

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**LUCIANO ANTONIO GILENO**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA RECICLAGEM DE GARRAFAS PET EM  
CONTEXTO BRASILEIRO: ROTAS B2B (*BOTTLE-TO-BOTTLE*) E B2F (*BOTTLE-  
TO-FIBER*).**

Poços de Caldas-MG

2020

**LUCIANO ANTONIO GILENO**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA RECICLAGEM DE GARRAFAS PET EM  
CONTEXTO BRASILEIRO: ROTAS B2B (*BOTTLE-TO-BOTTLE*) E B2F (*BOTTLE-  
TO-FIBER*).**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciência e Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Felipe Ramos Turci

Poços de Caldas-MG

2020

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca campus Poços de Caldas

Gileno, Luciano Antonio.  
G471a Avaliação do Ciclo de Vida da reciclagem de garrafas PET em  
contexto brasileiro: rotas B2B (*bottle-to-bottle*) e B2F (*bottle-to-fiber*) /  
Luciano Antonio Gileno. – Poços de Caldas/MG, 2020.  
145 f. –

Orientador(a): Luiz Felipe Ramos Turci.  
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) –  
Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2020.  
Bibliografia.

1. Polietileno Tereftalato. 2. Reciclagem. 3. Plásticos. I. Turci,  
Luiz Felipe Ramos. II. Título.

CDD – 628.1

**LUCIANO ANTONIO GILENO**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA RECICLAGEM DE GARRAFAS PET EM  
CONTEXTO BRASILEIRO: ROTAS B2B (*BOTTLE-TO-BOTTLE*) E B2F (*BOTTLE-  
TO-FIBER*).**

A banca examinadora abaixo-assinada,  
aprova a Dissertação apresentada como  
parte dos requisitos para obtenção do  
título de Mestre em Ciência e Engenharia  
Ambiental, pelo Programa de Pós-  
Graduação em Ciência e Engenharia  
Ambiental da Universidade Federal de  
Alfenas.

Área de Concentração: Ciência e  
Engenharia Ambiental.

Aprovada em: 27 de fevereiro de 2020.



Prof. Dr. Luiz Felipe Ramos Turci  
UNIFAL-MG



Prof. Dr. Diogo Aparecido Lopes Silva  
UFSCAR



Prof. Dr. Cláudio Antônio de Andrade Lima  
UNIFAL-MG

## AGRADECIMENTOS

À minha família, pela compreensão e apoio. Em especial, à minha esposa Andréia, cujo incentivo foi um motivador especial para o início, e cujo suporte foi fundamental para condução e conclusão dos estudos. E aos meus filhos João e Pedro, que também entenderam o pai estudante. Estamos juntos, família!

À estrutura que encontrei na UNIFAL-MG, *campus* Poços de Caldas-MG. Aos funcionários, colegas e professores que descobri, a partir de minha inserção no Programa. Aos professores que eu já conhecia de situações anteriores, pela acolhida tão especial. Vocês foram fantásticos. Em especial, meu orientador Prof. Dr. Luiz Felipe Ramos Turci: quanta disposição em ouvir, apoiar, ensinar, corrigir, aprender junto. Enfim, que exemplo de orientação!

E a todos aqueles que tive a oportunidade de uma convivência profissional, anterior ao Mestrado, por duas décadas de dedicação e compromisso mútuos. Experiência impagável. Quanto do que pude me inspirar para este Mestrado, foi fruto de nosso aprendizado coletivo. Meu reconhecimento à escola profissional que tive.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

Este estudo teve por objetivo fazer a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para aprofundar e ampliar o entendimento dos impactos ambientais de duas rotas diferentes para a reciclagem de Polietileno Tereftalato (PET) em contexto brasileiro: 1) a produção de Polietileno Tereftalato Pós-consumo Reciclado (PET-PCR) para aplicação em embalagens alimentícias, pelo processo *bottle-to-bottle* (B2B); e 2) a produção de Fibra de Poliéster Reciclada, para utilização em artigos têxteis, pelo processo *bottle-to-fiber* (B2F). O escopo da ACV foi do “berço ao portão”, abrangendo desde a logística das garrafas PET pós-consumo até o produto final obtido pelas etapas de processamento industrial. Ponto de destaque neste trabalho, os dados primários são todos reais obtidos de uma unidade de reciclagem com capacidade de recuperação de 20 mil t/ano de garrafas PET pós-consumo, situada em Poços de Caldas-MG. Os dados secundários foram coletados da literatura pertinente e de bancos de dados disponíveis para estudos de ACV, com destaque para os dados dos sistemas de produção de energia elétrica, gás natural e diesel, que representam a matriz energética brasileira. As categorias de impacto ambiental avaliadas foram as mais citadas na literatura, para trabalhos relacionados ao tema: Potencial de Aquecimento Global, Acidificação Terrestre, Depleção de Recursos Abióticos, Escassez de Água, Potencial de Depleção de Ozônio, Ecotoxicidade em Água Doce e Toxicidade Humana. Foram utilizadas metodologias recomendadas para o contexto brasileiro, para a avaliação de impacto. Foi feita uma comparação entre B2B e B2F, sendo observado que, das nove categorias avaliadas, em sete delas o B2F apresentou um potencial de impacto ambiental maior. Em relação a produtos similares, foi possível comparar os resultados com os de estudos para outras regiões, nas categorias Potencial de Aquecimento Global e Depleção de Recursos Abióticos – fósseis, e também para algumas características relacionadas ao transporte das garrafas PET, como distância e carga médias. Os *hotspots* ambientais identificados foram relacionados ao consumo de diesel por caminhões na logística de garrafas, e aos consumos de gás natural e de eletricidade nos processos industriais de reciclagem. Foram identificadas oportunidades e discutidas propostas para ganhos ambientais, sendo avaliados os impactos em mudanças na logística de garrafas, através do redimensionamento dos fardos de garrafas PET, do uso de veículo mais adequado e adotando distância de transporte do material coletado compatível com práticas internacionais.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida. Garrafas PET. Polietileno Tereftalato. Reciclagem.

## ABSTRACT

This study aimed to carry out the Life Cycle Assessment (LCA) to deepen and broaden the understanding of the environmental impacts of two different routes for Polyethylene Terephthalate (PET) recycling in the Brazilian context: 1) the production of Post-Consumer Recycled Polyethylene Terephthalate (PET-PCR), for application in food packaging, by the bottle-to-bottle (B2B) process; and 2) the production of Recycled Polyester Fiber, for use in textile artefacts, by the bottle-to-fiber (B2F) process. The scope of the LCA was “cradle to the gate”, ranging from the logistics of post-consumer PET bottles to the final product obtained by the industrial processing steps. Highlight in this work, the primary data are all real obtained from a recycling unit located in Poços de Caldas-MG, with a recovery capacity of 20000 t/year of post-consumer PET bottles. Secondary data were collected from relevant literature and LCA available databases, with an emphasis on data of production system of electricity, natural gas and diesel, which represent the Brazilian energy matrix. The environmental impact categories evaluated were the most cited in the literature, for works related to the theme: Global Warming Potential, Terrestrial Acidification, Abiotic Resources Depletion, Water Scarcity, Ozone Depletion Potential, Freshwater Ecotoxicity and Human Toxicity. Methodologies recommended for the Brazilian context were used for the impact assessment. A comparison between B2B and B2F was done, and it was observed that, of the nine categories evaluated, in seven of them B2F had a greater environmental impact potential. Related to similar products, it was possible to compare the results with those of studies for other regions, in the categories Global Warming Potential and Abiotic Resources Depletion, fossil; and also for some characteristics related to the transport of PET bottles, such as average distance and load. The environmental hotspots identified were related to the diesel consumption by trucks in bottle logistics, and to the consumption of natural gas and electricity in industrial recycling processes. Opportunities were identified and proposals were discussed for environmental gains. The impacts of changes in bottle logistics were assessed, through the resizing of PET bottle bales, the use of the most appropriate vehicle and adopting the transport distance of the collected material compatible with international practices.

Keywords: Life Cycle Assessment. PET bottles. Polyethylene Terephthalate. Recycling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Fluxo de reciclagem de garrafas PET pós-consumo.....	15
Figura 2 –	Hierarquia de minimização de resíduos.....	20
Figura 3 –	Principais resinas consumidas no Brasil, em 2016.....	23
Figura 4 –	Evolução do consumo aparente e índice de reciclagem mecânica de embalagens e equiparáveis do setor plástico.....	27
Figura 5 –	Evolução do consumo de resina PET virgem no Brasil, Grau Garrafa....	28
Figura 6 –	Capacidade instalada e ociosidade presente das recicladoras de PET.....	29
Figura 7 –	Esquema industrial da Facilidade em estudo: Três linhas distintas de Produção, com áreas de Utilidades e Matéria-Prima centralizadas.....	50
Figura 8 –	Esquema de produção de <i>flakes</i> .....	51
Figura 9 –	Esquema de produção de reextrudado amorfo.....	53
Figura 10 –	Esquema de pós-condensação no estado sólido do PET-PCR.....	55
Figura 11 –	Esquema de produção de filamentos.....	56
Figura 12 –	Esquema de produção de fibra cortada.....	58
Figura 13 –	Sistemas de produto modelados pelo agrupamento de etapas do processo. Embora os produtos reciclados finais sejam apenas o B2B e o B2F, tratar o sistema de produto “Da garrafa ao <i>flake</i> ” traz ganhos para os cálculos e para análises e comparações.....	67
Figura 14 –	ICV do B2B.....	101
Figura 15 –	ICV do B2F.....	102
Figura 16 –	Ocupação da Recicladora: % de garrafas consumidas frente à capacidade nominal.....	127

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Densidades de plásticos comuns em forma pura.....	24
Tabela 2 –	Europa – destinação de plástico e embalagens plásticas pós-uso, após coleta.....	26
Tabela 3 –	Resultados da pesquisa por “LCA + PET”, na base de dados Web of Science.....	33
Tabela 4 –	Outros trabalhos selecionados, relacionado ao tema ACV do PET.....	35
Tabela 5 –	Teses e dissertações sobre ACV de PET ou Plástico, no Brasil.....	39
Tabela 6 –	Categorias de impacto ambiental citados em ACV de PET, na literatura. ....	42
Tabela 7 –	Categorias de Impacto Ambiental e métodos de avaliação selecionados.....	43
Tabela 8 –	Resultados da Análise de Inventário da Logística de Abastecimento de Garrafas.....	85
Tabela 9 –	Resultados da Análise de Inventário da Linha de Lavagem.....	88
Tabela 10 –	Resultados da Análise de Inventário da Linha de Extrusão.....	91
Tabela 11 –	Resultados da Análise de Inventário da Linha de Pós-condensação no Estado Sólido.....	93
Tabela 12 –	Resultados da Análise de Inventário da Linha de Fiação.....	95
Tabela 13 –	Resultados da Análise de Inventário da Linha de Estiragem.....	97
Tabela 14 –	Principais fluxos de entrada, B2B e B2F – “do portão ao portão”.....	100
Tabela 15 –	Recursos Energéticos, B2B e B2F – “do portão ao portão”, por etapa....	103
Tabela 16 –	Recursos Energéticos, B2B e B2F – “do portão ao portão”, por subsistema.....	103
Tabela 17 –	Consumo de água, B2B e B2F – “do portão ao portão”, por etapa.....	105
Tabela 18 –	Consumo de recursos energéticos não-renováveis, B2B e B2F.....	106
Tabela 19 –	Consumo de recursos energéticos não-renováveis, “da garrafa ao <i>flake</i> ”.....	107
Tabela 20 –	Consumo de recursos energéticos não-renováveis, “do <i>flake</i> ao PET-PCR” (B2B).....	107

Tabela 21 – Consumo de recursos energéticos não-renováveis, “do <i>flake</i> à Fibra de Poliéster Reciclado” (B2F).....	<b>107</b>
Tabela 22 – Resultados da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida, B2B e B2F – “do berço ao portão”.....	<b>109</b>
Tabela 23 – Resultados da AICV, para o B2B – “do berço ao portão”, por etapa.....	<b>110</b>
Tabela 24 – Resultados da AICV, para o B2B – “do berço ao portão”, por subsistema.....	<b>111</b>
Tabela 25 – Resultados da AICV, para o B2F – “do berço ao portão”, por etapa.....	<b>113</b>
Tabela 26 – Resultados da AICV, para o B2F – “do berço ao portão”, por subsistema.....	<b>114</b>
Tabela 27 – Principais fluxos de entrada e saída, B2B e B2F – “do portão ao portão”.....	<b>119</b>
Tabela 28 – Comparação Relativa, B2B e B2F – AICV, “do berço ao portão”.....	<b>121</b>
Tabela 29 – Destaques da AICV, para B2B e B2F – “do berço ao portão”, por etapa.....	<b>122</b>
Tabela 30 – Destaques da AICV, para B2B e B2F – “do berço ao portão”, por subsistema.....	<b>124</b>
Tabela 31 – <i>Hotspots</i> identificados, para B2B e B2F.....	<b>125</b>
Tabela 32 – Variação de produção mensal e consumos específicos das etapas B2B, no período avaliado.....	<b>128</b>
Tabela 33 – Impacto da melhoria na Logística de Garrafas, no ICV, “do portão ao portão”.....	<b>133</b>
Tabela 34 – Impacto da melhoria na Logística de Garrafas, no ICV, “do berço ao portão”.....	<b>134</b>
Tabela 35 – Impacto da melhoria na Logística de Garrafas, na AICV do B2B, “do berço ao portão”.....	<b>135</b>
Tabela 36 – Impacto da melhoria na Logística de Garrafas, na AICV do B2F, “do berço ao portão”.....	<b>135</b>

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>ABIPET</b>	Associação Brasileira da Indústria do PET
<b>ABIPLAST</b>	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ABS</b>	Acrilonitrila Butadieno Estireno
<b>ACV</b>	Avaliação do Ciclo de Vida
<b>AICV</b>	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
<b>ANVISA</b>	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
<b>B2B</b>	<i>bottle-to-bottle</i>
<b>B2F</b>	<i>bottle-to-fiber</i>
<b>CETESB</b>	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
<b>ETE</b>	Estação de Tratamento de Efluentes
<b>IBICT</b>	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
<b>ICV</b>	Inventário do Ciclo de Vida
<b>IPCC</b>	Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas
<b>MEG</b>	Monoetileno Glicol
<b>MMA</b>	Ministério do Meio Ambiente
<b>PBACV</b>	Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida
<b>PBT</b>	Polibutileno Tereftalato
<b>PC</b>	Pós-consumo
<b>PEAD</b>	Polietileno de Alta Densidade
<b>PEBD</b>	Polietileno de Baixa de Densidade

<b>PET</b>	Polietileno Tereftalato
<b>PET-PCR</b>	Polietileno Tereftalato Pós-consumo Reciclado
<b>PI</b>	Pós-industrial
<b>PNRS</b>	Política Nacional de Resíduos Sólidos
<b>PP</b>	Polipropileno
<b>PS</b>	Poliestireno
<b>PTA</b>	Ácido Tereftálico Purificado
<b>PVC</b>	Policloreto de Vinila
<b>RAM</b>	Método de Contabilidade de Recursos
<b>RAICV</b>	Rede de Pesquisa em Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
<b>RSU</b>	Resíduos Sólidos Urbanos
<b>SAN</b>	Estireno-acrilonitrila
<b>SSP</b>	Pós-condensação no Estado Sólido

