esclarecer os aspectos de: a aplicação pretendida, razão de execução do estudo, público-alvo da comunicação de resultados e pretensão de publicação ou uso de resultados em afirmações comparativas (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018; ISO 14040:2006); sendo estes parâmetros descritos no Anexo B, Quadro 1.

Após a determinação do objetivo, o escopo da ACV é definido para identificar a abrangência e detalhamento necessários no estudo para o objetivo determinado. De modo a definir: o sistema produtivo estudado, funções do sistema de produto, unidade funcional, fronteira do sistema, processo de alocação, categorias de impacto selecionadas, requisitos de dados, pressupostos, limitações, requisitos iniciais para qualidade de dados e tipo de análise crítica (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018; ISO 14040:2006). De forma que estes parâmetros descritos no Anexo B, Quadro 2.

Deve se ressaltar que a natureza iterativa da ACV implica na possibilidade de modificação de atributos do escopo no decorrer da coleta de dados para cumprir o objetivo original do estudo de avaliação de ciclo de vida.

2. Avaliação de inventário do ciclo de vida (ICV): consiste na coleta de dados, cálculos e alocação de fluxos. Tal cálculo de variáveis de fluxo é um processo iterativo, que leva em consideração o escopo e objetivo iniciais, a compreensão sobre o sistema estudados e as possíveis limitações dos dados encontradas no desenvolvimento do estudo (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018; ISO 14040:2006). Para a execução de ICV, os parâmetros e etapas tomadas incluem a coleta de dados, cálculos de dados e alocação de fluxos, sendo estes parâmetros descritos no Anexo B, Quadro 3.

Tais etapas de ICV resultam na compreensão quantitativa do inventário do ciclo de vida através de parâmetros do fluxo físico de entrada e saída de elementos como matéria prima, emissões, perdas de processo, transporte, sub produtos e produto final em cada uma das etapas do ciclo de vida (ISO 14044:2006).

Dois modelos podem ser aplicados para a coleta de dados e alocação de fluxos na etapa de ICV. Tais modelos determinam a abrangência da análise sobre os impactos ambientais considerados na ACV, sendo estes divididos em:

a. Atributivo: Modelo mais tradicional de ICV em que se analisa o sistema de produto isoladamente para responder à pergunta “qual impacto ambiental associado ao produto X?”. Devido à natureza de tal pergunta, este modelo pode apresentar um elemento de subjetividade na atribuição de impactos em decorrência da análise do sistema de produto de forma isolada de possíveis multifuncionalidades e interações com outros sistemas de produto.

Além disso, o modelo atributivo aplica de valores médios de processos para uma cadeia de suprimento média do contexto de estudo. Por exemplo, uma combinação representativa da matriz energética de um país ou localidade pode ser aplicada para representar os requisitos e impactos de energia de todo o país ou localidade em estudos dentro desse modelo.

b. Consequencial: Modelo de ICV que não realiza o isolamento do sistema de produto analisado, de forma a retirar certos elementos de subjetividade. Neste caso, a questão a ser respondida seria “Quais são as consequências ambientais de consumir produto X?”, de forma a considerar as consequências econômicas e a interação do sistema de produto estudado com demais sistemas para a análise de impactos ambientais.

Tal modelo aplica de processos marginais para a análise da cadeia de suprimentos. Ou seja, considera os processos que sofreram interferência de variações do consumo do sistema de produto analisado

Após a definição do modelo de ICV, a metodologia de abordagens em casos de multifuncionalidade (alocação ou expansão de sistema) deve ser selecionada. As definições de alocação e expansão de sistema são descritas no Anexo B, Quadro 3; de forma que a compreensão dos modelos e metodologias de ICV permite relacionar ambos os parâmetros.

Devido à natureza do modelo consequencial, a metodologia de expansão de sistema é geralmente aplicada para compreender a completude dos efeitos de multifuncionalidade do sistema de produto. Enquanto que o modelo atributivo de ICV permite a aplicação de ambas as metodologias citadas de acordo com o contexto e escopo do estudo específico (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018; ILCD, 2010).

Assim, a Tabela 1 ilustra as recomendações de modelo e metodologia de ICV de acordo com o contexto de decisão do estudo de ACV e as recomendações do Sistema Internacional de Dados de Referência sobre Ciclo de Vida (ILCD).

Tabela 1 - Modelos e metodologias de inventário de ciclo de vida recomendados pela ILCD

Contexto de Decisão	Descrição	Modelo de ICV	Metodologia de ICV para multifuncionalidade
Situação A	Suporte de decisões de escala reduzida e individual	Atributivo	Expansão de sistema
Situação B	Suporte de decisões de escala macro e de mudanças estruturais	Combinação de atributivo e consequencial	Expansão de sistema
Situação C1	Documentação descritiva com benefícios fora do sistema analisado	Atributivo	Expansão de sistema
Situação C2	Documentação descritiva sem benefícios fora do sistema analisado	Atributivo	Alocação

Fonte: Adaptado de Hauschild; Rosenbaum e Olsen (2018)

3. Avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV): etapa em que os cada um dos resultados da avaliação de inventário do ciclo de vida (ICV) é interpretado em seu impacto e relevância para o estudo geral, de forma que a AICV apresenta como elementos obrigatório e opcionais para avaliação de impacto (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018; ISO 14040:2006).:

- Seleção de categorias de impacto (elemento obrigatório);
- Correlação dos resultados do ICV (elemento obrigatório);
- Cálculo de resultados dos indicadores de categoria (elemento obrigatório);
- Normalização (elemento opcional);
- Agrupamento (elemento opcional);
- Ponderação de resultados (elemento opcional)

A descrição dos elementos citados anteriormente pode ser encontrada no Anexo B, Quadro 4. Deve se ressaltar que o nível de detalhamento, seleção dos impactos avaliados e metodologias aplicadas na AICV dependem dos objetivos e escopo específicos de cada estudo. Assim, a AICV foca em analisar questões ambientais previstas no escopo e objetivo iniciais, o que limita a avaliação de impactos

na sua abrangência do impacto ambiental completo do sistema de produto estudado (ISO 14040:2006).

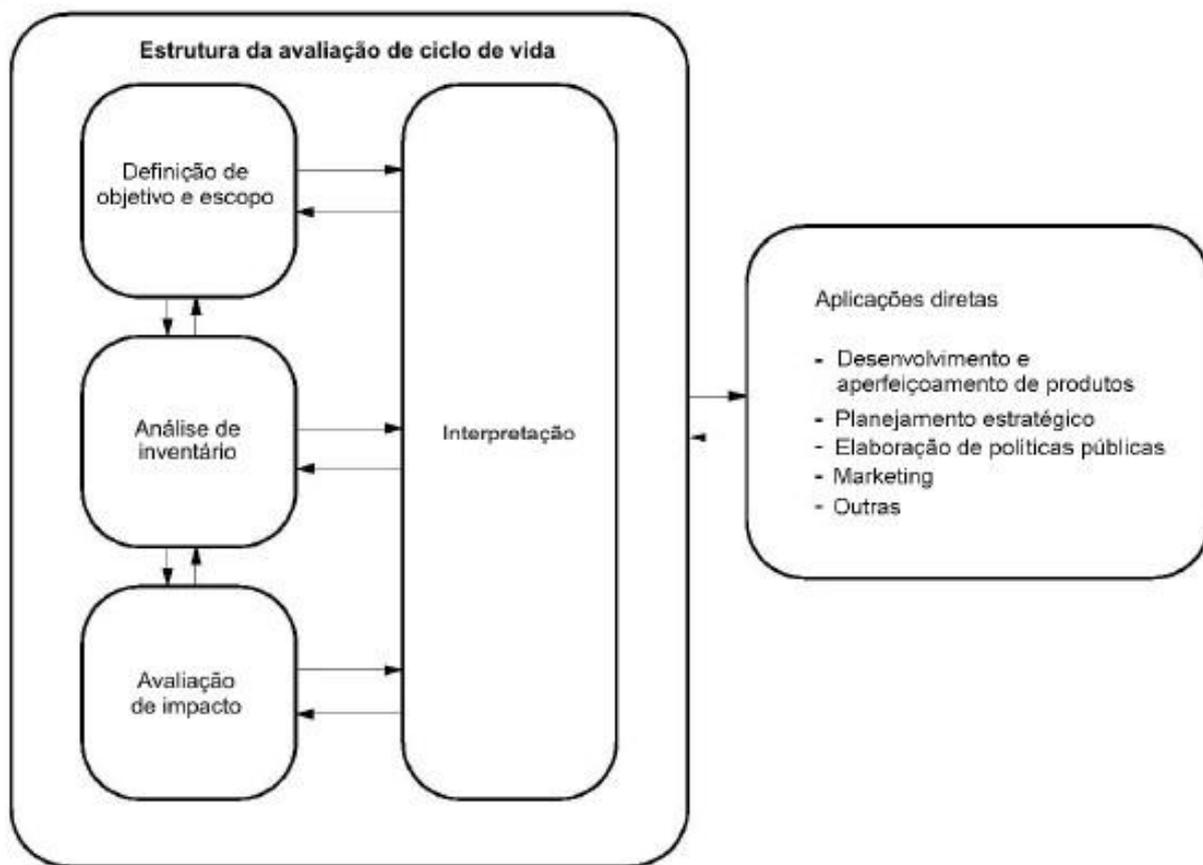
4. Interpretação: Alguns elementos podem ser citados como parte da etapa de interpretação do ciclo de vida:

- Identificação de questões com base nos resultados das etapas de ACV;
- Avaliação do estudo em sua completeza, sensibilidade e consistência;
- Identificação de limitações;
- Conclusões;
- Recomendações do estudo;

A interpretação do ciclo de vida enquadra o estudo como um todo, incluindo as etapas de definição de objetivos e escopo, ICV e AICV. (ISO 14044:2006).

A Figura 3 abaixo ilustra a estrutura geral de ACV e as diferentes etapas definidas pela norma técnica ISO 14040, observa-se a importância da interpretação de resultados destacada pela norma em cada estágio da estrutura geral e antes da aplicação final dos resultados do estudo em planejamentos estratégicos, desenvolvimento e otimização de produtos, elaboração de políticas públicas, entre outras aplicações diretas.

Figura 3 - Etapas da Avaliação de Ciclo de Vida



Fonte: ABNT NBR ISO 14040:2009

Tal figura também salienta a natureza iterativa entre os estágios da ACV para garantir a consistência e plenitude do estudo e seus resultados em correspondência ao objetivo inicial, de modo a contribuir para a aplicabilidade real deste. Assim, os resultados obtidos pela análise de inventário pode fornecer novas perspectivas sobre o escopo inicial, da mesma forma que tais resultados podem contribuir para melhor direcionar os estágios seguintes (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018; ISO 14040:2006).

4 Metodologia

A metodologia aplicada no estudo de embalagens de água segue os parâmetros e estrutura definidos pela metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida. Assim, são definidos os objetivo e escopo iniciais através da análise de amostras de embalagens de água encontradas no mercado brasileiro para os formatos de garrafas PET e caixa cartonada de quinhentos mililitros.

A partir disto, são definidas as unidades funcionais e massas de componentes, de modo que tais valores médios são aplicados no cálculo do Potencial de Aquecimento Global e consumo de energia durante as etapas de Inventário de Ciclo de Vida e Avaliação de Impactos de Ciclo de Vida.

O cálculo dos parâmetros de Potencial de Aquecimento Global e consumo de energia ocorre através de dados coletados nas plataformas Ecoinvest, SICV Brasil e GHG Protocol, de modo a considerar as diferentes etapas produtivas incluídas nas fronteiras e escopo do estudo.

5 Resultados

5.1 Definição de objetivo e escopo

5.1.1 Definição de Objetivo

O presente estudo tem como objetivo analisar e comparar os impactos ambientais de embalagens de água envasada sob o formato de garrafas PET e caixas cartonadas de volumes entre quinhentos e quinhentos e dez mililitros encontrados no mercado brasileiro. De forma a comparar dois sistemas de produto encontrados pelo consumidor final brasileiro sob finalidades similares de embalagem de água envasada. Tal estudo considera um contexto de manufatura brasileiro e um mercado consumidor da região de São Paulo para realizar a análise para consumidores sob este contexto.

5.1.2 Definição de Escopo

5.1.2.1 Definição de sistemas de produto e unidade funcional

Os sistemas de produto a serem analisados consistem em:

- Garrafas PET com tampa de PP e rótulo de PEAD de volume entre quinhentos e quinhentos e dez mililitros para água envasada
- Caixa cartonada com tampa de PEAD de volume de quinhentos mililitros de água envasada

Os parâmetros de número de componentes, material de componentes, peso e volumes dos sistemas de produtos analisados baseiam-se em produtos encontrados no mercado brasileiro, de forma que o estudo considera os valores médios das amostras analisadas para definir as funções e unidades funcionais analisadas no estudo.

As Figura 4 e 5 ilustram as embalagens coletadas na cidade de São Paulo e avaliadas para a análise de ciclo de vida. As propriedades de cada um dos produtos identificados na Figura 4 podem ser encontradas no Anexo E, enquanto que as propriedades das caixas cartonadas identificadas na Figura 5 são descritas no Anexo F.

Figure 4 - Garrafas PET de volume entre 500ml à 510ml do mercado brasileiro



Fonte: Autoria própria

Figure 5 – Caixas cartonadas de volume de 500ml do mercado brasileiro



Fonte: Autoria própria

Os pesos individuais de cada produto listado nas Figuras 4 e 5 podem ser encontrados nos Anexos E e F, de forma que tais parâmetros foram aplicados para calcular um peso médio para cada sistema de produto analisado. A Tabela 2 ilustra o peso médio por volume, o volume de água considerado para unidade funcional e o peso final de cada componente dos sistemas de produto.

Tabela 2 - Propriedades médias dos sistemas de produto e unidades funcionais

Sistema de produto	Subcomponente	Peso médio por volume (g/ml)	Volume de água (ml)	Peso por componente (g)
Garrafa PET	Tampa	3,39E-03	500	1,70
	Rótulo	5,09E-04	500	0,25
	Garrafa	2,51E-02	500	12,53
Caixa cartonada	Tampa	2,06E-02	500	5,16
	Caixa	3,38E-01	500	16,91

Fonte: Autoria própria.