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1	OBJETIVOS .....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
2.1	RESÍDUOS PLÁSTICOS E AS QUESTÕES AMBIENTAIS .....	19
2.2	TIPOS DE RECICLAGEM DE PLÁSTICO E SEU ASPECTO ECONÔMICO .....	21
2.3	RECICLABILIDADE DO PLÁSTICO .....	22
2.4	EVOLUÇÃO DAS TAXAS DE RECICLAGEM DE PLÁSTICO .....	25
2.5	BRASIL: PET E SUA RECICLAGEM .....	27
2.6	ACV: ASPECTOS GERAIS DA FERRAMENTA .....	29
2.7	PET E ACV NO MUNDO .....	32
2.8	ACV DO PET NO BRASIL .....	38
2.9	SELEÇÃO PARA O ESTUDO: <i>SOFTWARE</i> DE ACV, CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL .....	41
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	47
3.1	FACILIDADE EM ESTUDO .....	47
<b>3.1.1</b>	<b>Linha de Lavagem, produção de flakes (etapa comum aos processos B2B e B2F)</b> .....	50
<b>3.1.2</b>	<b>Linha de Extrusão e Linha de Pós-Condensação no Estado Sólido, produção de resina PET-PCR (B2B)</b> .....	53
<b>3.1.3</b>	<b>Linha de Fiação e Linha de Estiragem, produção de Fibra de Poliéster Reciclada (B2F)</b> .....	56
<b>3.1.4</b>	<b>Utilidades</b> .....	59
3.2	DADOS DE FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO ....	61
<b>3.2.1</b>	<b>Matéria-prima principal: garrafas PET</b> .....	61
<b>3.2.2</b>	<b>Outros insumos materiais e energéticos</b> .....	62
<b>3.2.3</b>	<b>Subprodutos e resíduos</b> .....	63
<b>3.2.4</b>	<b>Logística de abastecimento de garrafas</b> .....	64

<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	65
4.1	DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO .....	65
<b>4.1.1</b>	<b>Objetivo do estudo</b> .....	65
<b>4.1.2</b>	<b>Escopo do estudo</b> .....	66
4.1.2.1	Sistemas de produto .....	66
4.1.2.2	Função do produto, unidade funcional e fluxos de referência .....	68
4.1.2.3	Fronteira do sistema .....	70
4.1.2.4	Procedimentos de alocação .....	71
4.1.2.5	Categorias de impacto selecionadas, metodologia de avaliação e interpretação .....	72
4.1.2.6	Requisitos de qualidade de dados .....	72
4.1.2.7	Pressupostos .....	74
4.1.2.8	Limitações .....	82
4.1.2.9	Tipo de análise crítica .....	82
4.1.2.10	Tipo e formato do relatório requerido para o estudo .....	82
4.2	ANÁLISE DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA	83
<b>4.2.1</b>	<b>Inventário do Ciclo de Vida, por etapa (abordagem “do portão ao portão”)</b> .....	84
4.2.1.1	Transporte de garrafas PET pós-consumo (dos comerciantes de recicláveis ao Pátio de Armazenagem da Recicladora) .....	84
4.2.1.2	Linha de Lavagem (produção de flake alimentício, para processo B2B, e flakes técnico e verde, para processo B2F) .....	85
4.2.1.3	Linha de Extrusão (processo B2B) .....	90
4.2.1.4	Linha de Pós-condensação no Estado Sólido (processo B2B) .....	92
4.2.1.5	Linha de Fiação (processo B2F) .....	94
4.2.1.6	Linha de Estiragem (processo B2F) .....	96
<b>4.2.2</b>	<b>Inventário do Ciclo de Vida, por sistema de produto (abordagem “do portão ao portão”)</b> .....	99
<b>4.2.3</b>	<b>Inventário do Ciclo de Vida, por sistema de produto (abordagem “do berço ao portão”)</b> .....	106
4.3	AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV) .....	108

<b>4.3.1</b>	<b>AICV do B2B</b> .....	109
<b>4.3.2</b>	<b>AICV do B2F</b> .....	112
<b>4.4</b>	<b>INTERPRETAÇÃO</b> .....	115
<b>4.4.1</b>	<b>Identificação de <i>hotspots</i></b> .....	119
<b>4.4.2</b>	<b>Propostas de melhoria</b> .....	126
4.4.2.1	<b>Saturação da capacidade produtiva</b> .....	126
4.4.2.2	<b>Melhoria na cadeia de suprimento de garrafas PET</b> .....	129
4.4.2.3	<b>Outras possibilidades de ganhos ambientais</b> .....	131
<b>4.4.3</b>	<b>Análise de sensibilidade: melhoria na Logística de Garrafas</b> .....	132
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	137
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	141

## 1 INTRODUÇÃO

A Sustentabilidade é um tema de grande relevância à sociedade. Questões como o esgotamento de recursos naturais, alteração da qualidade do solo, do ar e das águas, mudança climática, dentre outras, ganham destaque na mídia e nas ações públicas, influenciando o comportamento de consumidores e empresas e, portanto, estando cada vez mais presente em diversos mercados.

Um dos grandes problemas associados à rápida e crescente urbanização do planeta tem sido a gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), que afeta diretamente a comunidade por ter grande impacto nas condições de uma bacia hidrográfica, afetando a qualidade do ar, das águas e do solo. A correta disposição dos resíduos é apenas uma das facetas do problema, que se inicia pelas práticas de consumo da sociedade, passando pelas formas de descarte e coleta dos materiais pós-consumo.

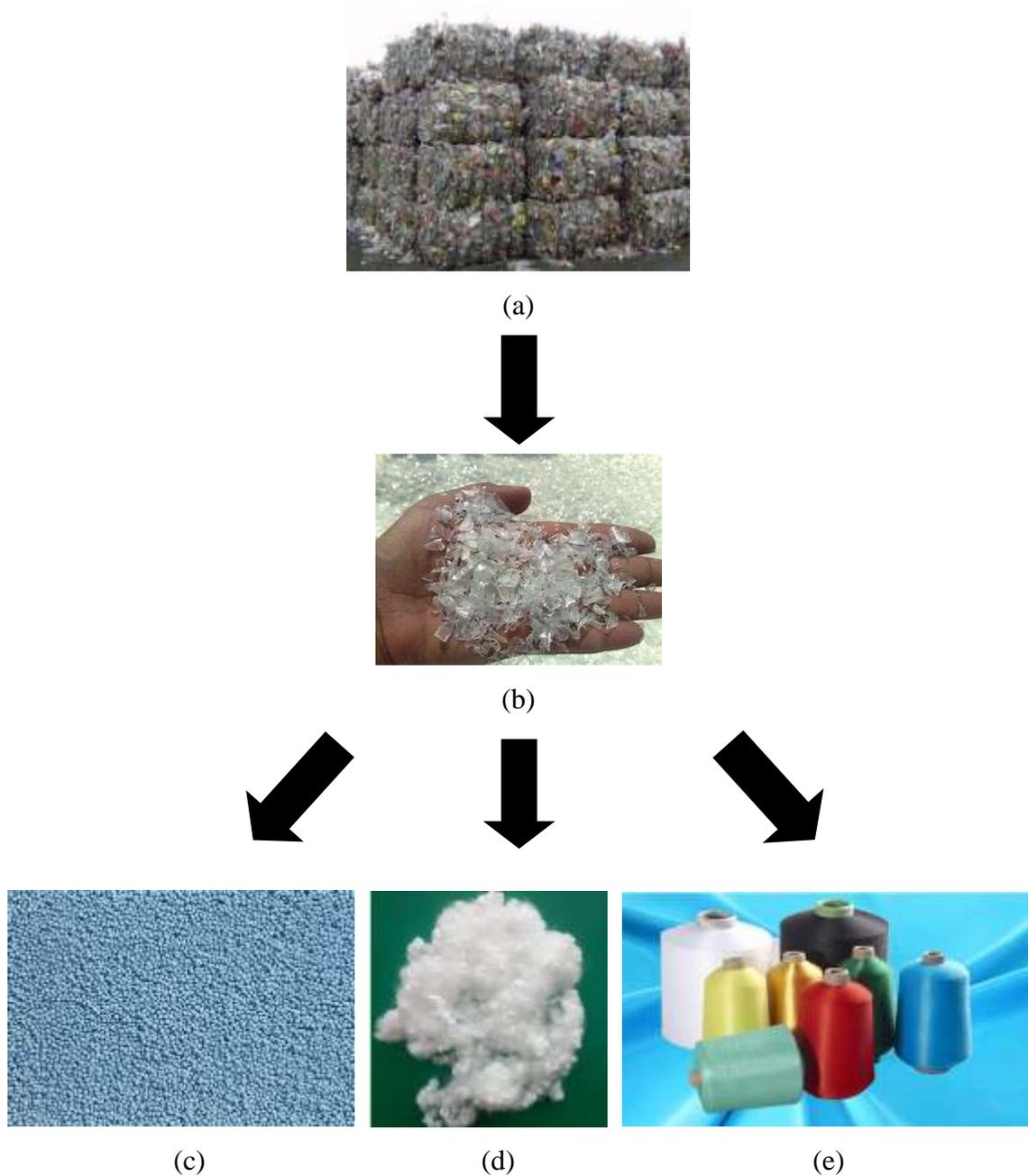
Os plásticos são materiais extremamente presentes na vida moderna e extremamente importantes para o mundo. Apesar dos inúmeros benefícios advindos de seu desenvolvimento e emprego, dentre os materiais comumente citados em discussões ambientais, tem sido frequente nas últimas décadas o destaque negativo dado ao plástico, seja pela sua origem predominante a partir do petróleo (recurso natural fóssil não-renovável), seja pela destinação inadequada de embalagens.

No contexto das cidades, uma das principais consequências negativas de seu uso é o descarte do resíduo plástico, sendo a gestão adequada do pós-consumo dos plásticos um grande desafio para a sociedade. A reciclagem é uma alternativa possível, mas ainda incipiente para a maioria dos plásticos. O Polietileno Tereftalato (PET) chega a ser uma exceção dentre esses materiais, conseguindo ter melhores índices de reciclagem. No Brasil, em 2010, o PET tinha 57,1% de índice de reciclagem de embalagens, sendo que os demais plásticos usados em embalagens tinham índice de 19,4% (WALLIS et al., 2012). Mas ainda há muito que evoluir, visto que não somente há um passivo já constituído nos lixões e aterros bem como ainda é expressiva a quantidade de material que continua não sendo coletado e/ou deixando de ter uma destinação ambiental mais adequada.

A cadeia de reciclagem de PET ocorre em quatro etapas: descarte, recuperação, beneficiamento e transformação (MESQUITA et al., 2014). A Figura 1 ilustra o fluxo típico

das garrafas PET pós-consumo (a) que são recicladas (b) em *pellets* para indústria de embalagens (c) e fibras (d) e filamentos para indústria têxtil (e).

Figura 1 – Fluxo de reciclagem de garrafas PET pós-consumo



Fonte: Autor.

Legenda: (a) fardos de garrafas PET pós-consumo prensadas; (b) *flakes* de PET incolor; (c) *pellets* de PET-PCR; (d) fibra de PET reciclado; (e) filamento de PET reciclado

Existem falhas nos elos da logística reversa do PET que impedem que os volumes de recicláveis aumentem, refletindo na falta de oferta de matéria-prima para as indústrias recicladoras e, logicamente, no acúmulo deste material pós-consumo no meio ambiente (FORMIGONI; RODRIGUES, 2009).

No Brasil, a maior consumidora de PET reciclado é a indústria têxtil (ABIPET, 2019), seja pelo histórico de tecnologia disponível, seja pelas limitações que a própria oferta de garrafas PET pós-consumo impõe com relação à oferta de embalagens coloridas que dificultam seu retorno à indústria de origem. Embora existam diversas rotas alternativas de aplicação do PET reciclado, avanços apontam que a oportunidade da sua inserção no mercado de embalagens alimentícias gere um crescimento de demanda, visto que existe tecnologia disponível denominada *bottle-to-bottle* (B2B) e amparo legal (MAGRINI et al., 2012), alinhando assim o consumo desse plástico a uma das diretrizes do modelo da Economia Circular.

Algumas das ferramentas que podem promover a ampliação da reciclagem desse tipo de material vão desde o incentivo econômico e fiscal, a políticas de comando e controle, passando pela educação e rotulagem ambiental. Diversas métricas ligadas à Sustentabilidade têm sido desenvolvidas no sentido de mapear as variadas opções de produtos e processos e de nortear tomadas de decisão pública e privada, como, por exemplo, a pegada de carbono, a pegada hídrica etc. (THEIS; TOMKIN, 2015). A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta que tem sido utilizada para comparação de alternativas de produtos e para avaliar oportunidades de melhorias, e conseqüentemente pode e deve ser utilizada como suporte para comunicação de sustentabilidade para o poder público, para o mundo empresarial e para os consumidores.

Uma limitação enfrentada nos estudos de ACV no Brasil que envolvem a cadeia produtiva do *pellet* tipo Polietileno Tereftalato Pós-consumo Reciclado (PET-PCR) é a carência de um banco de dados nacional, que represente inventários de acordo com as condições brasileiras (MESQUITA et al., 2014).

Em Poços de Caldas-MG, uma empresa química de produção de poliéster que já tinha parte de sua produção consumindo *flakes* de garrafas PET como matéria-prima para produção de fibra de poliéster reciclada fez um expressivo investimento numa planta de descontaminação de garrafas PET para produção de seu próprio *flake*, com intuito de não somente abastecer a linha de fibras de poliéster recicladas existente, mas também para

expansão de seu portfólio com a produção de PET-PCR grau alimentício, que são *pellets* de resina PET reciclada que atendem os parâmetros de qualidade exigidos pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) para poderem ser transformados em embalagens do setor alimentício. Nessa planta, buscou-se investir na mais moderna tecnologia de reciclagem disponível, com linha de lavagem de garrafas PET de alta performance de qualidade de descontaminação com baixo consumo de água e linha de extrusão com tecnologia comprovada para produção dos *pellets* grau alimentício.

Há alguns anos, foi realizado um estudo exploratório de ACV de PET-PCR dessa mesma unidade recicladora, num Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (DOS SANTOS, 2015). Visto que a realidade de abastecimento de matéria-prima da fábrica chamava a atenção pelas distâncias desde a origem do material, decidiu-se incluir naquele trabalho a etapa de Transporte de Matéria-prima no escopo da avaliação. Os estudos de três meses de operação e a consolidação dos dados de um mês de produção de *pellets* de PET-PCR conduziram a conclusões interessantes aos impactos ambientais analisados, de Aquecimento Global e Acidificação: devido à elevada distância percorrida pela matéria-prima (aproximadamente 700 km, em média), a fase de Transporte de Matéria-Prima apresentou um grande destaque.

A motivação deste estudo de ACV é pelo aprofundamento e ampliação do entendimento dos impactos ambientais da reciclagem de PET desde a disponibilização do resíduo pós-consumo de embalagens PET (coleta de resíduos sólidos urbanos) até a reciclagem e disponibilização do mesmo como matéria-prima para transformação em novos produtos, na forma de PET-PCR grau alimentício – B2B (*bottle-to-bottle*), para voltar a ser uma embalagem, ou fibra de poliéster reciclada – B2F (*bottle-to-fiber*), para ser transformado num artigo têxtil. A base do estudo são os dados primários de uma unidade recicladora de garrafas PET instalada no Sul de Minas Gerais, que tem tecnologia e qualidade reconhecidas no mercado, mas com histórico de ociosidade de produção devido a dificuldades de captação de matéria-prima, devido às atuais características do mercado de recicláveis no país.

Espera-se que este estudo seja divulgado ao público interessado, com os resultados de comparações dos impactos ambientais de modelos, avaliando, por exemplo, se existem diferenças entre as destinações para o resíduo pós-consumo de PET, apresentando as características do segmento no Brasil e identificando algumas oportunidades para seu desenvolvimento.

## 1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral a realização da Avaliação do Ciclo de Vida de duas alternativas tecnológicas de reciclagem para o PET (B2B e B2F), considerando o abastecimento de matéria-prima como garrafas PET pós-consumo e os processos de reciclagem utilizados em empresa recicladora situada em Poços de Caldas-MG.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Construir o modelo de Sistema de Produto das rotas de reciclagem de PET na unidade de reciclagem estudada;
- b) Realizar o Inventário do Ciclo de Vida de duas alternativas tecnológicas de reciclagem para o PET (B2B e B2F);
- c) Disponibilizar referências para novos estudos no Brasil, sendo este o primeiro estudo com dados reais de produção, compartilhando com a sociedade o inventário de dados primários de reciclagem de PET B2B grau alimentício, com tecnologia classe mundial, aplicada na realidade brasileira;
- d) Realizar a Avaliação do Ciclo de Vida de duas alternativas tecnológicas de reciclagem para o PET (B2B e B2F);
- e) Avaliar as alternativas de produção de *pellets* de PET-PCR grau alimentício (B2B) e Fibras de Poliéster Recicladas (B2F), e compará-las em termos ambientais entre si e, também, a estudos internacionais relacionados ao tema, disponíveis na literatura, com a utilização da ACV;
- f) Identificar oportunidades de melhoria de desempenho ambiental e pontos de atenção nos aspectos de consumo de recursos naturais e de insumos e geração de emissões atmosféricas, efluentes e resíduos sólidos;
- g) Levantar elementos para construção de um cenário considerado ideal, referencial e factível, de logística, para abastecimento de matéria-prima, e de processo, para maximização da eficiência energética via saturação da capacidade produtiva da recicladora;
- h) Realizar Análise de Sensibilidade de aspectos desse cenário considerado ideal a fim de avaliar as potencialidades de mitigação de impacto ambiental.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 RESÍDUOS PLÁSTICOS E AS QUESTÕES AMBIENTAIS

De acordo com Keane (2007), o fato dos plásticos serem sintetizados a partir de recursos não renováveis e, via de regra, não serem biodegradáveis (ou terem um processo de biodegradação muito lento), faz com que os resíduos de plástico representem um grave problema ambiental, não respondido adequadamente pela alternativa dos aterros sanitários.

Por isso, com o potencial de acúmulo mais que iminente, torna-se urgente a mudança de abordagem na gestão ambiental, dada a presença dos plásticos em diversos fluxos de resíduos. Segundo Tall (2000), uma definição mais ampla da gestão de resíduos inclui questões como: a reavaliação de materiais antes considerados como resíduos, através da criação de esquemas de reciclagem internos; a percepção e aumento do valor dos materiais que podem ser considerados como um recurso para outros processos; o prolongamento da vida útil ou reutilização do produto; e a redução do consumo de materiais, através de projetos e tecnologia modificados.

De acordo com Arena et al. (2003), “os plásticos constituem a aplicação mais inteligente do petróleo cru, uma vez que mais de 80% desse valioso recurso ainda é usado para a produção direta de energia”. Prossegue sustentando que “são o material de engenharia de nossa época, sendo usados para substituir materiais tradicionais, como madeira, vidro e metal, numa ampla variedade de formas”. Fazendo contraponto a estes aspectos positivos, observa que “uma das principais consequências negativas dessa ‘revolução do plástico’ é a frequentemente enfatizada questão da disposição do resíduo plástico”. Para solução desse problema, recomenda “grande utilização de várias técnicas de reciclagem para materiais e/ou a recuperação energética”.

De acordo com Tall (2000), o método historicamente mais comum para lidar com RSU, incluindo resíduos plásticos, é o depósito em aterros sanitários. Em áreas com alta densidade populacional, como a Europa Ocidental, certas regiões dos Estados Unidos e o Japão, o aterro está se tornando cada vez mais difícil e caro, porque os locais adequados para esse fim são escassos.

Keane (2007) salienta que se faz necessária a evolução do controle da poluição para a produção mais limpa, tal qual apresentada na Figura 2: a disposição deve ser opção apenas

quando as alternativas dos outros 4R (redução, reutilização, reciclagem e recuperação de energia) forem esgotadas.

Figura 2 – Hierarquia de minimização de resíduos



Fonte: Adaptado de Keane (2007).

Segundo Williams (2005), o plástico descartado pode ser visto como um enorme recurso potencial que, com o tratamento correto, pode ser reutilizado ou servir como matéria-prima de hidrocarbonetos ou como combustível.

De acordo com PlasticsEurope (2017), “em última análise, (os plásticos) se tornarão resíduos, e esse resíduo é, na verdade, um novo recurso que precisa ser colocado de volta no ciclo de vida dos plásticos, fechando assim o ciclo de Economia Circular”.

Um conceito amplo para reciclagem é o proposto por Magrini et al. (2012): “(reciclagem) compreende todos os possíveis usos de um material, uma vez terminada a vida útil da aplicação pretendida para a peça ou material considerado”. Assim, diversas estratégias podem ser compreendidas como alternativas para a circularização da economia, como o reuso, a reciclagem mecânica, a reciclagem química e a reciclagem energética.

## 2.2 TIPOS DE RECICLAGEM DE PLÁSTICO E SEU ASPECTO ECONÔMICO

De acordo com Tall (2000), “um aspecto importante da reciclagem de embalagens plásticas é que os tipos de plásticos utilizados para a maioria das aplicações de embalagens são materiais de baixo custo. O preço das resinas virgens correspondentes determina o teto de preço que os materiais reciclados podem ser vendidos para reprocessamento”.

A fração de plástico não pode ser discutida isoladamente da gestão de RSU em geral, por se tratar de apenas uma fração minoritária (TALL, 2000). Qualquer regime especial relativo à fração de plástico, embora atrelado a benefícios potenciais, estará associado a custos consideráveis. Como os plásticos têm um alto conteúdo de combustível, se a incineração com recuperação de energia é a destinação final dominante, é provável que não seja atrativo separar a fração de plástico para reciclagem mecânica. Se, por outro lado, o aterro é o método predominante, esquemas de reciclagem independentes para plásticos serão mais atraentes porque os resíduos plásticos geralmente têm um volume específico alto (baixa densidade).

Em função da origem do material considerado como resíduo, há características bastante distintas e que implicam nos processos utilizados e na aplicação final. A reciclagem de plásticos pode ser classificada em primária, secundária, terciária e quaternária. De acordo com Tall (2000), a reciclagem primária é aquela que trata da sucata de produção, isto é, do material que não foi convertido em um produto útil: retalhos, material de lançamento de linha e transições, produtos acabados ou peças fora dos padrões desejados etc. Tipicamente consiste de reciclagem mecânica, usando trituradores, moinhos e extrusoras. A reciclagem primária pode ser feita internamente à indústria de processamento, e o material reciclado é frequentemente misturado com resina virgem e volta a alimentar o mesmo processo que o gerou, sendo praticada há muito tempo, pela motivação da economia de recursos financeiros.

Ainda segundo Tall (2000), a reciclagem secundária é aquela que normalmente a sociedade menciona quando aborda a reciclagem de plásticos: é o reprocessamento de material de produtos descartados, pós-uso ou pós-consumo, de forma a serem empregados em novos produtos. Consiste de sistemas de coleta, separação, limpeza, moagem e extrusão, dentre outras necessidades específicas de processamento como peneiramento, filtração etc.

Na revisão feita por Magrini et al. (2012), a reciclagem química, ou terciária, envolve frequentemente processos de despolimerização de produtos plásticos com objetivo de transformá-los novamente em seu produto original. Como grande vantagem dessa técnica, cita

a possibilidade de tratar polímeros heterogêneos e contaminados, com o uso limitado de pré-tratamento. Embora haja viabilidade técnica, ainda é um processo questionável do ponto de vista econômico, devido ao baixo preço das matérias-primas petroquímicas, redução no consumo de energia no processo de fabricação de plásticos e elevados investimentos para viabilizar esse tipo de planta de reciclagem.

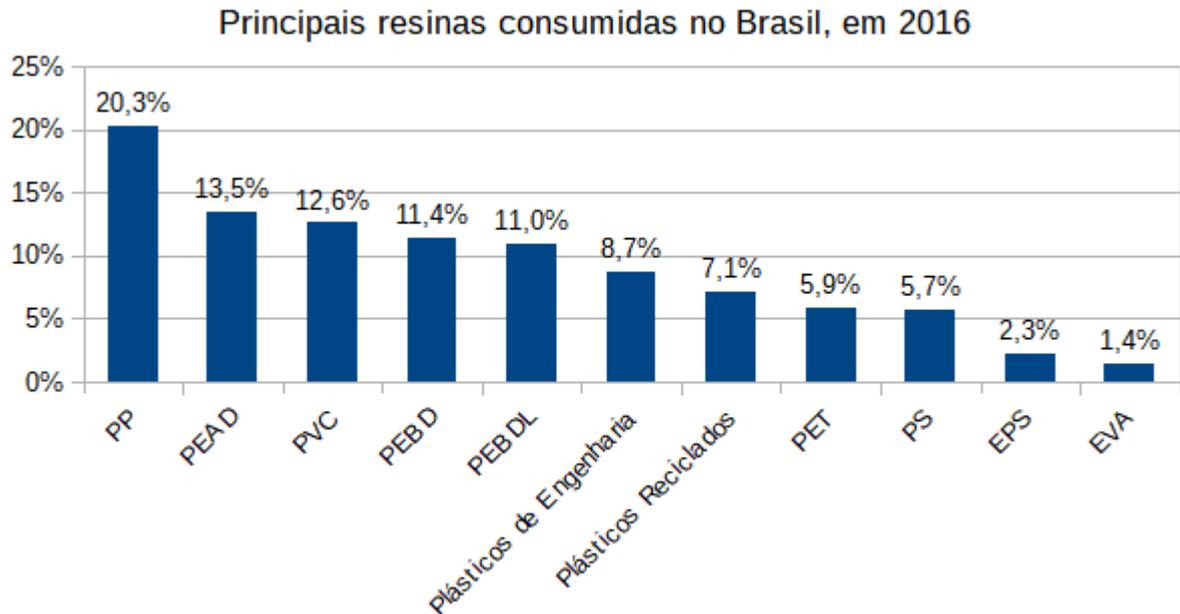
Ainda segundo Magrini et al. (2012), a reciclagem energética, ou quaternária, tem crescido mundialmente devido à heterogeneidade dos fluxos de resíduos plásticos. Devido ao poder calorífico dos plásticos ser elevado, são usados como fonte de energia para obter-se outras finalidades, como produção de calor, vapor ou eletricidade. Essa técnica também tem o apelo de redução do volume de material descartado, o que colabora para o gerenciamento de aterros. Entretanto, a recuperação energética inspira preocupações e cuidados com relação à liberação de substâncias perigosas na atmosfera, o que requer avanços no processo de reciclagem energética, como controles de queima e temperatura e na lavagem dos gases.

### 2.3 RECICLABILIDADE DO PLÁSTICO

Sobre a reciclabilidade dos plásticos, Tall (2000) destaca que a maioria dos plásticos em uso atualmente são termoplásticos, isto é, o material pode ser fundido e remodelado. Já alguns plásticos são termofixos, implicando que não podem ser fundidos sem severa degradação química, limitando, assim, suas possibilidades de reciclagem.

De acordo com publicação da ABIPLAST (2019), as principais resinas consumidas no Brasil em 2016 são apresentadas na Figura 3. É interessante observar que, diferentemente de edições de anos anteriores, criou-se a categorização de “plásticos reciclados”, sem apontamento específico de qual tipo de resina é reciclada, provavelmente para valorização do tema no contexto mais geral.

Figura 3 – Principais resinas consumidas no Brasil, em 2016



Fonte: Adaptado de ABIPLAST (2019).

Numerosos estudos mostraram que as propriedades importantes dos termoplásticos mais comuns estão razoavelmente bem preservadas ao longo de vários ciclos de processamento e envelhecimento, significando que qualquer empresa que coloque no mercado produtos feitos desses materiais pode alegar que seus produtos são recicláveis (TALL, 2000). Mas o autor alerta que, para que se torne realista que o material será recuperado e reciclado, vários outros critérios devem, no entanto, ser cumpridos, como, por exemplo, haver uma infraestrutura disponível para coletar, classificar e reprocessar o material. Outro fator importante é que tem que haver aplicações úteis para o material em sua segunda vida.

Tall (2000) aponta que as infraestruturas de reciclagem são caracterizadas pela exigência de economia de escala, isto é, grandes quantidades de material precisam ser recuperadas para sustentar o sistema de reciclagem. Um produto plástico, portanto, não é, na prática, reciclável, a menos que haja material de um mesmo tipo descartado em quantidade suficiente para fazer a reciclagem valer a pena.

A reciclagem mecânica de plásticos requer que o material plástico considerado útil para reciclagem seja separado de outros materiais, bem como que haja a separação dos diferentes tipos de plásticos uns dos outros, sendo requerido também a classificação por cor para atendimento das especificações dos produtos derivados do material pós-uso. Dentre as

técnicas de separação para resíduos plásticos, Tall (2000) alerta que a classificação manual é muito trabalhosa e, embora possa ser facilitada por códigos de identificação de material, a possibilidade de erro humano não deve ser negligenciada.

A alternativa de classificação dos plásticos por densidade torna-se dificultada, segundo Tall (2000), pelo fato da densidade global de um material plástico poder ser significativamente alterada pela incorporação de cargas ou por formação de espuma. A separação de materiais por densidade em tanques de decantação ou hidrociclones é comumente aplicada a plásticos residuais moídos. As poliolefinas mais comumente usadas em aplicações de embalagens – polipropileno (PP), polietileno de baixa densidade (PEBD) e polietileno de alta densidade (PEAD) – são notoriamente difíceis de separar de forma eficiente devido à pequena diferença entre suas densidades. Esta dificuldade também é notada para o PET e o PVC, com o agravante que a presença de um na corrente do outro resulta em complicações de processamento, implicando na qualidade e muitas vezes inviabilizando sua reciclagem. A Tabela 1 apresenta as densidades dos plásticos, em sua forma pura.