A partir dos pesos de cada componente, dois cenários podem ser desenvolvidos para análise:

- Cenário 1: Percentual de material reciclado em cada componente de acordo com os valores médios do mercado brasileiro. De forma a considerar apenas o percentual de material reciclado reintroduzido na manufatura dos sistemas de produtos estudados;
- Cenário 2: Percentual de material reciclado ideal para os principais componentes do sistema de produto, considerando que todo o material aplicado nas embalagens estudadas é reintroduzido no sistema estudado através de reciclagem;

Dado os dois cenários, deve se destacar que a quantidade de material reciclado considerado para cada um dos tipos de embalagem varia com o tipo de produto considerado. O percentual de material reciclado para PET em 2019 foi de 55%, sendo 23% deste material aplicado na confecção de novas garrafas PET; de forma que o percentual de material reciclado reintroduzido no sistema de garrafas plástica foi de 12,65%.

As caixas cartonadas têm limitada aplicação de material reciclado reintroduzido na confecção destas embalagens devido aos requisitos de resistência associados à camada de papel. Assim, os percentuais aplicados no Cenário 1 e Cenário 2 refletem os dados de material reciclado aplicado nas embalagens cartonadas encontrados por Mourad (2007).

Assim, a Tabela 3 ilustra os percentuais de material reciclado aplicado em cada um dos cenários analisados.

Tabela 3 – Teor de material reciclado para Cenário 1 e Cenário 2 de análise

Sistema de produto	Subcomponente	Cenário 1 – Teor de material reciclado (%)	Cenário 2 – Teor de material reciclado (%)
Garrafa PET	Tampa	0	0
	Rótulo	0	0
	Garrafa	12,65	100
Caixa cartonada	Tampa	0	0
	Caixa	2	22

Fonte: A autoria própria.

5.1.2.2 Metodologia de alocação e reciclagem na análise de ciclo de vida

A análise de ciclo de vida proposta neste estudo busca aplicar do modelo atributivo para uma análise das etapas de manufatura das embalagens, de forma a utilizar valores médios de processos para uma cadeia de suprimento média do contexto apresentado e analisar os sistemas de produto propostos de forma isolada nas suas etapas de manufatura do produto até o seu transporte à pontos de venda.

A análise de multifuncionalidades e sistemas de reciclagem foi realizada através do processo de alocação “*cut-off*” de fluxos, de forma que os impactos relacionados ao processo de reciclagem e os impactos evitados pela supressão de manufatura de material primário pela utilização de material reciclado não são abordados de forma aprofundada no presente estudo.

Assim, o estudo foca na análise dos impactos relacionados a manufatura dos sistemas de produtos propostos, considerando os teores de material reciclado introduzidos na manufatura do produto, mas suprimindo os demais impactos associados à reciclagem associados a processos fora das fronteiras do sistema.

5.1.2.3 Definição de fronteiras do sistema e procedimento de inventário de ciclo de vida

Os sistemas analisados para ambos os tipos de embalagem incluem as etapas de:

- Manufatura de matérias primas (resina PET, resina PP, alumínio);
- Manufatura das embalagens;
- Transportes intermediários entre as diferentes etapas de manufatura;

Destaca-se que impactos relacionados seus seguintes passos do ciclo de vida total do sistema de produto não estão incluídos na presente análise:

- Infraestrutura e equipamentos relacionados necessários para as diferentes etapas do ciclo de vida;
- Manufatura das bebidas a serem embaladas;
- Marketing e venda dos produtos embalados;
- Manufatura, uso e descarte de embalagens secundárias e terciárias;
- Uso e descarte de embalagens primárias;
- Impactos de sistemas de reciclagem de embalagens primárias;

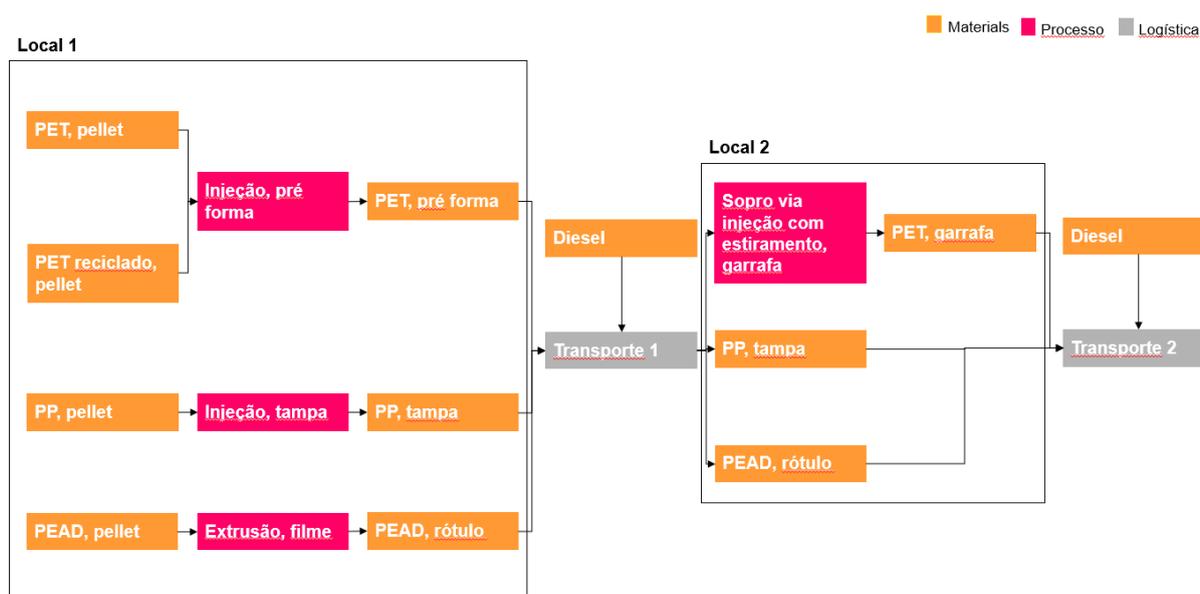
As etapas descritas acima podem afetar as conclusões gerais de avaliação de impactos ambientais dos sistemas de produto analisados. No entanto, a

disponibilidade de dados de ciclo de vida de qualidade relacionados ao contexto local do estudo limita as fronteiras dos sistemas analisados.

Assim, o procedimento de Avaliação de Ciclo de Vida foi realizado através da análise da base de dados Ecoinvest v3.9 (2022), através de licença educacional. Tal plataforma é disponibilizada gratuitamente e permite o acesso à aproximadamente 12.500 processos sob os temas de transporte, energia, manufatura, agricultura, entre outros (HAUSCHILD; ROSENBAUM; OLSEN, 2018). Além disso, dados específicos para o contexto brasileiro foram coletados do banco de dados nacional de inventário de ACV (SICV Brasil) (ACV IBICT, [S.I.]).

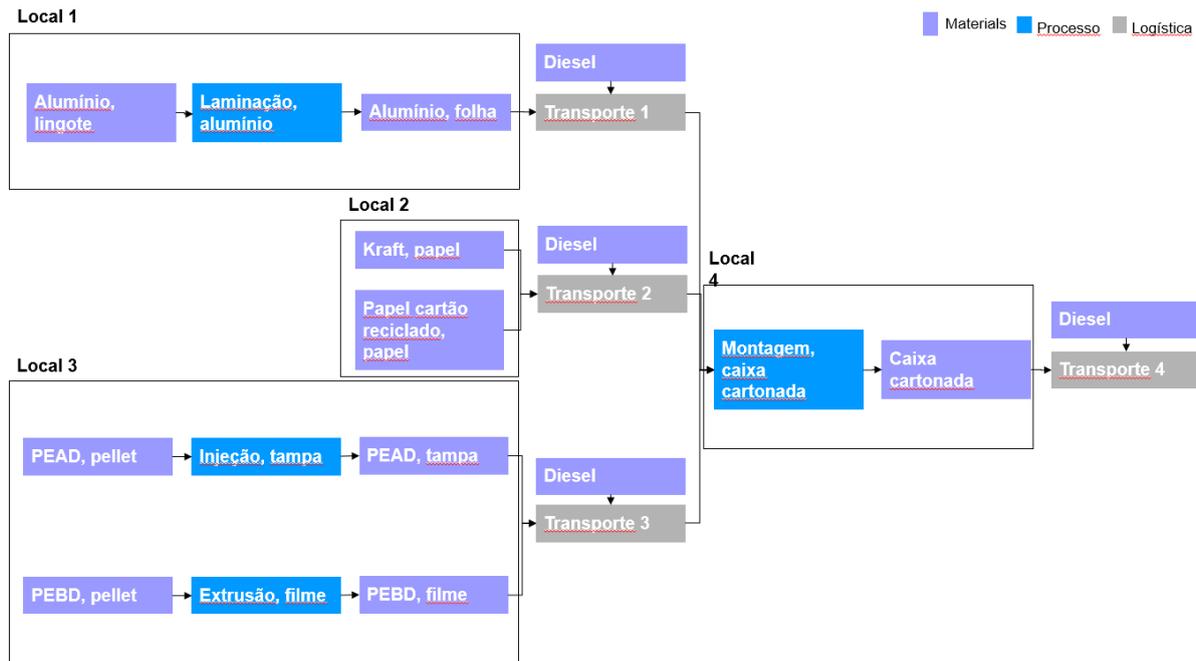
A Figura 6 abaixo ilustra os sistemas de produtos e suas etapas propostas para análise para garrafas PET. Observa-se a divisão do processo produtivo em manufatura de pellets de PET, PP e PEAD, manufatura da garrafa e transporte entre as diferentes etapas produtivas.

Figure 6 - Fronteiras de sistema e fluxos de fabricação de embalagem PET



Fonte: Autoria própria

A Figura 7 abaixo ilustra os sistemas de produtos e suas etapas propostas para análise para caixa cartonada. Observa-se a divisão do processo produtivo em manufatura de pellets de PEAD e PEBD para produção do filme interno da caixa cartonada e a tampa, manufatura da folha de alumínio, manufatura do papel virgem e reciclado, fabricação da caixa final e transporte entre as diferentes etapas produtivas.

Figure 7 - Fronteiras de sistema e fluxos de fabricação de embalagem cartonada

Fonte: Autoria propria

5.1.2.4 Definição de categorias de impacto

As categorias de impacto selecionadas no estudo direcionam os dados a serem coletados para análise de ciclo de vida e a caracterização de impacto considerada. As categorias de impacto a serem consideradas no presente estudo são caracterizadas como de ponto médio, ou seja, são categorias de impacto que consideram a ponderação de impactos diretos relacionados à extrações e emissões calculadas no ICV. Desta forma, o estudo pretende considerar como principal categoria de impacto o Potencial de Aquecimento Global (kg CO₂-Equivalente), esta contabiliza a contribuição do sistema de produto na liberação de gases de aquecimento global, como dióxido de carbono, metano e óxido nitroso. Tais gases são liberados por processos como a queima de combustíveis fósseis e produção de energia, sendo avaliados na quantidade de energia que a emissão de um quilograma de gás absorve em um determinado período de tempo. (KUCZENSKI.; GEYER, 2011; GHG Protocol, 2011).

O Potencial de Aquecimento Global pode ser avaliado em relação às emissões de um quilograma de dióxido de carbono e seus impactos no aquecimento global no período de cem anos, de forma a considerar valores de equivalência entre o dióxido de carbono e demais gases estufa para contabilizar os impactos totais de aquecimento

global. Os valores de equivalência entre os principais gases liberados durante a manufatura das embalagens estudadas e dióxido de carbono podem ser encontrados na Tabela 4. (KUCZENSKI.; GEYER, 2011; GHG Protocol, 2011).

Tabela 4 – Potencial de aquecimento global relacionados ao dióxido de carbono (período de 100 anos)

Composto químico	Fórmula química	Potencial de aquecimento global (kg CO ₂ – eq 100 anos)
Dióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	28
Dióxido nitroso	N ₂ O	265
Hexaflureto de enxofre	SF ₆	23.500

Fonte: GHG Protocol, 2011

5.1.2.5 Inventário de Ciclo de Vida

Os dados de inventário de ciclo de vida para os sistemas de produto analisados foram coletados das bases de dado Ecoinvest v3.9 (2022) e SICV Brasil. Tais bases de dados permitem identificar dados específicos para o Brasil e dados globais, de forma que é dada preferência para informações específicas para o contexto brasileiro.

Além disso, são consideradas as propriedades sob o Cenário 1 e Cenário 2 baseadas nas propriedades médias das unidades funcionais e os percentuais de material reciclado (Tabelas 2 e 3) para cada sistema de produto. Tais parâmetros específicos são abordados a seguir para cada sistema de produto.

5.1.2.5.1 Garrafa de plástico

Os processos considerados no sistema de garrafa PET no mercado brasileiro foram:

- Fabricação de pellets de PET, PP e PEAD;
- Injeção de pré forma da garrafa;
- Injeção de tampa da garrafa;
- Extrusão de filme do rótulo;
- Sopro via injeção com estiramento de garrafa;

- Transporte por caminhão;
- Fabricação de diesel aplicado para transporte;
- Produção de energia elétrica;

A partir das etapas selecionadas, estas foram identificadas nas bases de dados aplicadas no estudo. De forma que a Tabela 5 ilustra as etapas e as respectivas base de dados aplicadas, sua localidade, período de tempo e unidade.

Tabela 5 – Processos de referência aplicados para as etapas do sistema de produto de garrafa plástica

Etapa	Unidade	Base de dado	Localidade	Período de tempo
PET, pellets virgem de grau de garrafa	Quilograma	Ecoinvest v3.9	Global	2015 - 2022
PET, pellets amorfo reciclado	Quilograma	Ecoinvest v3.9	Global	2010 - 2014
PP, pellets virgem	Quilograma	Ecoinvest v3.9	Global	2011 - 2016
PEAD, pellets virgem	Quilograma	Ecoinvest v3.9	Global	2011 - 2016
Injeção de plástico	Quilograma	SICV Brasil soda4LCA 6.3.0	Brasil	2014 - 2016
Extrusão de plástico	Quilograma	SICV Brasil soda4LCA 6.3.0	Brasil	2014 - 2016
Sopro via injeção por estiramento	Quilograma	Ecoinvest v3.9	Global	1993 - 1997
Transporte, caminhão > 32 toneladas	Tonelada* quilômetro	Ecoinvest v3.9	Brasil	2020 - 2021
Produção de diesel, baixo enxofre	Quilograma	Ecoinvest v3.9	Brasil	2014 - 2017
Produção de energia elétrica, voltagem alta	Quilowatt-Hora	Ecoinvest v3.9	Brasil	2014 - 2017
Conversão de energia elétrica, voltagem alta para voltagem média	Quilowatt-Hora	Ecoinvest v3.9	Brasil	2020

Fonte: Autoria própria

As distâncias para análise de impactos de transporte entre as etapas do processo produtivo da garrafa plástica consideram como referência as informações do fabricante da garrafa 1 sobre localidades de compra de pré formas e fabricação de garrafas. Tais produtos foram considerados para o mercado consumidor de São Paulo, região em que as amostras de referência foram coletadas. De forma que dois

locais principais são considerados nas fronteiras do sistema analisado são (SEC, 2022; KO Andina, 2022):

- Local 1: Localização dos fabricantes e vendedores de pré-forma, tampas e rótulos (Lorena). Tal fabricante realiza a injeção de pré-formas e tampas e extrusão de rótulos que são enviados para engarrafadoras de bebidas.
- Local 2: Engarrafadora de Jurubatuba (SP) declarada no rótulo da garrafa 1, que realiza o sopro da pré-forma para a garrafa final e o preenchimento da embalagem com a bebida. Após esta etapa o produto final é transportado para o consumidor final em São Paulo (SP).

Assim, a Tabela 6 ilustra as distâncias entre os locais identificados anteriormente.

Tabela 6 – Distâncias médias de fornecedores de matéria prima, fabricante de embalagem e envasadoras de bebidas e mercado consumidor

Transporte	Origem	Destino	Distância (km)
Transporte 1	Local 1	Local 2	206
Transporte 2	Local 2	Consumidor final	17

Fonte: Autoria própria

5.1.2.5.2 Caixa cartonada

Os processos considerados no sistema de caixa cartonada no mercado brasileiro foram:

- Fabricação de pellets de PEBD;
- Fabricação de filme plástico;
- Fabricação de papel cartonado;
- Fabricação de alumínio;
- Fabricação de folha de alumínio;
- Transporte por caminhão;
- Fabricação de diesel aplicado para transporte;
- Produção de energia elétrica;

A partir das etapas selecionadas, estas foram identificadas nas bases de dados aplicadas no estudo. De forma que a Tabela 7 ilustra as etapas e as respectivas base de dados aplicadas, sua localidade, período de tempo e unidade.

Tabela 7 – Processos de referência aplicados para as etapas do sistema de produto de caixa cartonada

Etapa	Unidade	Base de dado	Localidade	Período de tempo
PEBD, pellets	Quilograma	Ecoinvest v3.9	Global	2011 - 2016
PEAD, pellets	Quilograma	Ecoinvest v3.9	Global	2011 - 2016
Extrusão de plástico	Quilograma	SICV Brasil soda4LCA 6.3.0	Brasil	2014 - 2016
Injeção de plástico	Quilograma	SICV Brasil soda4LCA 6.3.0	Brasil	2014 - 2016
Alumínio, lingote	Quilograma	Ecoinvest v3.9	Global	2015
Laminação	Quilograma	Ecoinvest v3.9	Global	2000 - 2002
Papel kraft, papel cartão	Quilograma	Ecoinvest v3.9	Global	2018 - 2022
Papel reciclado, papel cartão	Quilograma	Ecoinvest v3.9	Global	2017 - 2022
Caixa cartonada, produção	Metro quadrado	Ecoinvest v3.9	Global	1993 - 2000
Transporte, caminhão > 32 toneladas	Tonelada* quilômetro	Ecoinvest v3.9	Brasil	2020 - 2021
Produção de diesel, baixo enxofre	Quilograma	Ecoinvest v3.9	Brasil	2014 - 2017
Produção de energia elétrica, voltagem alta	Quilowatt-Hora	Ecoinvest v3.9	Brasil	2014 - 2017
Conversão de energia elétrica, voltagem alta para voltagem média	Quilowatt-Hora	Ecoinvest v3.9	Brasil	2020

Fonte: Autoria própria

As distâncias para análise de impactos de transporte entre as etapas do processo produtivo da caixa cartonada consideram como referência os percursos aplicados por Mourad (2007) para produtos dos mesmos fabricantes das embalagens cartonadas utilizadas como referenciado neste estudo. Tais distâncias são consideradas entre uma planta de manufatura de embalagens em Monte Mor, no estado de São Paulo, e a distância média em relação à fornecedores de matéria prima, envasadoras de bebidas e o consumidor final, de forma que as distâncias consideradas são resumidas na Tabela 8 em referência aos locais identificados na Figura 7.

Tabela 8 – Distâncias médias de fornecedores de matéria prima, fabricante de embalagem cartonada, envasadoras de bebidas e mercado consumidor

Transporte	Origem	Destino	Distância (km)
Transporte 1	Local 1	Local 4	2070
Transporte 2	Local 2	Local 4	900
Transporte 3	Local 3	Local 4	420
Transporte 4	Local 4	Envasadora	840
	Envasadora	Consumidor Final	200

Fonte: Mourad *et. al.*, 2007

Deve se destacar que, diferente da manufatura de garrafas plásticas, a produção de caixas cartonadas e o envase da bebida são considerados como processos realizados em locais distintos, de forma que o último transporte realizado é considerado com a soma da distância entre o fabricante de embalagens até a envasadora de bebida e a distância entre a envasadora de bebida e o consumidor final.

5.1.2.6 Avaliação de Impacto de Ciclo de Vida

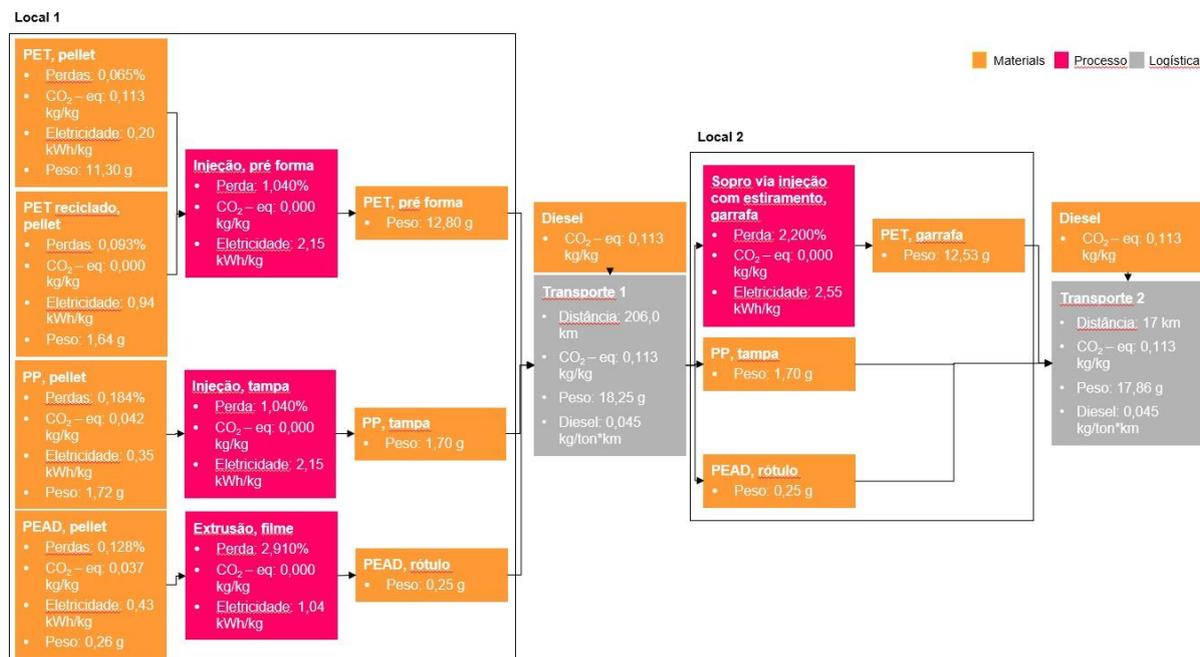
A avaliação de impacto de ciclo de vida considera os dados coletados durante a etapa de inventário de ciclo de vida para calcular os resultados dos indicadores de impacto. Neste estudo, o indicador de impacto selecionado consiste no Potencial de Aquecimento Global, de forma que os cálculos deste indicador de impacto resultam da multiplicação do Potencial de Aquecimento Global com o peso de produto de cada etapa do processo produtivo.

Deve se destacar que o peso de produto de cada etapa depende do peso de produto final (Tabela 3) e a eficiência e perdas de processo de cada etapa de acordo com os dados obtidos nas bases de dados Ecoinvest v3.9 e SICV Brasil.

5.1.2.6.1 Garrafa plástica

Os parâmetros de processo considerados para cada etapa do processo produtivo da garrafa de plástico para o Cenário 1 de propriedades do sistema de produto são identificados na Figura 8. Observa-se as perdas e peso considerados para cada etapa obtidos a partir dos dados coletados no Ecoinvest v3.9 e SICV Brasil e dos valores médios de peso de garrafas plásticas identificados na Tabela 2.

Figure 8 – Características do sistema de produto e fluxos de fabricação de embalagem PET para Cenário 1



Fonte: Autoria própria

Tais dados permitem identificar os requisitos de eletricidade e o Potencial de Aquecimento Global por quilograma de produto obtido em cada uma das etapas, assim como as emissões totais do sistema de produto e seus requisitos totais de energia elétrica. Tais valores são identificados na Tabela 9.

Tabela 9 – Processos de referência aplicados para as etapas do sistema de produto de garrafa plástica para o Cenário 1

(Continua)

Etapa	Produto da etapa	Elettricidade (kWh/kg)	Potencial de aquecimento global (kgCO ₂ -eq/kg)
PET, pellets virgem de grau de garrafa	11,302 g	0,20 kWh/kg	0,1129 kg/kg de produto
PET, pellets amorfo reciclado	1,635 g	0,94 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto
PP, pellets virgem	1,718 g	0,35 kWh/kg	0,0419 kg/kg de produto
PEAD, pellets virgem	0,257 g	0,43 kWh/kg	0,0368 kg/kg de produto
Injeção de plástico, pré forma PET	12,804 g	2,15 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto

Tabela 10 – Processos de referência aplicados para as etapas do sistema de produto de garrafa plástica para o Cenário 1

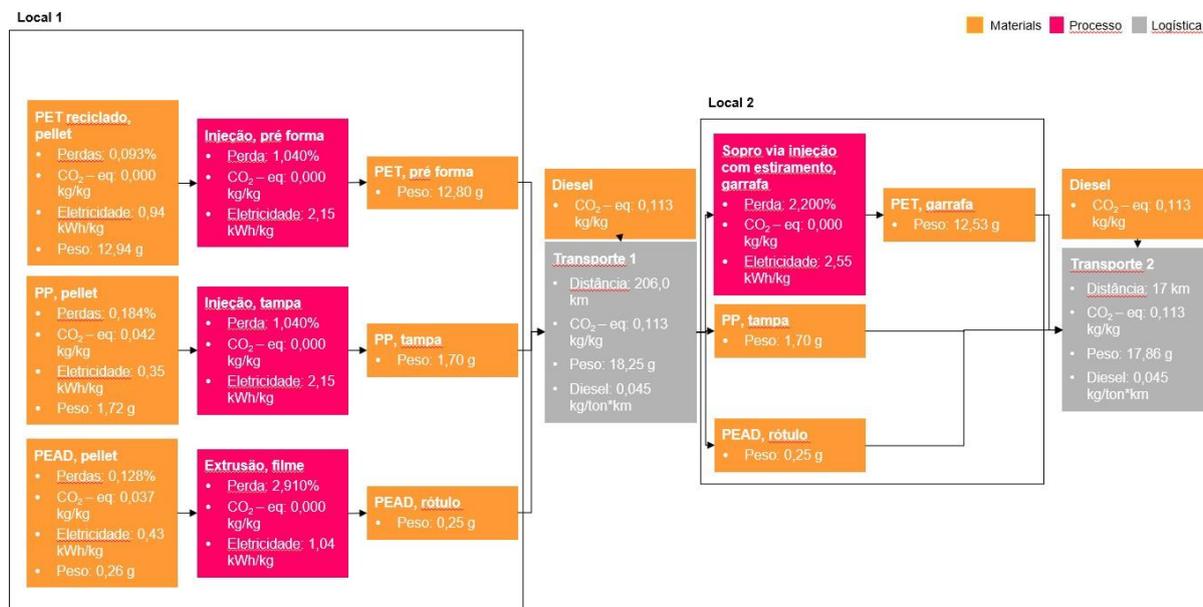
(Conclusão)

Etapa	Produto da etapa	Eletricidade (kWh/kg)	Potencial de aquecimento global (kgCO₂-eq/kg)
Injeção de plástico, tampa PP	1,700 g	2,15 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto
Extrusão de plástico, rótulo PEAD	0,250 g	1,04 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto
Sopro via injeção por estiramento, garrafa PET	12,529 g	2,55 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto
Transporte, caminhão > 32 toneladas	0,00329 ton*km	0,00 kWh/ton*km	0,1617 kg/ton*km de produto
Produção de diesel, baixo enxofre	0,1878 g	0,00 kWh/kg	0,2402 kg/kg de produto
Produção de energia elétrica, voltagem alta	0,0678 kWh	0,000 kWh/kWh	0,0666 kg/kWh de produto
Conversão de energia elétrica, voltagem alta para voltagem média	0,0690 kWh	0,02 kWh/kWh	0,0000 kg/kWh de produto
Total	-	0,069 kWh	0,0065 kg de CO₂-eq

Fonte: Autoria própria

O mesmo processo de cálculo pode ser realizado para o Cenário 2 de propriedades do sistema de produto, de forma que a Figura 9 identifica o processo produtivo, as perdas e pesos em cada etapa.

Figure 9 – Características do sistema de produto e fluxos de fabricação de embalagem PET para Cenário 2



Fonte: Autoria própria

Assim, a Tabela 10 identifica as emissões e os requisitos de energia elétrica em cada etapa do processo produtivo e totais para o Cenário 2 para garrafas plásticas.