Tabela 1 – Densidades de plásticos comuns em forma pura

Tipo de plástico	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Tipo de plástico	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]
Poli[1-buteno]	0,90	Poliamida 6,6	1,14
PP	0,90 – 0,91	Poliamida 6	1,14
PEBD	0,91 – 0,94	Poli[vinil acetato]	1,19
PEAD	0,94 – 0,97	PMMA	1,22
ABS	1,03 – 1,07	PBT	1,30
Poliestireno	1,04 – 1,07	PET	1,38
PP, reforçado com 20% de talco	1,05	PVC	1,39 – 1,43
SAN	1,07 – 1,08	Poli[cloreto de vinilideno]	1,65 – 1,72
Policarbonato	1,08 – 1,20	Politetrafluoretileno	1,70

Fonte: Tall (2000, p. 15).

A seleção automática em máquinas que usam tecnologia óptica e de infravermelho, separando diferentes cores e moléculas, é uma realidade tecnológica, requerendo, no entanto, maior investimento de capital. Justifica-se em operações de reciclagem que precisam aliar altas produtividade e qualidade do produto final.

## 2.4 EVOLUÇÃO DAS TAXAS DE RECICLAGEM DE PLÁSTICO

No continente europeu, a destinação de resíduos plásticos se dá basicamente de três formas: aterro sanitário, reciclagem e recuperação energética. Segundo *PlasticsEurope* (2017), pela primeira vez na Europa, em 2016, a destinação dos plásticos pós-uso coletados à reciclagem (31,1%) superou a destinação a aterros (27,3%). É importante destacar que, nesse balanço, 41,6% do material plástico coletado foi destinado à recuperação energética – uma alternativa muito pouco difundida e praticamente inexistente no Brasil. Esse mesmo estudo mostra que, entre 2006 e 2016, houve aumento de 11% no total de resíduos plásticos coletados, aumentos de 79% no total reciclado e 61% na recuperação energética, enquanto a destinação aos aterros diminuiu 43%. Mas essa característica não é comum a todos os países: enquanto alguns implementaram restrições legais ao uso de aterros, este tipo de tratamento ainda é a primeira ou segunda opção para o resíduo plástico em boa parte dos países europeus. Os países que em 2016 tinham restrição implementada para destinação de resíduos plásticos a aterros foram os que obtiveram maior taxa de reciclagem e recuperação energética: Suíça, Áustria, Alemanha, Holanda, Suécia, Dinamarca, Luxemburgo, Bélgica, Noruega e Finlândia.

Vale ressaltar que, dentre os materiais plásticos, uma subclassificação de suma importância é a daqueles que são destinados às embalagens. Por esta característica, são os mais presentes na relação consumo/descarte e, portanto, os mais afeitos à problemática discutida neste trabalho. Se do total de resíduos plásticos for avaliada a fração de embalagens plásticas, o estudo da *PlasticsEurope* (2017) revela que a reciclagem chega a 40,9%, contra 38,8% de recuperação energética e 20,3% de destinação para aterro. Esse mesmo estudo mostra que, entre 2006 e 2016, houve aumento de 12% no total de resíduos de embalagens plásticas coletadas, aumentos de 74% no total reciclado e 71% na recuperação energética, enquanto a destinação aos aterros diminuiu 53%. As maiores taxas de reciclagem de embalagens plásticas foram da República Tcheca (52%) e da Alemanha (50%).

Os dados de *PlasticsEurope* (2017) apresentados anteriormente estão consolidados na Tabela 2.

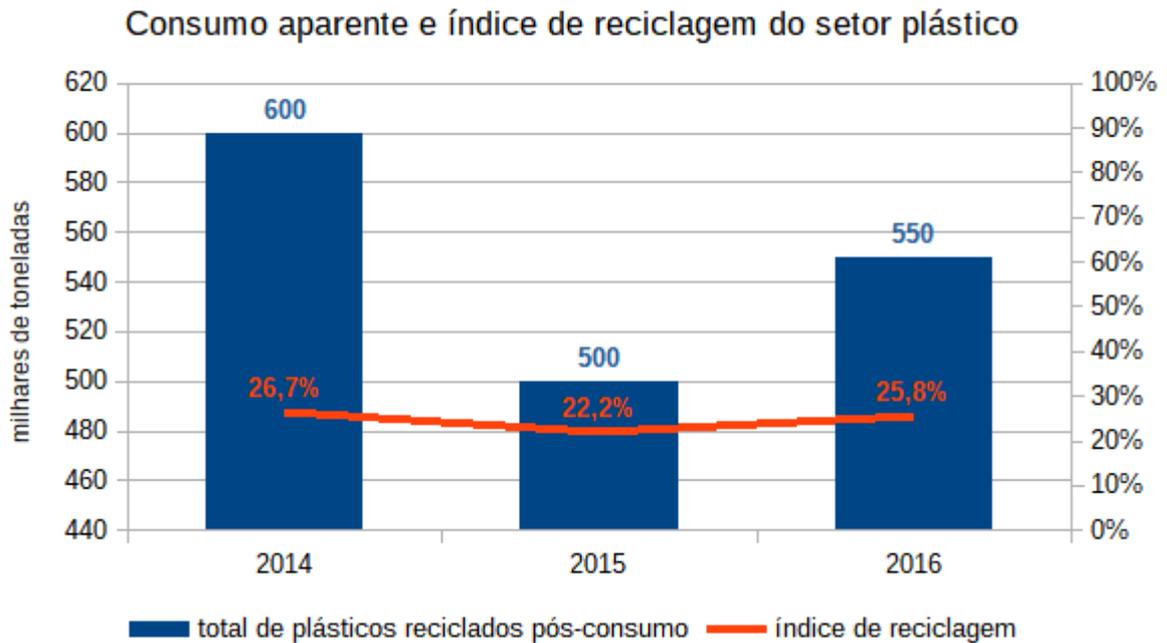
Tabela 2 – Europa – destinação de plástico e embalagens plásticas pós-uso, após coleta

	Plástico		Embalagens plásticas	
	2016	Varição 2006 → 2016	2016	Varição 2006 → 2016
Aterro sanitário	27,3%	- 43%	20,3%	- 53%
Reciclagem	31,1%	+ 79%	40,9%	+ 74%
Recuperação energética	41,6%	+ 61%	38,8%	+ 71%
Coleta	-	+ 11%	-	+ 12%

Fonte: Adaptado de PlasticsEurope (2017).

No Brasil, a evolução recente do índice de reciclagem mecânica de embalagens plásticas, publicada por ABIPLAST (2019), é apresentada na Figura 4. Os números gerais são bem menos expressivos que os europeus. O Brasil dispõe da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12.305 de 2010, que apresenta diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, através da destinação e tratamento adequado mediante logística reversa e seguindo uma hierarquia que consiste em: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final em aterros. De acordo com a PNRS, a responsabilidade pelo tema é compartilhada: a Sociedade com a Educação Ambiental (para o consumo e o descarte dos resíduos), o Governo com o Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos – Coleta e Seleção e o Setor Privado com a destinação ambiental adequada e ações de desenvolvimento sustentável para produtos, processos e mercado. Segundo a ABIPET (2019), para atendimento da legislação que aplica a obrigatoriedade da Logística Reversa para as Embalagens, de forma geral, foi efetivado o Acordo Setorial Embalagens – a Coalizão Embalagens, acordo entre 20 Associações e o Ministério do Meio Ambiente (MMA). Mas, ainda assim, os índices ainda estão muito aquém do desejado e necessário.

Figura 4 – Evolução do consumo aparente e índice de reciclagem mecânica de embalagens e equiparáveis do setor plástico



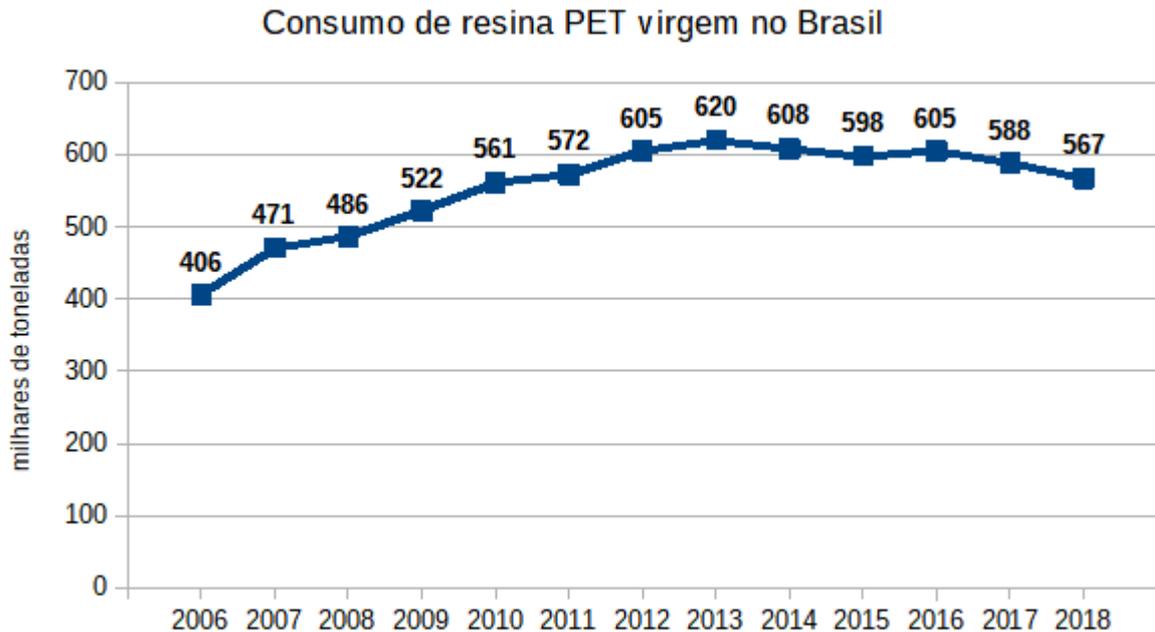
Fonte: Adaptado de ABIPLAST (2019).

## 2.5 BRASIL: PET E SUA RECICLAGEM

A Associação Brasileira da Indústria do PET (ABIPET, 2019) afirma a sustentabilidade da resina PET. A Figura 5 apresenta a evolução dos últimos anos do consumo de resina PET virgem no Brasil, Grau Garrafa.

Embora o consumo de resina PET virgem no Brasil tenha crescido 8,6% nos últimos dez anos, nos últimos dois anos tem tido um decréscimo. As justificativas para esse comportamento do mercado, apresentadas pela ABIPET, são: 1) redução de peso das embalagens, 2) redução do consumo de refrigerantes versus crescimento do consumo de água, sucos prontos para beber, chás, energéticos, isotônicos, néctares etc. e 3) crescimento de participação do PET-PCR grau garrafa. Importante perceber que a quantidade anual apresentada na Figura 5 corresponde, com grande aproximação, à quantidade de garrafas pós-consumo disponíveis para reciclagem.

Figura 5 – Evolução do consumo de resina PET virgem no Brasil, Grau Garrafa



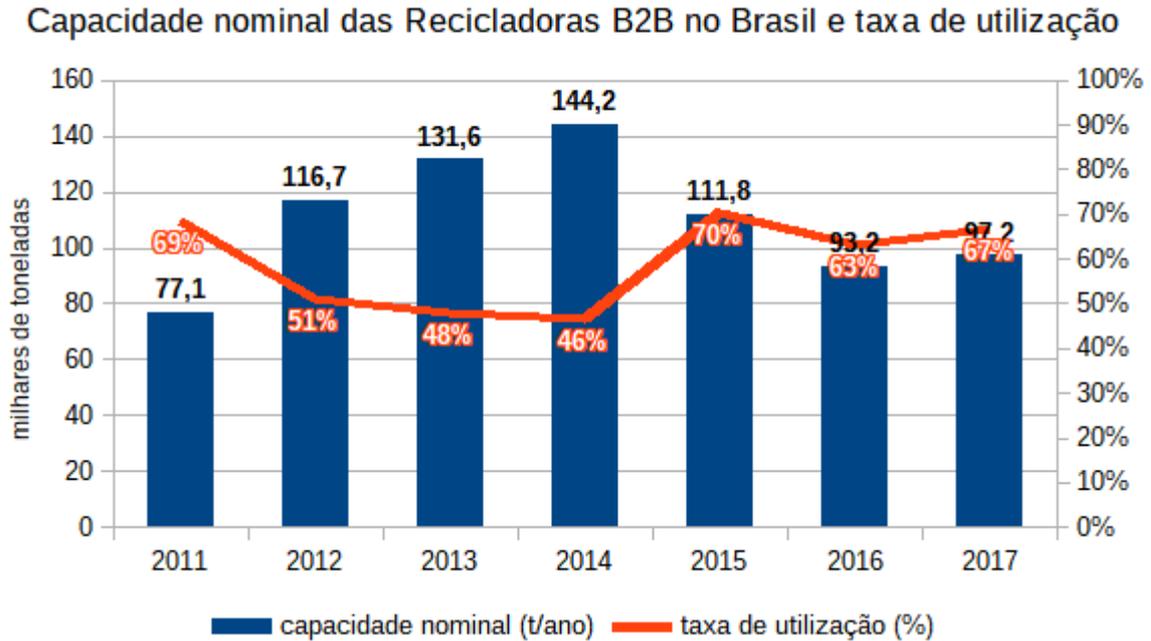
Fonte: Adaptado de ABIPET (2019).

Na visão da ABIPET (2019), a viabilidade da reciclagem de PET é uma “evidente vantagem competitiva” desse material frente a outros. Ela cita que, especialmente no Brasil, o PET-PCR tem algumas vantagens relativas a outros materiais de embalagem:

- tem como destinação muitos diferentes segmentos de mercado: além das embalagens típicas, tem aplicação em produtos têxteis, indústria automotiva, carpetes, forros e tecidos decorativos, sinais de trânsito, não-tecidos, geotêxteis, filtros, cordas, monofilamentos, cerdas, vassouras, escovas, mármore sintético, piscinas e banheiras, tintas e vernizes etc.;
- há demanda consistente por PET-PCR, com razoável viabilidade econômica; e
- a Indústria da Reciclagem pode gerar emprego e renda.

A Figura 6 apresenta um levantamento sobre a capacidade instalada das recicladoras de PET e a ociosidade presente nessa indústria.

Figura 6 – Capacidade instalada e ociosidade presente das recicladoras de PET



Fonte: Adaptado de GLOBALPET (2019).

Pode ser verificado pela Figura 6, em confronto com a Figura 5, que a capacidade de reciclagem B2B é bem menor que a oferta de material virgem que entra no mercado a cada ano. Apesar disso, as recicladoras continuam operando com ociosidade.

## 2.6 ACV: ASPECTOS GERAIS DA FERRAMENTA

Theis; Tomkin (2015) diz que a ACV é uma metodologia para compilar e avaliar informação sobre materiais e energia, conforme estes fluem através da cadeia de produção de um produto ou serviço. Complementa dizendo ser um bom modo de compreender a totalidade de seus impactos e benefícios ambientais, permitindo comparações de novos produtos ou serviços com aqueles convencionais, ajudando a identificar situações de conflito de escolha econômicas e ambientais. Também facilita a comunicação de riscos e benefícios aos envolvidos, em especial aos consumidores. De acordo com Mourad et al. (2002), a ACV seria uma ferramenta técnica “para identificação de oportunidades de melhorias ambientais dos produtos e serviços necessários à sociedade”.

A ACV é normalizada pelas normas internacionais ISO 14040 e 14044. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) as transcreveu para o Brasil, criando as normas

NBR ISO 14040:2009 (Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura) (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044:2009 (Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações) (ABNT, 2009b). De acordo com essas normas, os estudos de ACV compreendem quatro fases: Definição de Objetivo e Escopo, Análise de Inventário, Avaliação de Impacto e Interpretação.

Segundo Guinée (2002), o objetivo do estudo de ACV deve ser definido não somente descrevendo o que será feito, mas também em termos das razões para executar tal estudo. Uma das aplicações de estudos de ACV resulta, por exemplo, na tomada de decisão para qual a melhor alternativa para a Economia Circular. Quando se discute o assunto de embalagem de refrigerante, por sua extensão e proximidade do cotidiano, uma reflexão recorrente versa sobre as opções de sistema retornável ou descartável, além das diferentes alternativas de tamanhos e materiais empregados. Segundo Mourad et al. (2002), “sistemas retornáveis podem ser adequados para soluções regionais, onde o raio de distribuição é pequeno. Por sua vez, uma alta taxa de reciclagem pode compensar a não adoção de um sistema retornável, especialmente para grandes distâncias de distribuição”.

Para auxílio na condução de estudos de ACV, existem diversos *softwares* disponíveis no mercado. De acordo com Campolina et al. (2015), sua existência e emprego se justificam pela otimização do tempo para a realização de cálculos e, dentre outros, analisar a comparação do ciclo de vida de produtos, o fluxo de materiais e energia e os impactos ambientais. O emprego de gráficos, fluxogramas e tabelas para apresentação dos resultados facilita a interpretação das informações geradas pelo estudo. Dentre os *softwares* de auxílio utilizados no Brasil para modelagem de cenários e manipulação de bases de dados de ACV, a pesquisa de Cherubini; Ribeiro (2015) mostrou que os três principais são o SimaPro, GaBi e Umberto, com uma representatividade total de quase 97% das citações.

De extrema importância para a ACV, a disponibilização de bancos de dados é fundamental para seleção do *software* e para aderência do estudo em questão. Campolina et al. (2015) explica que essa base de dados, inserida nos *softwares*, contém informações ambientais sobre a produção de bens e disponibilidade de recursos, sendo constituída a partir de Inventários do Ciclo de Vida (ICV) de elementos comuns a vários ciclos de vida, como: materiais (metálicos, cerâmicos, vidros, provenientes de fontes renovável ou não renovável etc.), energia (térmica, elétrica, biomassa etc.), transporte (rodoviário, ferroviário etc.) e tipo de combustível (gasolina, diesel etc.). Alguns bancos de dados são livres e gratuitos, outros

restritos e comercializados. Existem bancos de dados específicos de determinados *softwares*, enquanto outros são compartilhados por diferentes ferramentas. Cherubini; Ribeiro (2015) citam que, como resultado de pesquisa bibliográfica em bancos de teses e dissertações no Brasil, a base de dados do *ecoinvent* foi citada como uma importante fonte de informações, sendo a principal responsável por fornecer os dados *background* para as pesquisas. Outra fonte de dados usados na modelagem como dados *background* foram os fornecidos pela PE International, com o uso do *software* GaBi.

Segundo Piekarski et al. (2012), a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) é um processo onde os aspectos e impactos potenciais são avaliados através da associação dos dados do inventário do ciclo de vida com categorias de impacto ambiental específicas, de acordo com o objetivo e escopo definido no estudo. Os métodos de AICV são os responsáveis pela atribuição das emissões e recursos às respectivas categorias de impacto, de forma que sejam convertidos em indicadores. Utilizam diferentes fatores de caracterização, procurando empregar um procedimento aplicável a todas as substâncias de forma consistente, utilizando uma unidade comum de medida, e que resulte em dados comparáveis entre categorias de impacto. Cita ainda que os métodos para AICV apresentam características individuais específicas e podem ser classificados em duas categorias, de acordo com sua abordagem: *midpoint* (ponto médio) e *endpoint* (ponto final). De acordo com Cherubini; Ribeiro (2015), os métodos tradicionais de ACV são normalmente exemplos de modelos *midpoint*, como: mudança climática, acidificação, uso da terra, ecotoxicidade etc., e são reputados por ser menos incertos. Já a modelagem *endpoint*, segundo Piekarski et al. (2012), é geralmente considerada mais compreensível para os tomadores de decisão, mas possuem alta subjetividade, como: saúde humana, ambiente natural e recursos naturais. Em pesquisa citada por Cherubini; Ribeiro (2015), com relação às categorias de impacto ambiental mais presentes nas dissertações e teses defendidas no Brasil, a mais citada foi a de potencial de aquecimento global ou mudanças climáticas (a nomenclatura varia, a depender do método). Em seguida, ficaram: acidificação, depleção de recursos (todos os tipos: mineral, fóssil, abiótica, metal etc.) e eutrofização. Ainda são destaques: toxicidade humana, depleção da camada de ozônio, formação fotoquímica, uso e ocupação de terra, ecotoxicidade de águas e ecotoxicidade terrestre. Nota-se a tendência para uso de categorias de impacto no nível *midpoint*. Como citado em diversos trabalhos, de modo geral as categorias *endpoint* são pouco utilizadas, pois adicionam muitas incertezas nos resultados.

Como observado por Mendes (2016), “verifica-se a lacuna de métodos de AICV baseados nas características regionais brasileiras”. Dada esta limitação, a prática corrente dos pesquisadores de ACV, até então, tem sido a adoção de múltiplos métodos de avaliação, auxiliados pela praticidade dos *softwares*, para reduzir as incertezas geradas no estudo, visto que, como ressaltado por Piekarski et al. (2012), a escolha do método de AICV utilizado é um ponto crucial para que os resultados obtidos apresentem maior confiabilidade. Cherubini; Ribeiro (2015) mostra que, numa busca em dissertações e teses brasileiras sobre ACV, foram identificadas 130 citações de métodos de AICV, sendo que alguns trabalhos utilizaram mais de um método. Os cinco mais citados, totalizando pouco mais de 70% de citações, foram: o CML-IA, o Eco-indicator 99, o CED, o EDIP e o ReCiPe (que é um método elaborado tendo como base o CML-IA e o Eco-Indicator 99). Além desses, pode-se citar como outros métodos de grande aplicação no mundo, o EPS 2000, o USEtox, o TRACI e o IMPACT World+.

Em vista desta necessidade de adaptar e desenvolver modelos de caracterização para categorias de impacto, considerando o contexto ambiental e socioeconômico brasileiro, foi formada a Rede de Pesquisa em Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (RAICV) – uma organização civil, não governamental, sem fins lucrativos, criada em 2014 por pesquisadores com atuação na área de ACV, em decorrência do desenvolvimento do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV). O trabalho de Ugaya et al. (2019) divulga, na forma de um relatório que consolida o trabalho desenvolvido pelo grupo, a recomendação de modelos para regionalização de Fatores de Caracterização para o Brasil, para as categorias: escassez hídrica, recursos abióticos, recursos bióticos, método de contabilidade de recursos (RAM), serviços ecossistêmicos, eutrofização e acidificação.

Além do alinhamento do método escolhido com os objetivos traçados e os resultados esperados da ACV, Piekarski et al. (2012) recomenda que haja um levantamento bibliográfico de ACV de produtos, processos ou serviços similares ao do estudo que será desenvolvido, para auxiliar e justificar o processo de seleção de métodos para a ACV.

## 2.7 PET E ACV NO MUNDO

Uma pesquisa na base de dados *Web of Science*, usando os termos “LCA + PET”, resultou nos trabalhos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados da pesquisa por “LCA + PET”, na base de dados *Web of Science*

			<b>(continua)</b>
	<b>Referência</b>	<b>Título</b>	<b>Tema</b>
1	Gomes et al. (2019)	Life Cycle Assessment of Polyethylene Terephthalate Packaging: An Overview	Revisão sobre temas de ACV de PET
2	Altun et al. (2018)	Life cycle assessment of direct and extrusion spinning: a case study	Extrusão/Fiação de fibra PET
3	Chen et al. (2016)	Comparative life cycle assessment of fossil and bio-based polyethylene terephthalate (PET) bottles	Comparação de PET e bio-PET
4	Saleh (2016)	Comparative life cycle assessment of beverages packages in Palestine	Comparação de PET, vidro e alumínio na embalagem de refrigerantes, na Palestina
5	Borodin et al. (2015)	Waste management through life cycle assessment of products	Impactos de destinações de PET
6	van der Velden et al. (2014)	LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane	Comparação de diferentes tecidos
7	Czaplicka-Kolarz et al. (2013)	Application of life cycle assessment and exergy to environmental evaluation of selected polymers	Comparação de cinco polímeros: PE, PP, PVC, PS e PET
8	Amienyo et al. (2013)	Life cycle environmental impacts of carbonated soft drinks	ACV completa para refrigerantes, no Reino Unido
9	Foolmaun; Ramjeeawon (2012a)	Comparative life cycle assessment and life cycle costing of four disposal scenarios for used polyethylene terephthalate bottles in Mauritius	Comparação Ambiental e de Custo para quatro opções de destinação para PET, nas Ilhas Maurício
10	Shen et al. (2012)	Comparing life cycle energy and GHG emissions of bio-based PET, recycled PET, PLA, and man-made cellulose	Comparação de PET e bio-PET com outros bioplásticos e fibras artificiais
11	Foolmaun; Ramjeeawon (2012b)	Disposal of post-consumer polyethylene terephthalate (PET) bottles: comparison of five disposal alternatives in the small island state of Mauritius using a life cycle assessment tool	Comparação de cinco alternativas ambientais, para as Ilhas Maurício
12	Intini; Kuehtz (2011)	Recycling in buildings: an LCA case study of a thermal insulation panel made of polyester fiber, recycled from post-consumer PET bottles	Painéis de isolamento térmico com PET reciclado

Tabela 3 – Resultados da pesquisa por “LCA + PET”, na base de dados *Web of Science*

			<b>(conclusão)</b>
<b>Referência</b>	<b>Título</b>	<b>Tema</b>	
13	Shen et al. (2011)	Life cycle energy and GHG emissions of PET recycling: change-oriented effects	Comparação de quatro rotas: múltiplas reciclagens, garrafa ou fibra, demanda por garrafa ou fibra e bio-PET
14	Shen et al. (2010b)	Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres	Comparação de diferentes fibras artificiais e PET
15	Shen et al. (2010a)	Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling	Avaliação de quatro rotas de reciclagem
16	Madiva et al. (2009)	Assessment of the environmental profile of PLA, PET and PS clamshell containers using LCA methodology	Comparação de materiais, desde a produção agrícola/ extração do petróleo
17	Romero-Hernandez et al. (2009)	Environmental implications and market analysis of soft drink packaging systems in Mexico. A waste management approach	Efeito de distância da coleta de PET
18	Song et al. (1999)	A life-cycle assessment (LCA) study on the various recycle routes of PET bottles	Modelagem matemática das rotas de reciclagem
19	Song; Hyun (1999)	A study on the comparison of the various waste management scenarios for PET bottles using the life-cycle assessment (LCA) methodology	Modelagem matemática das rotas de reciclagem
20	Nakanishi et al. (1997)	Specification environment load for disposed plastics products in LCA	Carga ambiental de PET pós-consumo

Fonte: Autor.

Como pode-se observar, os trabalhos listados tratam de diversas abordagens da ACV do PET: comparação de seu uso frente a outros materiais, alternativas de destinação final ao pós-consumo, modelagem matemática aplicada etc. Como destaque desta listagem, cita-se o artigo número 1 na Tabela 3, cuja temática é exatamente uma revisão dos temas tratados nas ACV de PET, e vem a corroborar com a proposta do projeto de pesquisa do presente estudo. Ao mapear o que já foi produzido sobre o tema e o que ainda resta ser feito, Gomes et al. (2019) destaca a quantidade de estudos de comparação de cenários de destinação do PET pós-consumo, considerando o descarte em aterros, a reciclagem mecânica, a recuperação de energia e a reciclagem química, e concluindo tipicamente pela reciclagem mecânica como a opção ambientalmente mais favorável. Sobre os impactos ambientais, identificou que

minimamente os artigos procuravam explorar o consumo de energia ou o potencial de aquecimento global. Com respeito a necessidades, apontou que poucos estudos exploraram tecnologias de reciclagem mecânica na ACV, e que há carência de dados sobre os processos usados nos países em desenvolvimento. A necessidade para o Brasil também é apontada por Barros et al. (2019), que aponta a falta de estudos relacionados à produção e reuso de embalagens ou materiais de embalagem pós-consumo para praticamente todos os tipos de materiais de embalagem e, dentre eles, é citado o PET.

Alguns outros trabalhos de abordagem mundial, além dos que resultaram da pesquisa citada na Tabela 3, foram utilizados neste trabalho e são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Outros trabalhos selecionados, relacionados ao tema ACV do PET

<b>Referência</b>	<b>Título</b>	<b>Tema</b>
Valentino (2017)	Life Cycle Assessment of PET bottles: closed and open loop recycling in Denmark and Lombardy region	B2B e B2F
Chilton et al. (2010)	A life cycle assessment of the closed-loop recycling and thermal recovery of post-consumer PET	ACV para circuito fechado e recuperação energética
Nakatani et al. (2010)	Life-cycle assessment of domestic and transboundary recycling of post-consumer PET bottles	ACV para garrafas pós-consumo, domésticas e transfronteiriças
Arena et al. (2003)	Life Cycle Assessment of a Plastic Packaging Recycling System	Cenário italiano de reciclagem de PET e PE

Fonte: Autor.

Com relação às possibilidades de minimização do impacto ambiental, Singh et al. (2017) sustentam que “é quase impossível eliminar completamente o uso do PET” e, dessa forma, “o consumo de recursos naturais nos processos de produção deve ser reduzido para o menor possível, e as emissões e desperdícios devem ser prevenidos por controle”.

A problemática da reciclagem do PET começa pela coleta do material pós-consumo. Arena et al. (2003) diz que, para a realidade italiana estudada – coleta de embalagens de PET e PE, conjuntamente, para triagem posterior – o maior ônus ambiental dessa etapa está associado ao transporte, reflexo do consumo de energia e significativas emissões para o ar, sendo a energia consumida na compactação do resíduo plástico bem menos representativa. Levantou que a distância percorrida pelo resíduo plástico foi de 0,025 km/kg de plástico

transportado. Para produção de 1 kg de *flake* de PET, o autor apontou um consumo de 1,32 kg de garrafas PET, já triadas da coleta conjunta com embalagens de PE.