Tabela 11 – Processos de referência aplicados para as etapas do sistema de produto de garrafa plástica para o Cenário 2

(Continua)

Etapa	Produto da etapa	Eletricidade (kWh/kg)	Potencial de aquecimento global (kgCO ₂ -eq/kg)
PET, pellets virgem de grau de garrafa	0,00 g	0,20 kWh/kg	0,1129 kg/kg de produto
PET, pellets amorfo reciclado	12,939 g	0,94 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto
PP, pellets virgem	1,718 g	0,35 kWh/kg	0,0419 kg/kg de produto
PEAD, pellets virgem	0,257 g	0,43 kWh/kg	0,0368 kg/kg de produto
Injeção de plástico, pré forma PET	12,804 g	2,15 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto
Injeção de plástico, tampa PP	1,700 g	2,15 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto

Tabela 12 – Processos de referência aplicados para as etapas do sistema de produto de garrafa plástica para o Cenário 2

(Conclusão)

Etapa	Produto da etapa	Eletricidade (kWh/kg)	Potencial de aquecimento global (kgCO₂-eq/kg)
Extrusão de plástico, rótulo PEAD	0,250 g	1,04 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto
Sopro via injeção por estiramento, garrafa PET	12,529 g	2,55 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto
Transporte, caminhão > 32 toneladas	0,00329 ton*km	0,00 kWh/ton*km	0,1617 kg/ton*km de produto
Produção de diesel, baixo enxofre	0,1878 g	0,00 kWh/kg	0,2402 kg/kg de produto
Produção de energia elétrica, voltagem alta	0,0678 kWh	0,000 kWh/kWh	0,0666 kg/kWh de produto
Conversão de energia elétrica, voltagem alta para voltagem média	0,0690 kWh	0,02 kWh/kWh	0,0000 kg/kWh de produto
Total	-	0,077 kWh	0,0058 kg de CO₂-eq

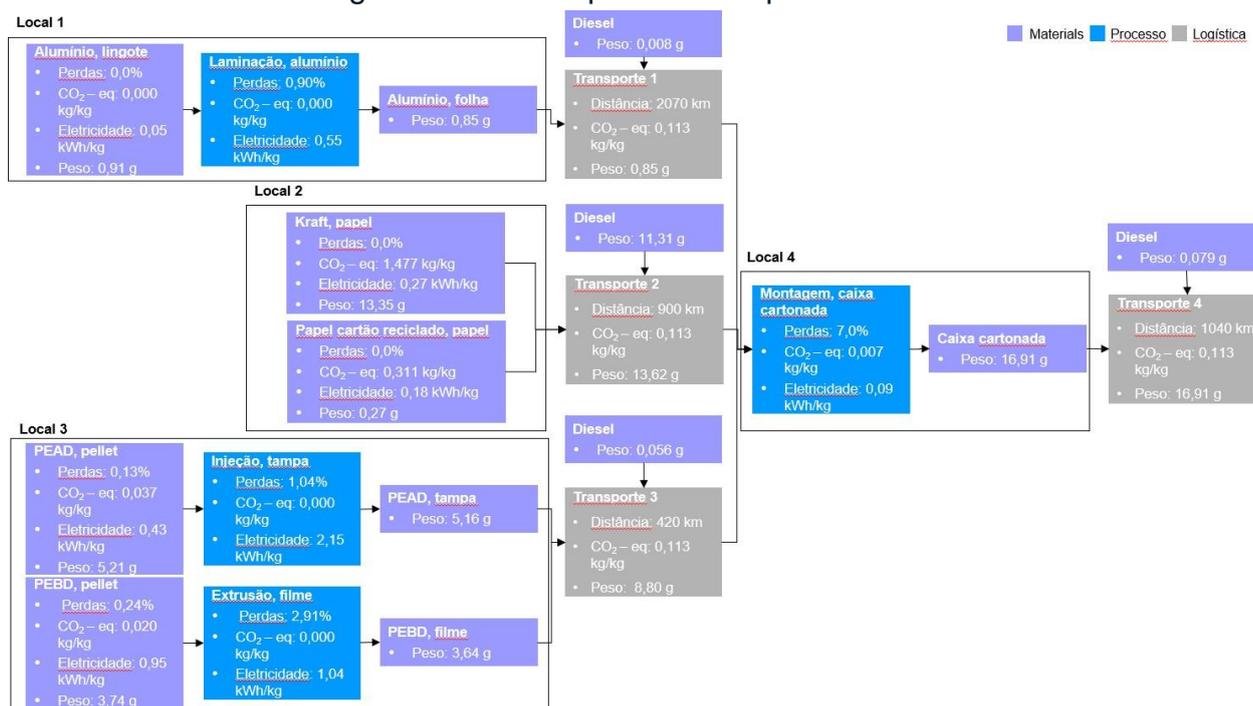
Fonte: Autoria própria

O detalhamento do processo de cálculo do Potencial de Aquecimento Global total das etapas do sistema de garrafa PET podem ser encontrados no Anexo F.

5.1.2.6.2 Caixa cartonada

Os parâmetros de processo considerados para cada etapa do processo produtivo das caixas cartonadas para bebida são identificados na Figura 10. Observe as perdas e peso considerados para cada etapa obtidos a partir dos dados coletados no Ecoinvest v3.9 e SICV Brasil e dos valores médios de peso da caixa cartonada identificados na Tabela 2.

Figure 10 – Características do sistema de produto e fluxos de fabricação de embalagem cartonada para bebida para Cenário 1



Fonte: Autoria própria

Tais dados permitem identificar os requisitos de eletricidade e o Potencial de Aquecimento Global por quilograma de produto obtido em cada uma das etapas, assim como as emissões totais do sistema de produto e seus requisitos totais de energia elétrica. Tais valores são identificados na Tabela 11.

Tabela 13 – Processos de referência aplicados para as etapas do sistema de produto de caixa cartonada para o Cenário 1

(Continua)

Etapa	Produto da etapa	Eletricidade (kWh/kg)	Potencial de aquecimento global (kgCO ₂ -eq/kg)
PEBD, pellets	3,744 g	0,95 kWh/kg	0,0203 kg/kg de produto
PEAD, pellets	5,214 g	0,43 kWh/kg	0,0368 kg/kg de produto
Extrusão de plástico	3,639 g	1,04 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto
Injeção de plástico	5,160 g	2,15 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto
Alumínio, lingote	0,916 g	0,05 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto

Laminação	0,908 g	0,55 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto
-----------	---------	-------------	------------------------

Tabela 14 – Processos de referência aplicados para as etapas do sistema de produto de caixa cartonada para o Cenário 1

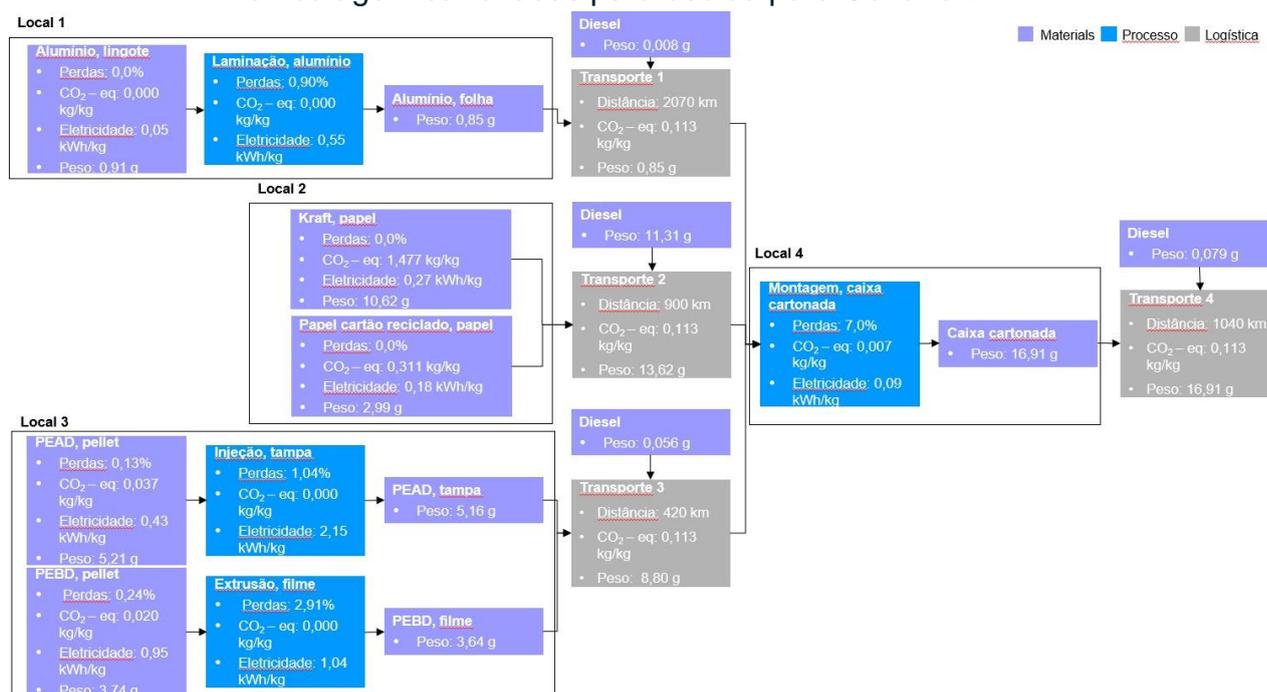
(Conclusão)

Etapa	Produto da etapa	Eletricidade (kWh/kg)	Potencial de aquecimento global (kgCO₂-eq/kg)
Papel kraft, papel cartão	13,349 g	0,27 kWh/kg	1,4771 kg/kg de produto
Papel reciclado, papel cartão	0,272	0,18 kWh/kg	0,3105 kg/kg de produto
Caixa cartonada, produção	0,045 m ²	0,09 kWh/m ²	0,0066 kg/m ² de produto
Transporte, caminhão > 32 toneladas	0,035 ton*km	0,00 kWh/ ton*km	0,1617 kg/ton*km de produto
Produção de diesel, baixo enxofre	1,595 g	0,00 kWh/kg	0,2402 kg/kg de produto
Produção de energia elétrica, voltagem alta	0,029 kWh	0,00 kWh/kg	0,0666 kg/kWh de produto
Conversão de energia elétrica, voltagem alta para voltagem média	0,029 kWh	0,02 kWh/kWh	0,0000 kg/kWh de produto
Total	-	0,029 kWh	0,028 kg de CO₂-eq

Fonte: Autoria própria

O mesmo processo de cálculo pode ser realizado para o Cenário 2 de propriedades do sistema de produto, de forma que a Figura 11 identifica o processo produtivo, as perdas e pesos em cada etapa.

Figure 11 – Características do sistema de produto e fluxos de fabricação de embalagem cartonada para bebida para Cenário 2



Fonte: Autoria própria

Tais dados permitem identificar os requisitos de eletricidade e o Potencial de Aquecimento Global por quilograma de produto obtido em cada uma das etapas, assim como as emissões totais do sistema de produto e seus requisitos totais de energia elétrica. Tais valores são identificados na Tabela 12.

Tabela 15 – Processos de referência aplicados para as etapas do sistema de produto de caixa cartonada para o Cenário 2

(Continua)

Etapa	Produto da etapa	Eletricidade (kWh/kg)	Potencial de aquecimento global (kgCO ₂ -eq/kg)
PEBD, pellets	3,744 g	0,95 kWh/kg	0,0203 kg/kg de produto
PEAD, pellets	5,214 g	0,43 kWh/kg	0,0368 kg/kg de produto
Extrusão de plástico	3,639 g	1,04 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto
Injeção de plástico	5,160 g	2,15 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto
Alumínio, lingote	0,916 g	0,05 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto
Laminação	0,908 g	0,55 kWh/kg	0,000 kg/kg de produto

Tabela 16 – Processos de referência aplicados para as etapas do sistema de produto de caixa cartonada para o Cenário 2

(Conclusão)

Etapa	Produto da etapa	Eletricidade (kWh/kg)	Potencial de aquecimento global (kgCO₂-eq/kg)
Papel kraft, papel cartão	10,624 g	0,27 kWh/kg	1,4771 kg/kg de produto
Papel reciclado, papel cartão	2,997	0,18 kWh/kg	0,3105 kg/kg de produto
Caixa cartonada, produção	0,045 m ²	0,09 kWh/m ²	0,0066 kg/m ² de produto
Transporte, caminhão > 32 toneladas	0,035 ton*km	0,00 kWh/ ton*km	0,1617 kg/ton*km de produto
Produção de diesel, baixo enxofre	1,595 g	0,00 kWh/kg	0,2402 kg/kg de produto
Produção de energia elétrica, voltagem alta	0,029 kWh	0,00 kWh/kg	0,0666 kg/kWh de produto
Conversão de energia elétrica, voltagem alta para voltagem média	0,029 kWh	0,02 kWh/kWh	0,0000 kg/kWh de produto
Total	-	0,029 kWh	0,025 kg de CO₂-eq

Fonte: Autoria própria

O detalhamento do processo de cálculo do Potencial de Aquecimento Global total das etapas do sistema de caixa cartonada pode ser encontrado no Anexo G.

Assim, a análise realizada através das fronteiras dos sistemas analisados, as unidades funcionais definidas a partir de produtos locais e os dados disponibilizados pela plataforma Ecoinvest e SICV Brasil permitiram calcular o Potencial de Aquecimento Global e o consumo de energia elétrica dos dois sistemas de produto propostos, as caixas cartonadas e as garrafas PET. De forma que a Tabela 13 reúne os resultados obtidos para ambos os cenários.