Os estudos de ACV que envolvem reciclagem de materiais em circuito aberto não têm um procedimento padronizado para alocação da carga ambiental do resíduo gerado pela primeira vida do produto, e que é posteriormente reciclado em outro produto. Shen et al. (2010a) utilizou três diferentes abordagens no estudo da reciclagem de garrafas PET pós-consumo, definindo características de cada uma delas e obtendo diferenças nos resultados da ACV em função da adoção de uma ou outra. A primeira abordagem, bastante utilizada por ser simples e fácil de aplicar, é a de “*cut-off*”: ela distingue a primeira vida, a do produto virgem, da segunda vida, a do produto reciclado, tratando-as como sistemas separados. Isso implica que o material coletado para reciclagem não carrega nenhum ônus ambiental da primeira vida. Este método, portanto, não requer dados da primeira vida do produto, o que simplifica bastante o trabalho. A segunda abordagem apresentada é chamada de “valorização do resíduo”, e segue o princípio da alocação econômica para agregar um percentual da carga ambiental da vida anterior ao material reciclado em circuito aberto. Para isso, considera os preços de mercado da garrafa pós-consumo e da resina virgem, para alocar um percentual do impacto do ciclo de vida da fabricação do polímero virgem, “do berço ao portão”. A terceira abordagem é chamada de “expansão do sistema”, e analisa um sistema de produto “do berço ao túmulo”, juntando os ciclos de vida de garrafas e fibras até sua disposição final. Neste último método, o pensamento de ciclo de vida é melhor aplicado, sendo o mais recomendado pelo autor para uma análise completa da reciclagem de circuito aberto.

Estudos como o de Shen et al. (2011) avaliam o impacto ambiental do sistema de reciclagem de PET, no qual garrafas usadas são recicladas em circuito fechado e em circuito aberto, respectivamente em garrafas (B2B) e fibras (B2F), e comparam o sistema de reciclagem com o PET descartável (não reciclado). Nesse em especial, aplicou-se a modelagem de ACV para compreender o efeito de quatro alterações ou possibilidades no sistema de reciclagem: 1) múltiplas reciclagens das embalagens pós-consumo, 2) mudança na proporção de reciclagem entre B2B e B2F, 3) mudança na demanda de mercado por cada produto reciclado de PET e 4) introdução de bio-PET (PET originado de fontes renováveis). A região considerada para produção, reciclagem e disposição foi considerada a Europa Ocidental. Os limites foram “do berço ao túmulo”, excluindo a fase de consumo. Os impactos ambientais avaliados são Energia Não-renovável e Aquecimento Global. Em termos gerais,

nas condições desse estudo, a reciclagem do PET reduz os impactos em 20% frente à sua não-reciclagem. Ainda, as múltiplas reciclagens conseguem redução de 26%, com economia adicional desprezível após três ciclos. B2F oferece maior redução de impacto que B2B, quando mais fibras são demandadas pelo mercado que garrafas; a máxima redução de impacto é atingida quando todo PET reciclado é usado para produção de fibra.

O trabalho de Valentino (2017) avaliou os impactos ambientais de garrafas PET avaliando seu ciclo de vida em dois contextos (na Dinamarca e na região da Lombardia, Itália), considerando duas rotas de valorização do produto reciclado (B2B e B2F), sendo possível investigar e identificar os fatores relevantes para tentar responder, nos contextos estudados, qual tipo de rota de reciclagem é ambientalmente melhor, apontando os principais elementos que influenciam as diferenças entre um e outro contexto. Avaliou-se desde a produção da resina virgem até a etapa de reciclagem. Observou-se que a fase de produção das garrafas é a mais relevante na influência nos resultados finais, principalmente porque a fase de produção secundária é importante para a economia em termos de material virgem evitado, sendo as economias para o cenário B2F mais interessantes ambientalmente que para o cenário B2B. Em termos de diferença de contexto, a mais significativa foi identificada no sistema de coleta de material pós-consumo: o sistema de depósito dinamarquês (aquele em que o consumidor recupera o dinheiro que pagou adicionalmente ao adquirir a embalagem, quando faz a devolução da mesma após o uso) supera a quantidade de material ofertado pelo sistema de gestão de resíduos municipal integrado da Lombardia (baseado em triagem após coleta de material separado previamente pelos cidadãos em suas residências e disposto nas calçadas ou em contêineres apropriados).

Shen et al. (2010a) avaliou o impacto ambiental da reciclagem de garrafas PET na transformação em fibras (B2F), analisando quatro tecnologias: reciclagem mecânica, reciclagem semi-mecânica, reciclagem química voltando ao estado de oligômero e reciclagem química voltando ao estado de monômero. Foram analisados nove indicadores de impacto ambiental, usando o método CML: consumo de energia não-renovável, potencial de aquecimento global, depleção abiótica, acidificação, eutrofização, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade terrestre e formação de oxidantes fotoquímicos. Também fez comparações dos resultados com fibra PET virgem e outras fibras têxteis, como algodão, viscose, polipropileno e ácido polilático. Nesse trabalho, o autor usou como dados reais plantas de reciclagem localizadas na Europa Ocidental e em Taiwan, sendo

que as suas distâncias médias de abastecimento de garrafas coletadas, por caminhões, foram de 300-400 km e 100-350 km, respectivamente, e que para a etapa de coleta o maior impacto ambiental é relacionado ao consumo de combustível do transporte dos fardos prensados, desde os centros de separação de resíduos até as unidades de produção de *flakes*. O estudo também pondera que o consumo de energia nas etapas de separação, enfardamento e prensagem é muito pequeno quando comparado às necessidades do processo de reciclagem. A fibra cortada obtida por reciclagem mecânica, na Europa Ocidental, seria a que a avaliada no presente estudo poderia ser comparada, embora a aplicação do produto difira ligeiramente: as do estudo de Shen tem *denier* maior, isto é, são mais “espessas”. Em função da abordagem adotada ser de “*cut-off*” ou de “valorização do resíduo”, os indicadores da AICV mudam. Para as categorias de impacto ambiental Depleção de Recursos Abióticos – fósseis e Potencial de Aquecimento Global, com limites “do berço ao portão”, os indicadores seriam, respectivamente, 13 GJ e 0,96 kgCO<sub>2</sub>eq., para a abordagem de “*cut-off*”, e 40 GJ e 2,03 kgCO<sub>2</sub>eq., para a de “valorização do resíduo”. A fibra cortada virgem na Europa Ocidental, para referência, teria valores de 95 GJ e 4,06 kgCO<sub>2</sub>eq., para as categorias selecionadas.

Outro trabalho de Shen et al. (2012) faz uma comparação de impactos entre PET virgem, PET-PCR, bio-PET (parcial) – virgem e reciclado, além de outros materiais, como PLA e fibras artificiais, também explorando as diferentes abordagens de “*cut-off*”, “valorização do resíduo” e “expansão do sistema”. Destaca-se desse trabalho a contribuição dos valores das categorias Depleção de Recursos Abióticos – fósseis e Potencial de Aquecimento Global, para a resina PET virgem na Europa, com 68,6 GJ e 2,15 kgCO<sub>2</sub>eq., e do PET-PCR na Europa, com 9,5 GJ e 1,01 kgCO<sub>2</sub>eq., usando a abordagem de “*cut-off*”.

## 2.8 ACV DO PET NO BRASIL

Pesquisou-se o banco de teses e dissertações do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), para buscar trabalhos relacionados à temática de ACV do PET e também de ACV de plásticos. O resultado dessa pesquisa é apresentado na Tabela 5, comprovando a oportunidade de contribuição do presente estudo.

Tabela 5 – Teses e dissertações sobre ACV de PET ou Plástico, no Brasil

	<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Tema</b>	<b>Instituição</b>	<b>Ano</b>
ACV do PET	Naiara Machado Casagrande	Inclusão dos impactos dos resíduos plásticos no ambiente marinho em avaliação de ciclo de vida	Impacto de micro e macropolásticos no ambiente marinho, no estudo de ACV	UFSC	2018
	Rachel Horta Arduin	Avaliação do ciclo de vida de produtos têxteis: implicações da alocação	Algodão, PET	USP	2013
	Tassio Francisco Lofti Matos	Avaliação da viabilidade de reintegração de resíduos de PET pós-consumo ao meio produtivo	Construção Civil	USP	2009
	Andrea Rodrigues Fabi	Comparação do consumo de energia e emissão de CO <sub>2</sub> entre garrafas de PET e de vidro, utilizando análise ambiental de ciclo de vida	Energia e CO <sub>2</sub>	UNICAMP	2004
ACV de plásticos	Juliana Mendes Campolina	Inventário do ciclo de vida do processo de reciclagem de plásticos de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE): um estudo de caso	Inventário, para plásticos associados a REEE	UFSCAR	2015
	Marina Fernandes Cosate de Andrade	Estudo da avaliação de ciclo de vida do PLA: comparação entre a reciclagem química, mecânica e compostagem	Destinação, para PLA	UNICAMP	2015
	Tatiane Tobias da Cruz	Uso da avaliação do ciclo de vida para a determinação na redução de emissões de gases do efeito estufa e do consumo de energia associados a reciclagem de EPS	Redução GEE e Energia, para EPS	UNESP	2015

Fonte: Autor.

Ainda em estágio bastante atrasado frente ao observado na Europa Ocidental, a coleta brasileira impõe desafios maiores à indústria da reciclagem de PET. A limitação da oferta de material pós-consumo deve-se às falhas apresentadas nos elos da logística reversa já com os catadores e os sucateiros, de acordo com Formigoni e Rodrigues (2009). Ainda segundo esse trabalho, essas falhas “não deixam que os volumes de reciclados aumentem, refletindo na falta de oferta de produto e na descontinuidade no canal reverso”.

No cenário brasileiro, Mesquita et al. (2014) apresenta estudo sobre o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do *pellet* tipo PET-PCR (pós-consumo reciclado) produzido pelo processo de reciclagem *bottle-to-bottle*, adotando como premissa um sistema modelado a partir do descarte da garrafa de resina virgem pós-uso até a produção do *pellet* PET-PCR a partir da reciclagem mecânica do PET. Constata que os processos elementares de geração de energia elétrica, particularmente pelas contribuições das usinas termelétricas a gás natural e de óleo combustível, além das etapas de transporte e o consumo de água, possuem papel de destaque em termos de aspectos ambientais. Não obstante, cita que “a respeito do consumo de eletricidade, não foi possível coletar o dado em nenhuma das pequenas recicladoras-distribuidoras” e, para contornar esse problema, “o consumo de eletricidade foi estimado com base em especificações técnicas de máquinas prensa, coletadas junto a uma empresa produtora deste equipamento”. Além disso, esse estudo foi representativo da reciclagem de garrafa PET na cidade do Rio de Janeiro-RJ, uma vez que ali ficava localizada, à época do estudo (“definiu-se o ano de 2011 como o período de tempo para o qual os dados são válidos”), a única empresa produtora de *pellet* PET-PCR no Brasil com autorização da Anvisa para adotar o processo *bottle-to-bottle*.

Dos Santos (2015) realizou trabalho exploratório de ACV sobre o PET-PCR de uma recicladora de garrafas PET pós-consumo em Poços de Caldas-MG, também certificada pela Anvisa para suprimento de embalagens alimentícias e com processo de produção de *flakes* e *pellets* na mesma instalação industrial, onde “os procedimentos de cálculos se deram a partir de Balanços de Massa e de Energia”. Para este estudo, adotou como método de avaliação de impacto o Eco-indicador 95, através do qual foram analisadas as categorias de impacto de Aquecimento Global e Acidificação causadas a partir do consumo de diesel, gás natural e energia elétrica. Nesta avaliação, verificou que “devido ao elevado consumo de diesel”, para a finalidade de reduzir o impacto ambiental da produção de PET-PCR, causado pela emissão de poluentes na atmosfera, “faz-se necessário investir na redução da distância entre o fornecedor de matéria-prima e a recicladora”.

Ainda de acordo com a autora, quando da comparação dos processos produtivos de PET-PCR e Resina PET Virgem, “verificou-se uma economia energética de 88% para o processo de reciclagem”. No entanto, verificou que o consumo de água foi desfavorável ao produto reciclado frente ao virgem: “41% mais água, devido principalmente ao processo de lavagem das garrafas”. Mas ainda com relação à água, observou que “o impacto ambiental

causado pelo consumo deste recurso é reduzido uma vez que a recicladora dispõe de processos de tratamento e reuso de água”. Finaliza seu trabalho sugerindo que, para próximos trabalhos que poderão dar continuidade ao estudo da ACV do PET-PCR, sejam avaliados o “impacto causado pelo consumo de recursos naturais e insumos, destino dado aos resíduos sólidos, condições de efluentes líquidos e emissões atmosféricas inerentes ao restante do processo”.

Dentre outras razões, como por exemplo a identificação dos pontos críticos no ciclo de vida do produto para promoção de melhorias nos processos produtivos e a promoção do marketing verde de seus produtos, um dos ganhos da elaboração de um Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do *pellet* tipo PET-PCR (pós-consumo reciclado) segundo as condições brasileiras é a contribuição para futuros estudos de ACV que envolvam a cadeia produtiva, visto que, de acordo com Mesquita et al. (2014), há “carência de um banco de dados nacional, que represente inventários de acordo com as condições brasileiras”. Outro ponto importante seria o amparo ao setor governamental para elaboração e fomento de políticas públicas que respeitem o meio ambiente e incentivem práticas sustentáveis.

## 2.9 SELEÇÃO PARA O ESTUDO: *SOFTWARE* DE ACV, CATEGORIAS DE IMPACTO AMBIENTAL E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL

Para a realização do estudo da ACV, o *software* de ACV selecionado para apoio aos cálculos e modelagem foi o GaBi, da empresa thinkstep (antiga PE International, e agora pertencente à Sphera), em sua versão GaBi Education 8.7. A opção por este programa deveu-se à recomendação de alguns pesquisadores na área, que destacaram sua interface gráfica facilitada, além da disponibilidade de banco de dados *background* de relevância ao estudo. De acordo com Campolina et al. (2015), o GaBi foi desenvolvido pelo PE Europe GmbH e IKP University of Stuttgart. É utilizado para realizar avaliação de aspectos ambientais, sociais, econômicos, processos e tecnologias associados ao ciclo de vida de um produto, sistema ou serviço. Constrói balanços de ciclo de vida, suporta o manuseio de grande quantidade de dados, realiza a modelagem do ciclo de vida do produto e calcula balanços de massa e energia de diferentes produtos.