Tabela 17 – Resultados de análise de Potencial de Aquecimento Global e consumo de energia elétrica para os sistemas de produto

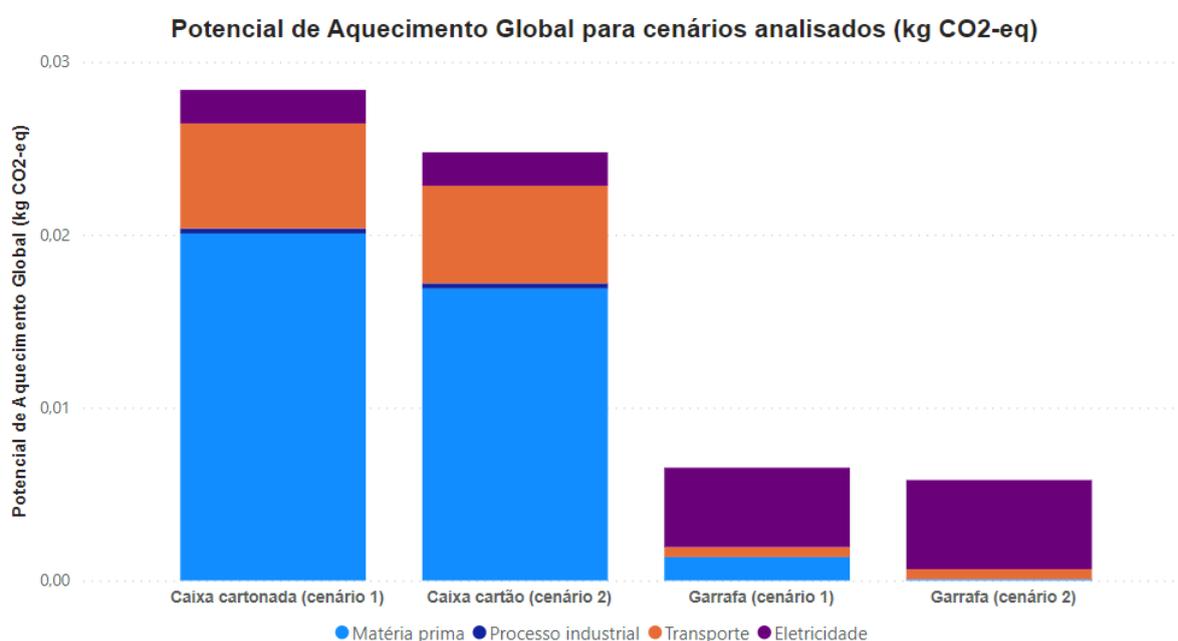
Sistema de produto	Cenário	Potencial de Aquecimento Global (kg CO ₂ -eq)	Consumo de eletricidade (kWh)
Garrafa	Cenário 1	0,0065	0,069
PET	Cenário 2	0,0058	0,077
Caixa cartonada	Cenário 1	0,028	0,029
Caixa cartonada	Cenário 2	0,025	0,029

Fonte: Autoria própria.

6. Discussão e interpretação

A Avaliação de Ciclo de Vida realizada para garrafas PET e caixas cartonadas para dois cenários de material reciclado demonstra o maior Potencial de Aquecimento Global para a categoria de caixas cartonadas. A Figura 12 ilustra a distribuição de Potencial de Aquecimento Global entre as etapas produtivas incluídas na análise.

Figure 12 – Distribuição de Potencial de Aquecimento Global entre sistemas de produto e etapas produtivas



Fonte: Autoria própria

Observa-se que maior parte do impacto ambiental associado as caixas cartonadas está relacionada à produção de matéria prima, enquanto que a maior parte das emissões de garrafas PET encontra-se concentrado na etapa de produção e

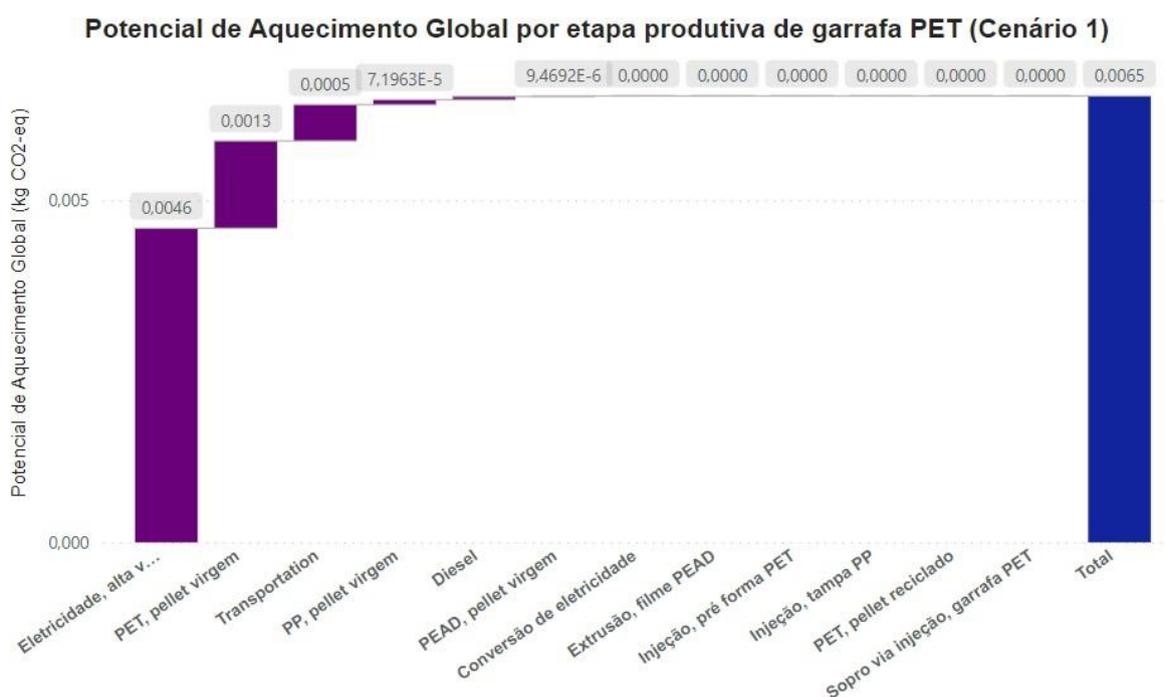
conversão de energia elétrica para as matérias primas e processos produtivos associados à embalagem.

A análise de garrafas PET demonstra a contribuição de produção e conversão de energia elétrica para as emissões e Potencial de Aquecimento Global total, seguido do transporte e produção de polipropileno para manufatura da tampa da garrafa.

O aumento do percentual de material reciclado na garrafa resultou na redução de impactos em 11% no Potencial de Aquecimento Global relacionada à redução das emissões pela produção de pellets virgens de PET para a garrafa.

As Figuras 13 e 14 demonstram a composição do Potencial de Aquecimento Global para garrafas PET dentro dos dois cenários propostos, de forma que é possível observar a variação de emissões totais e das principais etapas de produção e materiais.

Figure 13 – Distribuição de Potencial de Aquecimento Global em etapas produtivas de garrafa PET (Cenário 1)



Fonte: Autoria própria

Figure 14 – Distribuição de Potencial de Aquecimento Global em etapas produtivas de garrafa PET (Cenário 2)

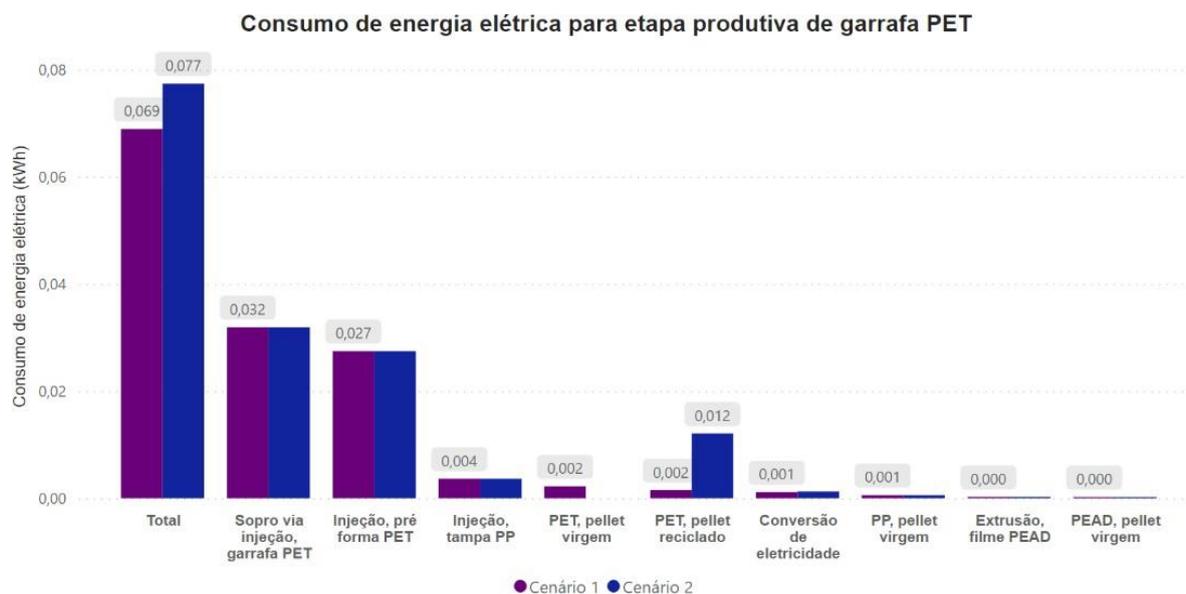


Fonte: Autoria própria

Dentre as contribuições para o consumo de energia elétrica, as etapas produtivas de injeção da pré forma e o sopro via injeção com estiramento foram os processos de maior impacto. De forma que o aumento do teor de material reciclado também teve um aumento no consumo de energia associado à produção de pellets de PET reciclado.

A Figura 15 demonstra a distribuição do consumo de energia entre as etapas produtivas de garrafas PET para o Cenário 1 e 2, de forma a se observar o aumento do consumo de energia relacionado à produção de pellets de PET reciclado.

Figure 15 – Distribuição do consumo de energia elétrica entre as etapas produtivas de garrafa PET



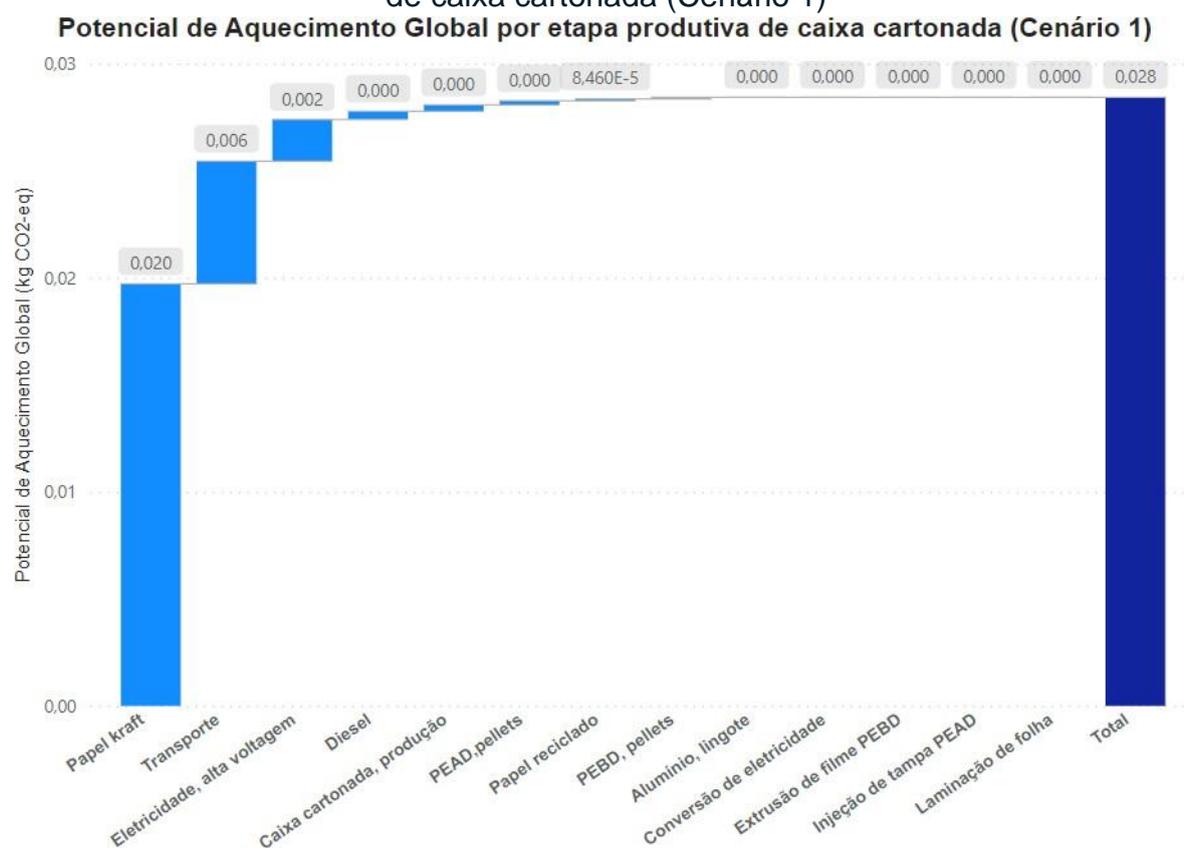
Fonte: Autoria própria

A análise das caixas cartonadas demonstra que a produção de papel virgem é o principal fator que contribui para as emissões deste produto, considerando a composição da caixa de 75% papel e 2% à 22% de material reciclado. Tal etapa inclui os processos realizados dentro da usina de papel para produção de papel kraft, desde o recebimento da madeira até o cozimento de polpa e produção do kraft resultante (Ecoinvest, [S.I.]).

O aumento do percentual de material reciclado para este sistema de produto é capaz de reduzir o Potencial de Aquecimento Global total em 13%. Tal redução de impacto pode ser correlacionada com a redução de emissões associadas ao papel virgem e energia elétrica em 0,004 kg de CO₂ equivalente, enquanto há um aumento discreto das emissões associadas ao papel reciclado.