Para seleção das categorias de impacto ambiental que seriam pertinentes ao estudo, mapearam-se os indicadores que foram mais citados nos trabalhos semelhantes ou afeitos ao tema, encontrados na pesquisa de artigos. Este resultado está apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Categorias de impacto ambiental citados em ACV de PET, na literatura

<b>Referência</b>	<b>Categorias de impacto ambiental abordadas</b>
Altun et al. (2018)	Aquecimento Global, Depleção de Recursos Abióticos e de Ozônio, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade: de Água Doce, Marinha e Terrestre, Acidificação, Formação de Oxidantes Fotoquímicos, Eutrofização
Chen et al. (2016)	Mudança Climática, Depleção de Recursos Fósseis e de Ozônio, Ecotoxicidade, Acidificação, Particulados – Saúde Humana, Smog, Eutrofização Terrestre
Saleh (2016)	Aquecimento Global, Consumo de Água, Energia não-renovável, Resíduos Sólidos, Acidificação Terrestre, Efeitos Respiratórios
Borodin et al. (2015)	Aquecimento Global, Uso de energia
van der Velden et al. (2014)	Pegada de Carbono, Demanda de Energia Acumulada, Eco-costs 2012
Czaplicka-Kolarz et al. (2013)	Aquecimento Global, Energia Acumulada, Danos à Saúde Humana e à Qualidade do Ecossistema, Consumo de Recursos
Amienyo et al. (2013)	Demanda de Energia Primária, Depleção Abiótica e de Ozônio, Toxicidade Humana, Toxicidade: Aquática, Marinha e de Água Doce, Ecotoxicidade Terrestre, Acidificação, Formação de Oxidante Fotoquímico, Eutrofização
Foolmaun; Ramjeeawon (2012a)	Mudança Climática, Minerais e Combustíveis Fósseis, Camada de Ozônio, Carcinogênicos, Ecotoxicidade, Acidificação/Eutrofização, Orgânicos e Inorgânicos Respiratórios
Foolmaun; Ramjeeawon (2012b)	Categorias do EI-99
Shen et al. (2012)	Gases de Efeito Estufa, Energia não-renovável
Intini; Kuehtz (2011)	Aquecimento Global, Ozônio, Acidificação, Oxidação Fotoquímica, Eutrofização
Shen et al. (2011)	Aquecimento Global, Uso de energia não-renovável
Shen et al. (2010b)	Demanda de Energia Primária (Uso de energia não-renovável, uso de Energia Renovável e Demanda de Energia Acumulada), Uso da Terra, Uso da Água, demais categorias do CML

(continua)

Tabela 6 – Categorias de impacto ambiental citados em ACV de PET, na literatura

<b>Referência</b>	<b>Categorias de impacto ambiental abordadas</b>	<b>(conclusão)</b>
Shen et al. (2010a)	Aquecimento Global, Energia não-renovável, Depleção Abiótica, Toxicidade Humana, Ecotoxicidade: de Água Doce e Terrestre, Acidificação, Eutrofização, Formação de Oxidantes Fotoquímicos	
Madiva et al. (2009)	Aquecimento Global, Energia não-renovável, Depleção de Ozônio, Ecotoxicidade, Acidificação e Eutrofização Aquáticas, Orgânicos e Inorgânicos Respiratórios, Ocupação do Solo	
Romero-Hernandez et al. (2009)	Aquecimento Global	

Fonte: Autor.

Para complementar o levantamento, baseou-se também em tabela de mapeamento apresentada por Gomes et al. (2019). Apesar das diferentes nomenclaturas das categorias, em virtude da adoção de diferentes métodos e cada um com sua definição própria, foi possível verificar que os indicadores que foram mais citados foram relativos ao aquecimento global, ao esgotamento de recursos, à toxicidade e à acidificação. Visto a influência de características regionais no mecanismo de impacto de determinada categoria de impacto ambiental, buscou-se em Ugaya et al. (2019) as recomendações sobre metodologias adequadas para o contexto brasileiro.

A Tabela 7 apresenta as categorias de impacto ambiental e os métodos selecionados para o estudo. Para as categorias de Potencial de Aquecimento Global e Depleção de Camada de Ozônio, com abrangência de impacto global, optou-se pelo uso do método CML. As demais categorias tiveram os métodos definidos a partir de Ugaya (2019).

Tabela 7 – Categorias de Impacto Ambiental e métodos de avaliação selecionados

<b>Categoria de Impacto Ambiental</b>	<b>Método</b>	<b>Unidade</b>
Potencial de Aquecimento Global	CML	kgCO <sub>2</sub> eq
Acidificação Terrestre	ReCiPe	kgSO <sub>2</sub> eq
Depleção de Recursos Abióticos – elementos	CML	kgSbeq
Depleção de Recursos Abióticos – fósseis	CML	MJ
Escassez Hídrica	AWARE	m <sup>3</sup> eqmundial
Depleção da Camada de Ozônio	CML	kgR11eq
Ecotoxicidade de água doce	USEtox	CTU <sub>e</sub>
Toxicidade humana – câncer	USEtox	CTU <sub>h</sub>
Toxicidade humana – não-câncer	USEtox	CTU <sub>h</sub>

Fonte: Autor.

As definições a seguir, resumindo características das categorias de impacto e métodos usados neste estudo, foram baseadas em thinkstep (2018).

**Potencial de Aquecimento Global:** está associado ao mecanismo do efeito estufa, onde a radiação de ondas curtas do Sol entra em contato com a superfície da Terra, sendo parcialmente absorvida, levando ao aquecimento direto, e parcialmente refletida como radiação infravermelha. A parte refletida é absorvida pelos gases de efeito estufa na troposfera e é irradiada novamente em todas as direções, inclusive na Terra, resultando no aquecimento da superfície do planeta. As atividades humanas contribuem para o agravamento deste mecanismo natural, através da geração ou do aumento dos gases de efeito estufa: dióxido de carbono, metano e CFC.

A análise do efeito estufa considera os possíveis efeitos globais de longo prazo. O Potencial de Aquecimento Global é calculado em equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>eq.), devendo ser especificado um intervalo de tempo de permanência dos gases na atmosfera para a avaliação, que usualmente é de 100 anos para avaliação das mudanças climáticas. O CML utiliza os fatores estabelecidos pelo Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

**Acidificação Terrestre:** tanto a acidificação de solos quanto de águas ocorre predominantemente através da transformação de poluentes do ar, como dióxido de enxofre e óxido de nitrogênio, em seus respectivos ácidos, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e HNO<sub>3</sub>, levando a uma diminuição no valor do pH da água da chuva, que acaba por causar danos aos ecossistemas resultando, por exemplo, em desmatamento. A acidificação tem efeitos prejudiciais diretos e indiretos, como carreamento de nutrientes ou alteração da solubilidade de metais nos solos, além de danos por corrosão a edifícios, materiais de construção, pedras naturais etc. O CML usa como indicador dióxido de enxofre equivalente (SO<sub>2</sub>eq.).

**Esgotamento de recursos:** tratada no CML como depleção de recursos abióticos (isto é, matérias-primas de recursos não-vivos que não são renováveis), descreve a redução da quantidade global de matérias-primas não-renováveis (pela definição, um período de no mínimo 500 anos). É dividida em duas subcategorias: **elementos**, que abrange uma avaliação da disponibilidade de elementos naturais, como minerais e minérios, incluindo minério de urânio, e tem como substância de referência para os fatores de caracterização o antimônio (Sb), e **fósseis**, que inclui os materiais de energia fóssil (óleo cru, gás natural, carvão), sendo caracterizados pelo poder calorífico inferior e expressos em MJ.

**Escassez Hídrica:** o AWARE (available water remaining) representa a água remanescente disponível por área em uma bacia hidrográfica, depois que a demanda de seres humanos e ecossistemas aquáticos for atendida. Ele avalia o potencial de privação de água, tanto para seres humanos quanto para ecossistemas, partindo do pressuposto de que quanto menos água permanecer disponível por área, maior a probabilidade de outro usuário ser privado. Os cálculos envolvem a normalização com o resultado da média ponderada de consumo mundial, resultando num indicador que é limitado a um intervalo de 0,1 a 100, sendo o valor de 1 correspondente à média mundial.

**Potencial de Depleção de Ozônio:** a camada de ozônio, localizada na estratosfera entre 15 e 50 km de altitude, é criada pela dissociação de átomos de oxigênio expostos à luz UV de ondas curtas e, apesar de sua concentração mínima, é essencial para a vida na Terra. O ozônio absorve a radiação UV de ondas curtas e a libera em comprimentos de onda mais longos, de forma que apenas uma pequena parte desta radiação chega à superfície.

Emissões associadas à atividade humana, agrupadas em dois conjuntos – os clorofluorocarbonetos (CFC) e os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) – destroem o ozônio, causando o buraco na camada de ozônio, no Polo Sul, e diminuindo sua espessura em latitudes médias. Como resultado, a superfície da Terra se aquece mais e, devido à sensibilidade dos seres vivos à radiação UV-B e UV-A, há possíveis efeitos em mudanças no crescimento ou diminuição das colheitas (interrupção da fotossíntese), incidência de tumores (câncer de pele e doenças oculares) e diminuição do plâncton marinho, o que afetaria fortemente a cadeia alimentar. O CML utiliza os guias publicados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), e expressa o impacto em kg de R11 equivalente (um tipo de CFC).

**Toxicidade Humana e Ecotoxicidade:** o USETox é um modelo de consenso científico desenvolvido em conjunto por instituições mundiais diversas. Tem um banco de dados referenciado para milhares de substâncias, usado para calcular fatores de caracterização para os impactos na saúde humana e na ecotoxicidade da água doce. Os fatores de efeito **humano** relacionam a quantidade absorvida ao risco potencial de efeitos adversos em humanos, que é baseado em efeitos **cancerígenos** e **não-cancerígenos** derivados de estudos de laboratório. O fator de caracterização da toxicidade humana é expresso em unidades tóxicas comparativas (CTU<sub>h</sub>), fornecendo o aumento estimado da morbidade por unidade de massa de um produto químico emitido (casos por quilograma). Os fatores de efeito para os **ecossistemas de água doce** são baseados em dados de concentração específicos da espécie,

nos quais 50% da população exibe um efeito. O fator de caracterização da ecotoxicidade aquática é expresso em unidades tóxicas comparativas ( $CTU_e$ ) e fornece uma estimativa da fração potencialmente afetada de espécies (PAF) integrada ao longo do tempo e volume por unidade de massa de um produto químico emitido.

### 3 METODOLOGIA

A ACV foi conduzida e organizada seguindo os preceitos das normas ABNT NBR ISO 14040:2009 (Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura) (ABNT, 2009a) e ABNT NBR ISO 14044:2009 (Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações) (ABNT, 2009b). Outros documentos de apoio para o trabalho são o Handbook on Life Cycle Assessment (Guinée, 2002) e o Manual do Sistema ILCD (IBICT, 2014). No trabalho, exploram-se as quatro fases distintas do estudo de ciclo vida tal como normalizado: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação.

Para ilustração e melhor detalhamento dos sistemas de produto avaliados, apresenta-se inicialmente um descritivo da facilidade em estudo. Considera-se desde seu histórico até algumas particularidades da gestão, com intuito de justificar a evolução da planta que resultou na sua atuação com a reciclagem de garrafas PET. As características próprias dessa instalação industrial têm profunda relação com os resultados nos impactos ambientais avaliados neste estudo, tanto pela escala de produção como pela tecnologia empregada.

Em seguida, detalham-se um pouco mais as características gerais dos dados primários utilizados no estudo, elucidando algumas peculiaridades sobre os diferentes insumos e formas de operação.

A fonte de dados primária é o banco de dados de apontamentos de produção, consumos, qualidade, custeio etc. da Recicladora analisada. Os dados secundários foram obtidos na literatura.

Como ferramenta computacional, tanto para cálculos quanto para consultas a banco de dados e modelos, usou-se principalmente o *software* GaBi. Também se utilizou o GHG Protocol, para informações relacionadas a emissões associadas a mudanças climáticas. Planilhas de cálculo foram criadas, para compilação dos dados.

#### 3.1 FACILIDADE EM ESTUDO

A empresa Recicladora utilizada para o estudo está localizada em Poços de Caldas-MG, e conta com tecnologia avançada para a reciclagem de garrafas PET, implantada no início dos anos 2010. A unidade fabril que abriga esse empreendimento de reciclagem, no

entanto, é um complexo industrial que tem um histórico bastante grande e importante para o poliéster, no contexto brasileiro.

A operação da unidade iniciou no final da década de 1970, com a produção de fibras de poliéster virgem, a partir da polimerização das matérias-primas básicas: Ácido Tereftálico Purificado (PTA) e Monoetileno Glicol (MEG). Nos anos 1980, ampliaram-se as instalações e iniciou-se a produção de resina PET, também virgem, em unidades que operavam por batelada. No início dos anos 1990, houve grande investimento para a construção de linhas de polimerização contínua para produção de resina PET virgem para atender o então iniciante mercado brasileiro de garrafas PET. Nesse projeto, inclusive, construiu-se uma unidade de fabricação de embalagens contendo processos de injeção e sopro desse tipo de garrafa. Ainda na década de 1990, a antiga fábrica de fibra de poliéster passou a contar com uma linha de extrusão, que permitiu o uso de matéria-prima reciclada para a produção de fibra de poliéster reciclada. No final dessa mesma década, em virtude da franca expansão do mercado brasileiro de resina PET, houve a duplicação da produção na unidade de Poços de Caldas, com a construção de mais uma unidade de polimerização contínua.

Em pouco mais de quatro décadas desde seu início, o complexo industrial passou por diferentes proprietários e adaptações de produtos e escala de produção, refletindo os movimentos da indústria e do mercado do PET no Brasil e no mundo. Quando, na segunda metade da década de 2000, houve a descontinuação da produção de resina PET virgem na unidade de Poços de Caldas, mantiveram-se em operação apenas as fábricas de fibra de poliéster virgem, também chamada de Fibra Convencional; e de fibras recicladas, consumindo matéria-prima de origem externa à planta. A empresa, então, estudou alternativas para maior ocupação e valorização do estabelecimento industrial, de forma a minimizar a ociosidade das instalações disponíveis. Daí nasceu o projeto de implantação de uma recicladora de garrafas PET, com intuito de produzir resina PET reciclada grau alimentício (B2B) e também abastecer a linha de fibra poliéster reciclada (B2F).

A Recicladora de garrafas PET foi projetada para recuperação de 20 mil t de garrafas PET/ano, e produção da ordem de 10,3 mil t de PET-PCR B2B e 5,7 mil t de Fibra de Poliéster Reciclada B2F.

Como a empresa já tinha conhecimento prévio dos desafios que envolviam os parâmetros técnicos do processamento de PET reciclado – impurezas da matéria-prima e consumo de água, por exemplo – optou-se por investir em tecnologia de referência mundial,

para as etapas de produção que até então inexistiam na unidade de Poços de Caldas. Assim, baseado na melhor estimativa levantada para os atributos técnicos da qualidade da matéria-prima que estaria disponível no Brasil e focando nas exigências de qualidade que os produtos B2B e B2F deveriam atender, foram selecionados os fornecedores da tecnologia e dos equipamentos.

A tecnologia avaliada neste trabalho, para o PET-PCR (B2B), consiste de três grandes etapas:

- Transformação das garrafas PET pós-consumo em *flakes*: Linha de Lavagem com tecnologia italiana, fornecida pela AMUT. Excelente grau de descontaminação das garrafas e com alta produtividade, usando selecionadores automáticos de garrafas e de *flakes*. Baixo consumo de água.
- Transformação de *flakes* em grãos: Linha de Extrusão com tecnologia austríaca, fornecida pela EREMA. Processo homologado para produção de PET-PCR grau alimentício, com alta estabilidade de processo (uniformidade de viscosidade intrínseca e cor) e baixo impacto em propriedades do material (baixas degradação e perda de viscosidade intrínseca).
- Aumento da viscosidade intrínseca dos grãos amorfos: Linha de Pós-condensação com tecnologia norte-americana, fornecida pela BEPEX. Na verdade, trata-se do uso de linha de produção originalmente concebida para o processamento de material virgem. Tem como características a produção contínua, a estabilidade do processo, a extração de leves e a uniformidade do material produzido, graças ao processo de blendagem.