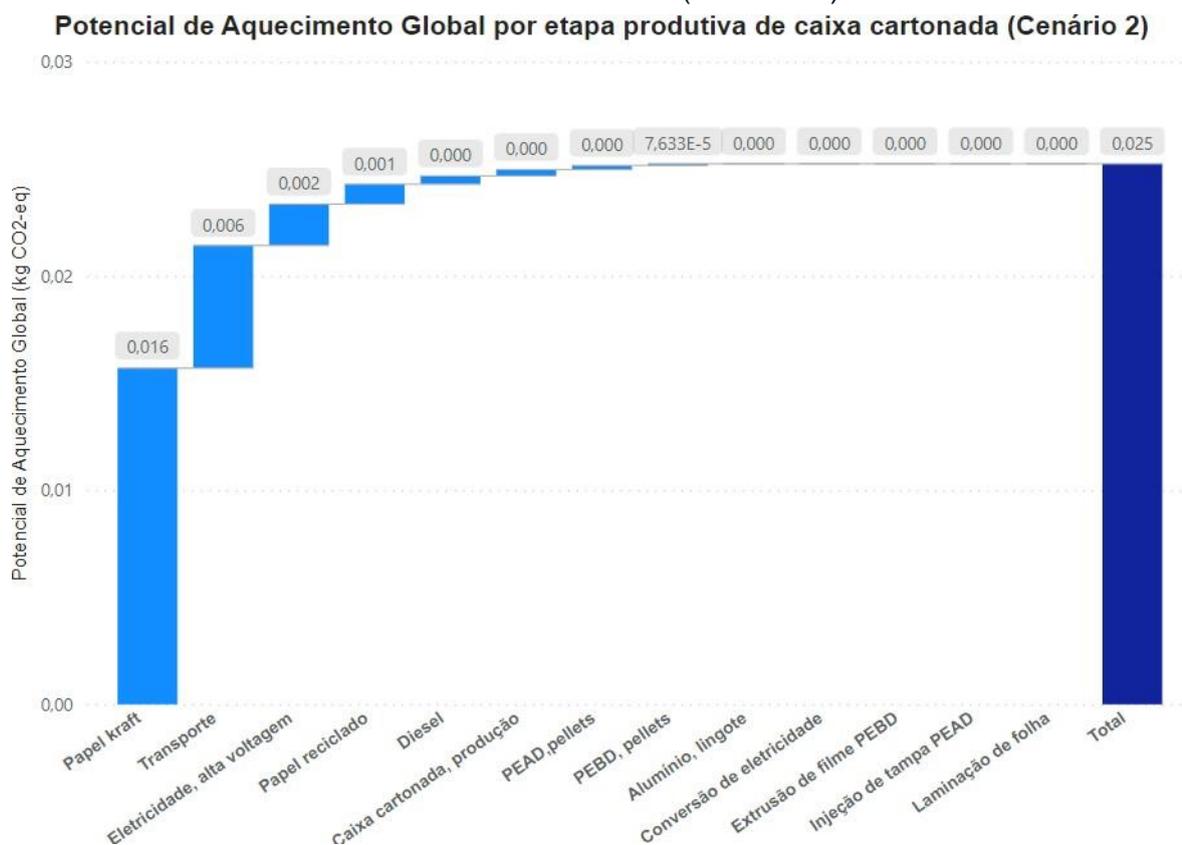
As Figuras 16 e 17 demonstram a composição do Potencial de Aquecimento Global para caixas cartonadas dentro dos dois cenários propostos, de forma que é possível observar a variação de emissões totais e das principais etapas de produção e materiais.

Figure 16 – Distribuição de Potencial de Aquecimento Global em etapas produtivas de caixa cartonada (Cenário 1)



Fonte: Autoria própria

Figure 17 – Distribuição de Potencial de Aquecimento Global em etapas produtivas de caixa cartonada (Cenário 2)



Fonte: Autoria própria

O consumo de energia para caixas cartonadas é menor que o consumo de eletricidade pelas garrafas PET. Neste caso, o maior contribuinte para esta demanda é o processo de injeção da tampa de PEAD e a produção da caixa cartonada final a partir do papel cartão, filme de PEBD e folha de alumínio.

A Figura 18 ilustra a distribuição de consumo de energia entre as etapas produtivas de caixas cartonadas, observa-se a contribuição de etapas como a injeção da tampa e manufatura da caixa cartonada como principais fatores de consumo de eletricidade.

Figure 18 – Distribuição do consumo de energia elétrica entre as etapas produtivas de caixas cartonadas



Fonte: Autoria própria

Assim, observa-se que as etapas de maior contribuição para as emissões de cada sistema de produto variam de acordo com a embalagem analisada. No entanto, as etapas de produção de eletricidade, transporte e produção da principal matéria prima (kraft ou PET) têm grande participação no Potencial de Aquecimento Global.

Além disso, o aumento do teor de material reciclado em ambos os sistemas de produto analisados contribui para a redução das emissões totais do sistema, reduzindo os efeitos associados à matéria prima primária.

A variação no teor de material reciclado entre o Cenário 1 e 2 também pode resultar no aumento do consumo de eletricidade, no caso das garrafas PET. No entanto, este processo não foi suficiente para elevar o Potencial de Aquecimento Global do Cenário 2 em relação ao Cenário 1, mesmo a produção de eletricidade sendo o principal contribuinte para as emissões desse sistema.

Deve se destacar que os resultados de impacto obtidos na Avaliação de Ciclo de Vida são relacionados à categoria de impacto selecionada (Potencial de Aquecimento Global), às unidades funcionais definidas a partir das embalagens encontradas no mercado brasileiro e às etapas produtivas selecionadas para cada sistema de produto. O mesmo não inclui impactos associados a categorias de impacto, como Potencial de Eutrofização, ou à etapas produtivas como descarte e tratamento

de resíduos. De forma que o estudo se demonstra específico para o contexto de manufatura de produtos local estabelecido no escopo da Avaliação de Ciclo de Vida.

Assim, dentre os sistemas de produto analisados, as garrafas PET foram as embalagens com menor Potencial de Aquecimento Global. Schlecht e Wellenreuther (2020) também observaram resultados de Potencial de Aquecimento Global similares entre garrafas PET e caixas cartonadas para o contexto de água envasada, sendo que a análise dos sistemas com total alocação da reciclagem de material não destinado para a produção dos mesmos tipos de embalagem resultou em um menor Potencial de Aquecimento Global para o sistema de garrafas PET. Tal fenômeno pode ser associado ao baixo peso das embalagens PET de água envasada, que resultam em menores emissões pelo principal componente do sistema. De forma que iniciativas de redução de peso de embalagens também pode contribuir para a redução de emissões por estes produtos.

7. Conclusões

O presente estudo teve como objetivo realizar a Avaliação de Ciclo de Vida de embalagens para água envasada. Tal análise foi realizada frente ao cenário de impactos ambientais associados às embalagens descartáveis e ao surgimento de novas alternativas e materiais de embalagens para alimentos e bebidas.

Assim, o estudo realizou a Avaliação de Ciclo de Vida de garrafas PET e caixas cartonadas sob o volume de quinhentos mililitros através da análise do Potencial de Aquecimento Global. Tal processo considerou valores médios de peso definidos através de amostras coletadas no mercado brasileiro para ambos os formatos de embalagem; além de considerar dois possíveis cenários de teor de material reciclado aplicado na confecção de tais embalagens.

Foi possível constatar que as garrafas PET apresentam menores impactos de Potencial de Aquecimento Global, independente do teor de material reciclado considerado. No entanto, as garrafas PET apresentam maiores requisitos de consumo de eletricidade para fabricação de embalagem, sendo tal fator o principal contribuinte para os seus impactos ambientais por Potencial de Aquecimento Global.

As embalagens cartonadas obtiveram maior Potencial de Aquecimento Global, devido aos impactos associados à manufatura do papel Kraft, sendo este o principal e mais pesado componente deste sistema de produto.

Para ambos os tipos de embalagem, o aumento no teor de material reciclado contribui para a redução das emissões devido a redução dos impactos associados à manufatura da principal matéria prima em cada sistema de produto.

Assim, o estudo apresentou informações relevantes sobre iniciativas de redução de impactos ambientais para ambos os tipos de embalagem através do aumento do teor de material reciclado das caixas cartonadas e garrafas PET. Além de identificar o menor impacto ambiental das garrafas PET devido aos menores peso e menores impactos das etapas produtivas da principal matéria prima deste tipo de embalagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIPET. Associação Brasileira da Indústria do PET. **Reciclagem**. [S.I.]. Disponível em: < <https://abipet.org.br/reciclagem/>>. Acesso em: 12 de outubro de 2022

ABIR. Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes e Bebidas não Alcoólicas. **Dados**. [S.I.]. Disponível em: <<https://abir.org.br/o-setor/dados/>> . Acesso em: 20 de maio de 2022

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental — Avaliação do ciclo de vida — Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009.

ACV IBICT. Projeto de Avaliação de Ciclo de Vida Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. **Histórico**. [S.I.] Disponível em: <<https://acv.ibict.br/sobre/historico/>>. Acesso em: 21 de abril de 2022.

ASLANI, H. et al. **Tendencies towards bottled drinking water consumption: Challenges ahead of polyethylene terephthalate (PET) waste management**. Health Promotion Perspective, Iran, v. 11, n. 1, p. 60–68, 2021.

CHEN, H. et al. **A bibliometric investigation of life cycle assessment research in the web of science databases**. The International Journal of Life Cycle Assessment, Alemanha, v. 19, p. 1674–1685, 2014.

COLES, R.; MCDOWELL, D.; KIRWAN, M. J. **Food Packaging Technology**. Oxford: Blackwell Publishing, 2003. 346 p.

DE MARCHI, E. et al. **Plastic packaging goes sustainable: An analysis of consumer preferences for plastic water bottles**. Environmental Science and Policy, Países Baixos, v. 114, n. March, p. 305–311, 2020.

DESHWAL, G. K.; PANJAGARI, N. R. **Review on metal packaging: materials, forms, food applications, safety and recyclability**. Journal of Food Science Technology, Índia, v. 57, n. 7, p. 2377-2392, 2020.

Ecoinvest. **Base de dados**. [S.I.]. Disponível em: < <https://v39.ecoquery.ecoinvent.org/Home/Index> >. Acesso em: 15 de outubro de 2022.

EMBLEM, A.; EMBLEM, H. **Packaging technology: Fundamentals, materials and processes**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012. 579 p.

EPA. United States Environmental Protection Agency. 2022. **Understanding Global Warming Potentials**. Disponível em: < <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>>. Acesso em: 12 de outubro de 2022

EPA. United States Environmental Protection Agency. 1991. **Compilation of Air Pollutant Emissions Factors (AP-42)**, Chapter 6: Organic Chemical Process Industry, Section 6.6.2: Introduction to Plastics - Poly(ethylene terephthalate). Disponível em: <<https://www3.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch06/final/c06s06-2.pdf>>. Acesso em: 12 de outubro de 2022

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. **Production, use, and fate of all plastics ever made**. Science Advances, Washington, v.3, e1700782, p. 25–29, 2017.

GHG Protocol. Greenhouse Gas Protocol. **Global Warming Potential Values**. 2011. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards_supporting/Global%20Warming%20Potential%20Values%20%28Feb%202016%29.pdf>. Acesso em: 14 de novembro de 2021

GORINI, A. P. **Mercado de água (envasada) no Brasil e no mundo**. Bndes Setorial, Rio de Janeiro, n. 11, p. 123-152, 2000.

GUINÉE, J. B et al. **Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future**. Environmental Science & Technology, Washington, v. 45, n. 1, p. 90-96, 2011.

HAUSCHILD, M. Z; ROSENBAUM, R. K.; OLSEN, S. I. **Life Cycle Assessment Theory and Practice**. Cham:Springer International Publishing, 2018. 1216 p.

ILCD. International Reference Life Cycle Data System. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Framework and Requirements for Life Cycle Impact Assessment Models and Indicators**. 2010. Disponível em: <<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Framework-Requirements-ONLINE-March-2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>>. Acesso em: 29 de maio de 2022

ILCD. International Reference Life Cycle Data System. **International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance**. 2010. Disponível em: <<https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC58190>>. Acesso em: 15 de maio de 2022

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 14040**: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Geneva, 2006.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 14044**: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. Geneva, 2006.

JOLLIET, O. et al. **Environmental Life Cycle Assessment**. Boca Raton: CRC Press, 2015. 332 p.

KO Andina. Coca Cola Andina. **Memorial Anual 2021**. 2022. Disponível em: <<https://www.koandina.com/uploads/Memoria-Anual2021.pdf>>. Acesso em 15 de outubro de 2022.

KUCZENSKI, B.; GEYER, R. **Life Cycle Assessment of Polyethylene Terephthalate (PET) Beverage Bottles Consumed in the State of California**. California: California Department of Resources, Recycling and Recovery, 2011. (Report # DRRR-2014-1487)

LEAT, P.; REVOREDO-GIHA, C.; LAMPRINOPOULOU, C. **Scotland's Food and Drink Policy Discussion: Sustainability Issues in the Food Supply Chain**. Sustainability, Suíça, v. 3, n. December, 2011.

UNEP/SETAC LCI. Life Cycle Initiative. **About the Life Cycle Initiative**. 2022. Disponível em: <<https://www.lifecycleinitiative.org/about/about-lci/>>. Acesso em: 21 de abril de 2022.

FLANIGAN, L.; FRISCHKNECHT, R.; MONTALBO, T. **An Analysis of Life Cycle Assessment in Packaging for Food & Beverage Applications**. França: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2013.

MOURAD, A. L. et al. **Influence of recycling rate increase of aseptic carton for long-life milk on GWP reduction**. Resources, Conservation and Recycling, Países Baixos, v. 52, n. 4, p. 678 – 689, 2007.

NOBLE, N. et al. **Packaging Trends for Bottled Water**. Journal of Applied Packaging Research, Nova Iorque, v. 3, n. 3, p. 123, 2009.

PASQUALINO, J.; MENESES, M.; CASTELLS, F. **The carbon footprint and energy consumption of beverage packaging selection and disposal**. Journal of Food Engineering, Reino Unido, v. 103, n. 4, p. 357–365, 2011.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. De. **Poli (Tereftalato de Etileno), PET : Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese , Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem**. Polímeros: Ciência e Tecnologia, São Carlos, v. 19, n. 2, p. 121 - 132, 2009.

SCHLECHT, S.; WELLENREUTHER, F. **Comparative Life Cycle Assessment of Tetra Pak® carton packages and alternative packaging systems for beverages and liquid food on the European market: Final report**. Heidelberg: Institut Fur Energie, 2020

SCHRIJVERS, D; LOUBERT, P.; SONNEMANN, G. **Developing a systematic framework for consistent allocation in LCA**. The International Journal of Life Cycle Assessment, Alemanha, v. 21, n. 7, p. 976 – 993, 2016.

SEC. United States Securities and Exchange Commission. **Annual Report Coca-Cola FEMSA, S.A.B. de C.V.** 2022. Disponível em: <<https://coca-colafemsa.com/wp-content/uploads/2022/04/22-04-08-20F-2021.pdf>>. Acesso em 15 de outubro de 2022

SILVA, I. C. et. al. **Embalagens Tetra Pak e os desafios para o meio ambiente.** Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciência e Educação, São Paulo, v.8, n. 5, 2022.

Tetra Pak. **Newsletter** - Edição 01, Ano 1, Março 2021. 2021. Disponível em: < <https://www.tetrapak.com/content/dam/tetrapak/publicweb/br/pt/sustainability/NL-Sustentabilidade.pdf>>. Acesso em 15 de outubro de 2022.

Zero Waste Europe. **Recycling of multilayer composite packaging:** the beverage carton: A report on the recycling rates of beverage cartons in Germany, Spain, Sweden and the UK. 2020. Disponível em: < https://zerowasteeurope.eu/wp-content/uploads/2020/12/zero_waste_europe_report_-beverage-carton_en.pdf>. Acesso em 15 de outubro de 2022

ANEXO A – QUADRO DE FUNÇÕES FUNDAMENTAIS DE EMBALAGENS

Função	Descrição
Conteção	Embalagens adequadamente projetadas devem ser capazes de reter completamente seu conteúdo sem perdas por vazamentos ou extravios de unidades durante toda a vida útil do produto. Falhas em contenção de produtos por embalagens podem incluir o vazamento em embalagens de sachê na região de selagem e vazamento de produto na região da tampa em garrafas.
Proteção	Consiste na prevenção e redução de danos físicos ao produto durante toda a vida útil do mesmo, desde a fabricação até o uso final pelo consumidor. Danos físicos podem ocorrer em qualquer uma das etapas do ciclo de vidas, mas estes são mais comuns durante os processos de armazenamento e transporte devido a fatores como choques, vibrações, compressão estática e dinâmica, perfurações, exposição à poeira, insetos e roedores, furtos e adulterações, entre outros.
Preservação	Consiste na redução de alterações relacionadas a fatores biológicos e químicos que resultam na deterioração do produto. De forma que a embalagem tem como papel estender a vida útil do produto através da proteção contra fatores de deterioração por agentes bióticos (microorganismos, como fungos e bactérias) e fatores de deterioração por agentes abióticos (exposição à luz e oxigênio ou variações em temperatura e umidade).
Conveniência	O design de embalagens gera oportunidades de integrar recursos que facilitam o manuseio seguro de produtos tanto pelo consumidor final quanto durante as etapas de embalagem e distribuição. Recursos que promovem conveniência e atraem consumidores finais podem incluir: embalagens de fácil abertura por fitas de rasgo ou tampas flip top; recursos para dispensar e direcionar a quantidade ideal de produto como aplicadores de pincel e sprays; e o uso de embalagens prontas para prateleiras e displays próprios para facilitar a disposição em lojas e visualização pelo consumidor final.
Informação	A embalagem pode ser um dos poucos ou único meio de comunicação de informações importantes aos fabricantes, comercializantes e consumidores finais dos produtos. Tais informações podem incluir instruções de uso, informações promocionais e dados legais (nome do produto, peso, fabricante, código de barras, entre outros), sendo que tais informações devem ser de fácil localização e compreensão.
Comunicação e promoção	Fatores como cores, gráficos, formatos e tamanhos de embalagens podem ser aplicados para atrair potenciais compradores e promover o reconhecimento do produto.
Responsabilidade ambiental	Consiste na priorização de medidas de redução de impactos na manufatura e descarte de produtos (reutilização, reciclagem e descarte final);

Fonte: Coles; McDowell; Kirwan (2003, p. 8 – 9); Emblem; Emblem (2012, p. 24 – 49)

ANEXO B – QUADROS DE PARÂMETROS DE ETAPAS DE AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

Quadro 1 - Parâmetros de definição de objetivos na avaliação de ciclo de vida

Etapa	Definição
Definição de aplicação pretendida	Diferentes aplicações podem ser encontradas para um mesmo estudo, exemplos incluem: comparação de sistemas de produtos existentes, desenvolvimento de novos produtos e serviços e desenvolvimento de políticas e estratégias associadas a ACV.
Definição de razão e contexto	<p>Contribui para a compreensão da motivação e o contexto de decisões tomadas dentro do estudo; além de orientar possíveis decisões tomadas a partir deste. Tal estágio da definição de razão e contexto influencia as etapas subsequentes do estudo, como a definição do modelo de LCI aplicado, a qualidade e profundidade necessária dos dados coletados e a necessidade de uma análise crítica.</p> <p>Dado que estudos de ACV podem alavancar tomadas de decisões em diferentes escalas ou ter apenas um caráter descritivo, estes devem esclarecer suas razões fundamentais, intensões de aplicação, sua contribuição na tomada de decisão e a escala de consequências associadas (suporte em decisões estruturais e avaliação de impacto elevado ou suporte em decisões de sistemas de produtos individuais e avaliação de impacto em menor escala).</p>
Definição de público-alvo	<p>Consiste em quem os resultados do estudo pretendem ser comunicados. O público-alvo pode ser composto pelos consumidores finais, organizações não governamentais, companhias fabricantes, organizações privadas, entre outros. A composição do público-alvo afeta a abordagem, profundidade e extensão do inventário, o nível técnico e a interpretação de impactos do estudo.</p> <p>Públicos pouco familiares com as metodologias de ACV, por exemplo, podem requerer abordagens com explicações de conceitos fundamentais da metodologia e termos técnicos. Enquanto que públicos especializados podem incorporar dados internos e confidenciais.</p>
Definição sobre pretensão de uso de resultados em afirmações comparativas	<p>O estudo deve definir caso o mesmo tenha como objetivo ser divulgado ao público e realizar afirmações comparativas entre sistemas de produtos.</p> <p>Caso o estudo tenha a pretensão de ser publicado e incluir afirmações comparativas, as normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044 definem requisitos de execução, documentação, análise crítica e comunicação específicos para garantir a transparência de resultados e comparabilidade.</p>

Fonte: Hauschild; Rosenbaum; Olsen, 2018; e ISO 14040:2006.

Quadro 2 – Parâmetros de definição de escopo na avaliação de ciclo de vida

(Continua)

Etapa	Definição
Sistema de produto	Consiste no conjunto de processos, fluxos e produtos elementares de um produto ou serviço com funções definidas para análise de ciclo de vida.
Funções do sistema de produto	<p>Um mesmo sistema de produto pode apresentar diferentes funções, de forma que estas devem ser identificadas e selecionadas para permitir a definição de unidades funcionais, definição de fronteiras do sistema e a comparabilidade de sistemas de produtos com funções similares.</p> <p>Para comparabilidade adequada entre sistemas de produtos, deve se considerar tanto as funções primárias quanto secundárias dos mesmos. Um conjunto limitado ou único de funções podem ser analisadas no estudo, mas é importante documentar quais funções estão ou não estão sendo analisados no estudo para garantir a compreensão da abrangência e sua análise de impactos.</p>
Unidade funcional (UF)	<p>Consiste na quantificação de um sistema de produto para desempenho da função do mesmo. Esta é aplicada como uma unidade de referência para parametrização e normalização de dados de entrada e saída das etapas de avaliações de inventário, de forma a identificar o fluxo de referência.</p> <p>Para comparações de sistemas de produtos, as unidades funcionais devem ser as mesmas propriedades mensuráveis definidas a partir da função primária dos sistemas.</p>
Requisitos de dados	<p>Identifica as características iniciais de dados necessários para executar o estudo de inventário de ciclo de vida (ICV) e avaliações subsequentes a partir dos sistemas de produtos.</p> <p>Tais dados podem incluir produtos e subprodutos, entradas de matéria prima e energia, emissões associadas, uso de solo e água e outros fatores ambientais.</p>
Requisitos iniciais para qualidade de dados	Os requisitos de qualidade de dados são esclarecidos para atingir o objetivo e escopo estabelecidos previamente. Parâmetros essenciais para qualidades de dados incluem: fonte dos dados, possíveis incertezas (como modelos e pressuposições), cobertura temporal, cobertura geográfica, cobertura tecnológica, completeza, reprodutibilidade, representatividade, consistência e precisão. Caso sejam encontrados dados específicos faltantes, o uso de dados substitutos (nulo, não nulo ou calculado) deve ser justificado.
Pressuposições e interpretações	<p>Pressuposições e interpretações aparecem em diferentes estágios da ACV, de forma que tais decisões se propagam e interferem nos resultados finais do estudo.</p> <p>Assim, as pressuposições e interpretações realizadas devem ser documentadas para garantir a transparência, confiabilidade e comparabilidade do estudo de ACV.</p>

Quadro 3 – Parâmetros de definição de escopo na avaliação de ciclo de vida

(Continuação)

Etapa	Definição
Pressuposições e interpretações	<p>Pressuposições e interpretações aparecem em diferentes estágios da ACV, de forma que tais decisões se propagam e interferem nos resultados finais do estudo.</p> <p>Assim, as pressuposições e interpretações realizadas devem ser documentadas para garantir a transparência, confiabilidade e comparabilidade do estudo de ACV.</p>
Limitações	<p>Limitações na aplicabilidade e abrangência de um estudo de ACV podem resultar dos diferentes estágios de avaliação (objetivo, escopo, avaliação de inventário, avaliação de impactos e interpretação) e das considerações realizadas em planejamentos, definições e pressuposições associadas. De forma que tais decisões devem ser documentadas no estudo para garantir a transparência e aplicabilidade em tomadas de decisão ou contabilidade de impactos ambientais.</p>
Fronteiras do sistema	<p>A ACV baseia-se em modelos para os sistemas de produto para realizar as análises de ICV e AICV, de modo que os sistemas analisados devem apresentar os elementos principais do conjunto físico para representá-lo. Assim, as fronteiras do sistema delimitam quais processos elementares serão considerados no estudo de ACV.</p> <p>A definição das fronteiras do sistema e dos elementos físicos incluídos na análise dependem do objetivo e escopo da ACV, além de considerar as restrições de dados e pressupostos aplicados no estudo. De modo que os critérios aplicados na definição das fronteiras do sistema devem ser esclarecidos para transparência e confiabilidade de resultados.</p> <p>Fronteiras ideais apresentariam todos fluxos elementares como elementos de entrada e saída do sistema. Ou seja, apresentariam como elementos de entradas os materiais e energia que não sofreram com transformações ou interferências humana prévia; enquanto que os elementos de saída do sistema seriam materiais e energias que não sofreria interferência humana subsequente.</p> <p>No entanto, o rastreamento de todas as etapas e seus respectivos dados relacionados a um sistema de produto desde a aquisição de todas as matérias-primas até o descarte de todos os produtos e subprodutos pode ser complexo. De forma que a norma técnica ISO 14040 prevê a quantificação das entradas e saídas de maior impacto nas conclusões gerais do estudo.</p>

Quadro 4 – Parâmetros de definição de escopo na avaliação de ciclo de vida

(Continuação)

Etapa	Definição
Procedimentos de alocação aplicado no inventário do ciclo de vida (ICV)	<p>Durante a etapa de definição de escopo devem ser identificados o modelo e metodologia de inventário de ciclo de vida a serem aplicados no estudo. Estes parâmetros moldam o sistema de produto estudado, os dados a serem aplicados no mesmo e resultam em implicações sobre decisões posteriores no estudo.</p> <p>O modelo de ICV é tradicionalmente dividido entre atributivo ou consequencial; enquanto que as abordagens metodológicas em caso de multifuncionalidade podem ser divididas entre alocação e expansão do sistema.</p> <p>Não existe abordagem única ou consenso na seleção de modelo e método de ICV, de modo que a seleção de tais parâmetros devem ser realizada de acordo com o objetivo de cada estudo.</p>
Categorias de impacto selecionadas e metodologia de avaliação de impactos do ciclo de vida (AICV)	<p>A identificação das categorias de impacto e metodologia de avaliação de impactos de ciclo de vida durante a etapa de definição de escopo tem como objetivo garantir que os parâmetros da etapa de AICV estejam em acordo com o objetivo inicial do estudo e garantir que o planejamento dos dados coletados e cálculos realizados durante a etapa de ICV estejam em acordo com a etapa e procedimentos seguintes de AICV.</p> <p>A seleção das categorias de impacto deve refletir de forma abrangente o panorama de impactos associados ao sistema de produto analisado. Caso categorias de impacto relevantes para o sistema de produto não sejam abordadas no estudo, tal fato deve ser ressaltado durante as etapas de definição de objetivo e escopo.</p> <p>A metodologia de AICV aplicada no estudo depende das categorias de impacto selecionadas, objetivo do estudo e representatividade do mesmo (geográfica, temporal e tecnológica). Dada a complexidade de tais parâmetros, não existe um consenso sobre uma metodologia única de AICV.</p> <p>Etapas opcionais de AICV também incluem a normalização, agrupamento e ponderação de resultados, de forma que os parâmetros aplicados nestas etapas também devem ser especificados durante o estágio de definição de escopo.</p>
Tipos de análise crítica	<p>A análise crítica pode contribuir para credibilidade da análise de ciclo de vida ao verificar a documentação e êxito das classificações, normalizações, agrupamentos e ponderações que permitem a interpretação da ACV para sua aplicação pretendida. A norma técnica internacional ISO 14040 ressalta a importância do envolvimento de especialistas independentes com qualificações técnicas e científicas para avaliar a ACV; de forma que os profissionais envolvidos nessa etapa (especialistas internos, especialistas externos ou painel de partes interessadas) devem ser definidos na etapa de escopo do estudo.</p>

Quadro 5 – Parâmetros de definição de escopo na avaliação de ciclo de vida

(Conclusão)

Etapa	Definição
Tipo de relatório final do estudo	<p>O relatório de processos, resultados, conclusões e recomendações da ACV deve ser claro e transparente para permitir a interpretação e aplicação dos resultados por terceiros. O relatório final pode apresentar diferentes estruturas de acordo com a aplicação pretendida (estudo para uso interno, estudo para uso de terceiros ou estudo comparativo para divulgação ao público).</p> <p>Estudos comparativos para divulgação ao público, por exemplo, apresenta requisições de relatório específicos de acordo com a norma internacional ISO 14044 para garantir a comparabilidade e confiabilidade da publicação. De forma a requerer a descrição da equivalência dos sistemas, a avaliação da completeza das AICVs e os resultados das análises de incertezas e sensibilidade.</p>

Fonte: Hauschild; Rosenbaum; Olsen, 2018; ISO 14040:2006; ISO 14044:2006; Jolliet *et al.*, 2015; e ILCD, 2010.

Quadro 3 - Parâmetros de avaliação de inventário de ciclo de vida

(Continua)

Etapa	Definição
Coleta de dados	<p>Os dados quantitativos de entradas e saídas de processos elementares incluídos nas fronteiras pré definidas do sistema de produto analisado devem ser coletados, medidos, calculados ou estimados.</p> <p>Tais dados podem incluir: entradas de energia, matéria-prima e auxiliares; saídas de produtos, subprodutos, resíduos, liberações atmosféricas; entre outros aspectos ambientais. Estes podem ser coletados de fontes públicas, de forma que a fonte, unidade, qualidade, origem temporal e geográfica e processo de coleta devem ser relatados.</p> <p>Fontes públicas de dados amplamente aplicadas para ACV são identificadas no Anexo C.</p>
Cálculo de dados	<p>Procedimentos de cálculo aplicados sobre os dados coletados e possíveis pressuposições realizadas devem ser documentadas e justificadas.</p> <p>Possíveis cálculos incluem a validação de dados, correlação de dados a processos elementares e o refinamento de fronteiras do sistema.</p> <p>A validação de dados tem como objetivo verificar as informações necessárias a partir dos requisitos de qualidade do estudo. Tal processo pode ser realizado, por exemplo, por cálculos como balanços de massa e energia de entradas e saídas de processos elementares. Caso a validação de dados constate que os dados não atingem os requisitos de dados, fontes alternativas podem ser consultadas.</p> <p>A correlação de dados a processos elementares implementa os fluxos apropriados aos processos elementares a partir dos dados de entrada e saída coletados.</p> <p>Após as análises realizadas na etapa de ICV, uma análise de sensibilidade pode concluir que dados e processos adicionais podem ser necessários para compreensão do sistema de produto; assim como pode se compreender que etapas e dados não significativos podem ser excluídos do mesmo. De forma que as fronteiras do sistema determinadas durante a etapa de definição de escopo podem ser reestabelecidas a partir da ampliação dos conhecimentos sobre o sistema estudado.</p>

Quadro 3 - Parâmetros de avaliação de inventário de ciclo de vida

(Conclusão)

Etapa	Definição
Alocação de fluxos	<p>Os processos de alocação podem ser necessários quando os sistemas estudados incluem múltiplos produtos, funções ou apresenta sistemas de reciclagem (multifuncionalidade), de forma que é necessária a repartição do fluxo de entradas e saídas do processo entre o sistema de produto estudado e outros sistemas existentes.</p> <p>Tal processo deve ser evitado através da divisão de processos elementares que seriam alocados em subprocessos que podem ser avaliados em suas entradas e saídas ou pela expansão das fronteiras de sistema para incluir processos elementares e funções adicionais.</p> <p>No entanto, caso a alocação de fluxo não possa ser evitada, tal processo deve ser realizado de forma que entradas e saídas do sistema sejam subdivididas entre as funções e produtos do sistema, de modo a representar a maneira pela qual tais fluxos são alterados por mudanças nos produtos e funções.</p> <p>Um dos métodos mais aplicado para alocação é o processo “<i>cut-off</i>”. Tal método é aplicado quando a segunda função do produto reciclado não é incluída na análise e apenas os produtos e processos diretamente relacionados à unidade funcional são contabilizados no impacto ambiental. Neste caso, o sistema de produto não inclui impactos associados a etapas que saem das fronteiras do sistema, como processo de reciclagem, recuperação de energia e produção de coprodutos. No entanto, o sistema ainda é capaz de ser beneficiado pelo uso de material reciclado, de forma a reduzir o consumo de material primário.</p>

Fonte: Hauschild; Rosenbaum; Olsen, 2018; ISO 14044:2006; Jolliet *et al.*, 2015 e Schrijvers, Loubert e Sonnemann, 2016.

Quadro 4 - Etapas de avaliação de impacto de ciclo de vida

(Continua)

Etapa	Definição
Seleção de categorias de impacto	<p>As categorias de impacto podem ser divididas em categorias de ponto médio e de ponto final, sendo que a seleção entre estes diferentes pontos apresenta suas vantagens e desvantagens.</p> <p>A caracterização de ponto médio resulta da ponderação de extrações e emissões calculadas no ICV. De forma que esta inclui avaliações de: toxicidade humana, mudanças climáticas, uso de recursos naturais, acidificação, eutrofização, entre outros.</p> <p>Já as categorias de ponto final têm como objetivo auxiliar na compreensão e interpretação dos pontos médios, associando tais impactos singulares com áreas de proteção abrangentes (efeitos sobre saúde humana, qualidade de ecossistema e recursos naturais).</p> <p>A seleção entre categorias de ponto médio e categorias de ponto final ou a combinação entre as abordagens deve ser realizada de acordo com o objetivo do estudo, de forma a analisar os impactos do sistema de produto da forma mais abrangente e documentar as possíveis limitações do estudo.</p>
Correlação de resultados do ICV	<p>Consiste na classificação de resultados do ICV entre as categorias de impacto selecionadas para a AICV. Tal processo busca a correlação de um resultado de ICV exclusivamente para uma categoria de impacto.</p>
Cálculo de resultados dos indicadores de categorias de impacto	<p>Consiste na caracterização e conversão dos resultados do ICV para unidades comuns e soma destes para suas respectivas categorias de impacto, de forma a obter um resultado numérico para o indicador a partir de fatores de caracterização para a conversão dos resultados.</p> <p>O método de cálculo, fatores de caracterização, escolhas de valores e pressuposições realizadas devem ser documentadas.</p>
Normalização	<p>Consiste na definição da magnitude relativa dos resultados de indicadores calculados em relação à uma informação de referência. Assim é possível identificar e avaliar inconsistências, a relevância de diferentes indicadores e preparar procedimentos subsequentes de agrupamento e ponderação de resultados.</p> <p>Tal valor de referência pode consistir de uma soma de entradas e saídas totais de uma área (global ou regional), uma soma de entradas e saídas de uma área por uma base <i>per capita</i> ou outro filtro ou uma soma de entradas e saídas de um cenário específico, como um sistema de produto alternativo.</p>

Quadro 4 - Etapas de avaliação de impacto de ciclo de vida

(Conclusão)

Etapa	Definição
Agrupamento	<p>Consiste na reunião de categorias de impacto em conjuntos de agregação ou hierarquização de acordo com parâmetros pré definidos durante a definição de objetivo e escopo.</p> <p>No caso da hierarquização, deve se destacar que tal processo depende de escolhas de valor em relação à relevância das diferentes categorias, pois tais impactos podem ter diferentes percepções e gravidade para variados indivíduos, organizações ou sociedades.</p>
Ponderação de resultados	<p>Consiste na conversão dos indicadores de categorias de impacto a partir de fatores numéricos definidos por escolhas de valor. Tal processo permite parametrizar os indicadores de categorias de acordo com fatores particulares e a agregação de diferentes categorias de impacto através da parametrização destes.</p> <p>Deve se ressaltar que a definição dos fatores numéricos de ponderação baseia-se em escolhas de valores ao invés de embasamentos científicos, de forma que diferentes indivíduos, organizações e sociedades podem ter diferentes interpretações e resultados de acordo com a relevância associada a diferentes fatores.</p>

Fonte: ILCD, 2010; ISO 14044:2006; e Jolliet *et al.*, 2015.

ANEXO C – QUADRO DE BASES DE DADOS PARA AVALIAÇÃO DE PROCESSOS EM INVENTÁRIO DE CICLO DE VIDA

Nome	Descrição	Referência
<i>Ecoinvest</i>	Banco de dados suíço que contém aproximadamente 12.500 processos (versão 3) organizado sob diferentes temas como transporte, energia, material produção, agricultura, etc. Todos processos estão disponíveis como processos de unidade e sistema e todos os processos são documentado em detalhes. Atualizado regularmente	<i>Ecoinvent</i> ; www.ecoinvent.org
<i>ELCD</i>	Base de dados do <i>JRC</i> da Comissão Europeia, contém mais de 300 conjuntos de dados sobre energia, produção de materiais, descarte e transporte	<i>Joint Research Centre of the European Commission</i> ; https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/index.xhtml
<i>Agri - footprint</i>	Um banco de dados abrangente de <i>LCI</i> em alimentos e biomassa, contendo cerca de 3500 produtos e processos	<i>Blonk Consultants</i> ; www.agri-footprint.com
<i>LCA Food</i>	Banco de dados dinamarquês contendo mais de 600 conjuntos de dados sobre produtos alimentares básicos e processos relacionados à agricultura, aquicultura, pesca, indústria, atacado e supermercado, incluindo resíduos processos de tratamento	2.-0 <i>LCA Consultants and Aarhus University</i> ; www.lcafood.dk

Continua

Nome	Descrição	Referência
<i>Swedish National LCA database</i>	Contém mais de 500 conjuntos de dados de LCI bem documentados em formato SPINE para uma ampla gama de processos industriais e domésticos bens e serviços	Competence Centre for Environmental Assessment of Product and Material Systems of Chalmers University of Technology; http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/
GaBi databases	Bancos de dados separados baseados principalmente em coleta de dados primários. Setores de cobertura de agricultura à eletrônica e indústrias automotivas, têxteis e varejo, até serviços. Contém mais de 10.000 perfis de inventário de ciclo de vida	GaBi; www.gabisoftware.com/international/databases/gabi-databases/
<i>LC-inventories</i>	Mais de 1000 conjuntos de dados de processo, que são correções, atualizações ou extensões do banco de dados ecoinvent v2.2, criado por ESU-Services e outros autores	<i>The Swiss Federal Office for the Environment and ESU-services;</i> www.lc-inventories.ch
NEEDS	Banco de dados projetado para avaliação ambiental de longo prazo. Contém cerca de 800 processos de projeções de energia futura, sistemas de abastecimento, abastecimento futuro de material, e serviços de transporte futuros	<i>Members of a European research project;</i> www.needs-project.org/needswebdb/index.php
NREL	Banco de dados americano com cerca de 300 conjuntos de dados relacionados com a produção de materiais, componentes ou montagem nos EUA.	<i>National Renewable Energy Laboratory;</i> www.nrel.gov/lci

Continuação

Nome	Descrição	Referência
<i>ProBas</i>	Compreende mais de 8.000 conjuntos de dados em energia, produção de materiais, transporte e descarte, diferentes fontes de dados e qualidade dos dados. Focado em processos dentro da Alemanha	<i>German Federal Environmental Agency;</i> www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php
<i>LCA Commons</i>	Mais de 18.000 conjuntos de dados para os EUA em produção agrícola, agropecuária e produtos derivados	<i>USDA;</i> www.lcacommons.gov
<i>Ökobaudat</i>	Base de dados alemã com cerca de 950 conjuntos de dados de declarações ambientais para materiais de construção, processos e processos de transporte	<i>Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety;</i> http://www.oekobaudat.de/en.html

Fonte: Adaptado de Hauschild; Rosenbaum e Olsen (2018, p. 146 - 147)

Nota: Tabela não exaustiva

**ANEXO D – TABELA DE PRODUTOS REFERÊNCIA PARA UNIDADE
FUNCIONAL MÉDIA PARA GARRAFA PET**

Produto	Volume (ml)	Garrafa Material	Garrafa Peso (g)	Tampa Material	Tampa Peso (g)	Rótulo Material	Rótulo Peso (g)
Garrafa 1	500	PET	10,67	PP	0,18	PEAD	1,78
Garrafa 2	510	PET	10,64	-	0,32	PEAD	1,67
Garrafa 3	510	PET	14,15	-	0,27	PEAD	1,59
Garrafa 4	500	PET	15,21	PP	0,26	PEAD	1,81
Média	500	PET	12,531	PP	0,255	PEAD	1,697

Fonte: Autoria propria

**ANEXO E – TABELA DE PRODUTOS REFERÊNCIA PARA UNIDADE
FUNCIONAL MÉDIA PARA CAIXA CARTONADA**

Produto	Volume (ml)	Caixa Material	Caixa Peso (g)	Área caixa (cm²)	Tampa Material	Tampa Peso (g)
Caixa 1	500	Papel	15,29	428	-	6,42
Caixa 2	510	Papel	18,52	475	-	3,90
Média	500	Papel	16,91	452	HDPE	5,16

Fonte: Autoria propria

**ANEXO F – TABELA DE DETALHAMENTO DE POTENCIAL DE
AQUECIMENTO GLOBAL DE ETAPAS DO SISTEMA DE GARRAFAS PET**

Etapa	Unidade de produto da etapa	Emissões de CO₂ (kg)	Emissões de CH₄ (kg)	Emissões de N₂O (kg)	Emissões de SF₆ (kg)	Potencial Total de Aquecimento Global (kg CO₂-eq)
PET, pellets virgem de grau de garrafa	kg	1,13E-01		2,79E-07		1,13E-01
PET, pellets amorfo reciclado	kg					0,00
PP, pellets virgem	kg	4,16E-02	3,21E-06	8,27E-07	5,81E-01	4,19E-02
PEAD, pellets virgem	kg	3,49E-02	1,28E-06	7,04E-06		3,68E-02
Injeção de plástico	kg					0,00
Extrusão de plástico	kg					0,00
Sopro via injeção por estiramento	kg					0,00
Transporte, caminhão > 32 toneladas	Ton* km	1,60E-01	1,07E-07	8,18E-06		1,62E-01
Produção de diesel, baixo enxofre	kg	2,37E-01	2,71E-05	9,30E-06		2,40E-01
Produção de energia elétrica, voltagem alta	kWh	2,85E-02	1,36E-03			6,66E-01
Conversão de energia elétrica, voltagem alta para voltagem média	kWh					0,00

Fonte: Adaptado de Ecoinvest ([S.I.])

**ANEXO G – TABELA DE DETALHAMENTO DE POTENCIAL DE
AQUECIMENTO GLOBAL DE ETAPAS DO SISTEMA DE CAIXA CARTONADA**

Etapa	Unidade de produto da etapa	Emissões de CO₂ (kg)	Emissões de CH₄ (kg)	Emissões de N₂O (kg)	Emissões de SF₆ (kg)	Potencial Total de Aquecimento Global (kg CO₂-eq)
PEBD, pellets	kg	2,02E-02	1,54E-06	3,64E-07		2,04E-02
PEAD, pellets	kg	3,49E-02	1,28E-08	7,04E-06		3,67E-02
Extrusão de plástico	kg					0,00
Injeção de plástico	kg					0,00
Alumínio, lingote	kg					0,00
Laminação	kg					0,00
Papel kraft, papel cartão	kg	1,47E00	2,20E-05	1,13E-05		1,48E00
Papel reciclado, papel cartão	Kg	0,30E00	1,70E-06	3,92E-05		0,31E00
Caixa cartonada, produção	m ²	6,60E-03	6,04E-07	1,39E-08		6,62E-03
Transporte, caminhão > 32 toneladas	Ton* km	1,60E-01	1,07E-07	8,18E-06		1,62E-01
Produção de diesel, baixo enxofre	kg	2,37E-01	2,71E-05	9,30E-06		2,40E-01
Produção de energia elétrica, voltagem alta	kWh	2,85E-02	1,36E-03			6,66E-01
Conversão de energia elétrica, voltagem alta para voltagem média	kWh					0,00

Fonte: Adaptado de Ecoinvest ([S.I.])