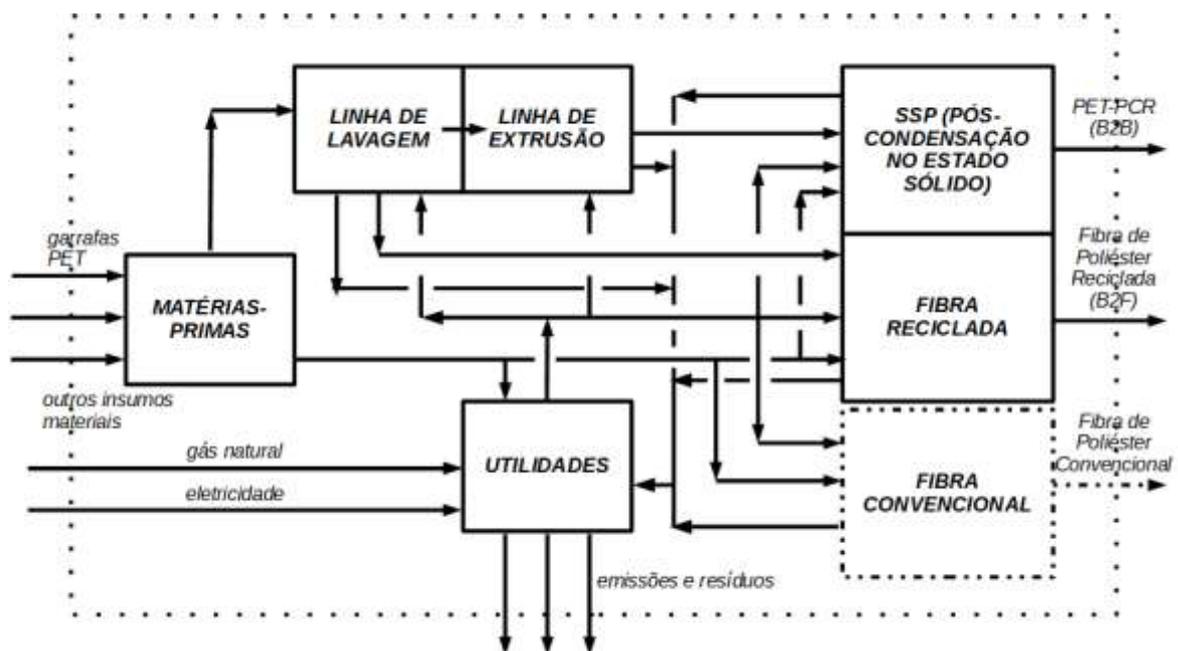
Para a Fibra Reciclada (B2F), a tecnologia avaliada nesse trabalho consiste de três grandes etapas:

- Transformação das garrafas PET pós-consumo em *flakes*: Linha de Lavagem com tecnologia italiana, fornecida pela AMUT. Excelente grau de descontaminação das garrafas e com alta produtividade, usando selecionares automáticos de garrafas e de *flakes*. Baixo consumo de água.
- Transformação de *flakes* em filamentos: Linha de Extrusão seguido de Fiação Longa, com tecnologia norte-americana.
- Estiramento, Secagem, Encrespamento e Corte: Linha de Estiragem com tecnologia norte-americana.

Observação: a primeira etapa, de transformação de garrafa PET pós-consumo em *flakes*, é idêntica para B2B e B2F.

A Figura 7 apresenta um esquema com a configuração da unidade industrial analisada neste estudo, ilustrando a interligação de fluxos internos de materiais e energias: distribuição de utilidades, matérias-primas e insumos materiais, bem como coleta de efluentes para tratamento e emissões atmosféricas dos sistemas de combustão. A produção de Fibra Convencional é citada por demandar e compartilhar algumas utilidades, mas não faz parte do escopo da avaliação. As etapas relacionadas diretamente aos produtos reciclados serão detalhadas nesta seção.

Figura 7 – Esquema industrial da Facilidade em estudo. Três linhas distintas de Produção, com áreas de Utilidades e Matéria-Prima centralizadas



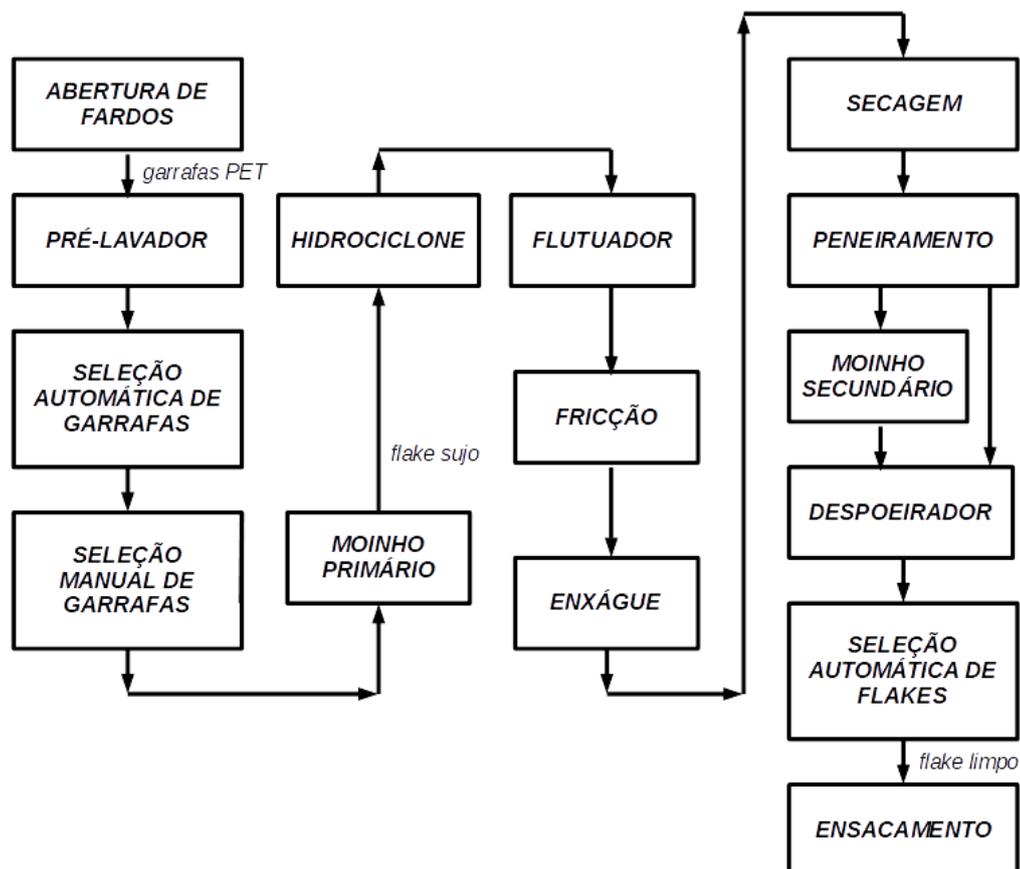
Fonte: Autor.

### 3.1.1 Linha de Lavagem, produção de flakes (etapa comum aos processos B2B e B2F)

O processo chamado de Linha de Lavagem é o responsável pela transformação de garrafas PET em *flake* e consiste de uma sequência de equipamentos de processamento, interligados por esteiras, tubulações e roscas transportadoras, com controle computadorizado central de forma a manter um fluxo contínuo de produção e com variáveis monitoradas e

controladas, como: vazões, temperaturas, dosagens etc. A Figura 8 apresenta um esquema básico dessa etapa.

Figura 8 – Esquema da produção de *flakes*



Fonte: Autor.

Os fardos de garrafa PET prensadas são abertos manualmente, e uma máquina de carregamento alimenta o processo. O primeiro equipamento é um Pré-lavador, a úmido, que tem como função principal a retirada de contaminantes grosseiros da matéria-prima, como, por exemplo, terra e areia impregnados na parte externa das garrafas, além de rótulos e tampas soltos, materiais de pequenas dimensões etc.

Essa lavagem prévia é de grande importância para melhor funcionamento da etapa seguinte, que é a Separação Automática de Garrafas. Esteiras com velocidade elevada conduzem as garrafas de forma que sensores óticos e de infravermelho avaliam o material de forma que aquilo que não é desejado no processo seja expurgado da corrente principal através de jatos direcionados de ar comprimido. Esta triagem tem como resultado final a separação de dois subprodutos: garrafas PET não desejadas para aquela campanha específica (por exemplo,

quando se produz *flake* incolor, separam-se garrafas PET coloridas para uso futuro na produção de *flake* verde, por exemplo) e outros plásticos e metais (por exemplo, embalagens de PVC, PEAD, PS, latas de alumínio etc.).

Na sequência, uma estação de Separação Manual faz o trabalho mais refinado de triagem, e atua como monitor da qualidade do processo automático anterior. As garrafas PET desejadas, com rótulos e tampas, são destinadas ao Moinho Primário, onde o material será triturado em meio aquoso até que atinja determinada granulometria, quando então será transportado para a Estação de Lavagem de *Flakes*.

O processo de Lavagem de *Flakes* inicia com um hidrociclone, para retirada de impurezas pesadas que possam ter passado pela etapa de moagem, como terra, areia, metais etc. Na sequência, utiliza-se um Tanque de Flutuação, que tem objetivo de separar os rótulos e tampas, comumente fabricados com materiais menos densos que o PET – poliolefinas e papel, por exemplo. Os *flakes* de PET são retirados desse tanque pelo fundo, e alimentam um Lavador por Fricção, que contém um agitador e trabalha com produtos químicos e temperatura para promover a necessária limpeza do material, como por exemplo a retirada de cola residual da embalagem original. Para finalizar a etapa molhada do processamento, os *flakes* passam por um Tanque de Enxágue, cuja função é retirar qualquer excesso de produtos químicos do material que foi processado até então.

Úmido, o material precisa ser seco e peneirado, de forma a corrigir a granulometria desejada para o produto final: contaminantes e partículas de PET pequenas resultantes da moagem primária e transporte são retirados como resíduo de fundo da peneira, e material com tamanho acima do especificado é direcionado para um Moinho Secundário. Com a granulometria adequada, os *flakes* passam por um despoeirador.

Como etapa final de qualificação no processo de produção, o material produzido passa por um Seleccionador Automático de *Flakes*, que tem princípio de funcionamento semelhante à estação de seleção automática de garrafas: sensores avaliam o material, e o material indesejado é identificado e expurgado do fluxo principal através de jatos direcionados de ar comprimido.

Finalmente, os *flakes* são embalados em big-bags de 1 t, e armazenados para uso posterior na etapa de Extrusão, para o B2B, ou de Fiação, para o B2F. O consumo dos *flakes* aguarda a liberação após classificação do material, que é feita baseada em avaliações de

amostras em Laboratório de Controle de Qualidade e confirmação de normalidade no processo produtivo.

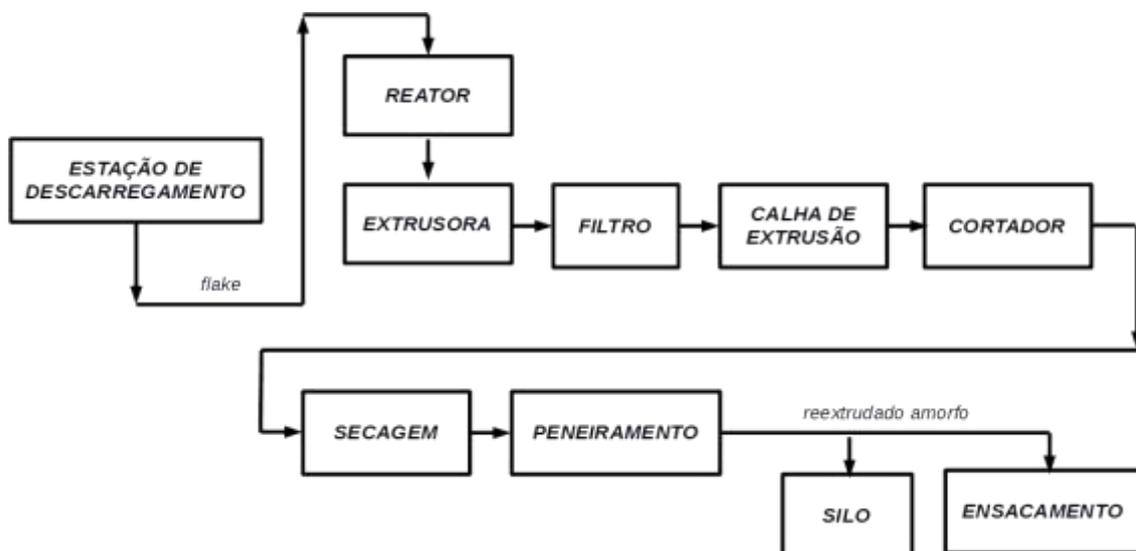
Os circuitos de água da planta são tais que procuram aproveitar ao máximo o descarte de uma etapa na alimentação de outra, através de filtração intermediária. As águas residuais que não são passíveis de reaproveitamento no processo de lavagem, enfim, são direcionadas para a Estação de Tratamento de Efluentes.

Ao longo do processo produtivo, há diversos pontos de geração de subprodutos – material plástico indesejado, metais, rótulos, tampas, pó etc. O material que é coletado nesses pontos é embalado, pesado, identificado e direcionado, de forma a se fazer não somente a gestão dos resíduos, mas também de ter um indicativo da qualidade da matéria-prima que alimenta o processo.

### 3.1.2 Linha de Extrusão e Linha de Pós-Condensação no Estado Sólido, produção de resina PET-PCR (B2B)

O processo chamado de Linha de Extrusão é o responsável pela transformação de *flake* em reextrudado amorfo e ocorre numa etapa bastante mais compacta. A Figura 9 apresenta um esquema básico dessa etapa.

Figura 9 – Esquema da produção de reextrudado amorfo



Fonte: Autor.

Os *flakes* são alimentados a partir de estação de descarregamento, onde os big-bags contendo o material são esvaziados e transportados até um Reator, onde a ação mecânica de um agitador procura manter uma temperatura tal que promova a descontaminação de produtos químicos residuais que impediriam a aplicação alimentícia do PET recuperado. A manutenção de vácuo no Reator garante a retirada dos contaminantes do processo produtivo.

Os *flakes* descontaminados alimentam uma extrusora, que promove a fusão do material e o transforma numa massa que, sob pressão, passa por um filtro de telas que retém partículas que comprometeriam o processamento pelo cliente da matéria-prima reciclada. A massa filtrada passa por uma boquilha de extrusão, ganhando a forma de espaguete que são resfriados numa calha, antes de entrar num cortador rotativo que vai cortar o material no formato de *pellets* cilíndricos.

Os *pellets* passam por desaguamento, são secos e peneirados, para eliminar material com formato não-conforme, como pó, cortes de pequena ou grande dimensão e presença de colados.

Através de transporte pneumático, podem ser destinados diretamente a big-bags com capacidade de 1.250 kg, ou para silos de armazenamento. O consumo do reextrudado amorfo aguarda a liberação após classificação do material, que é feita baseada em avaliações de amostras em Laboratório de Controle de Qualidade e confirmação de normalidade no processo produtivo.

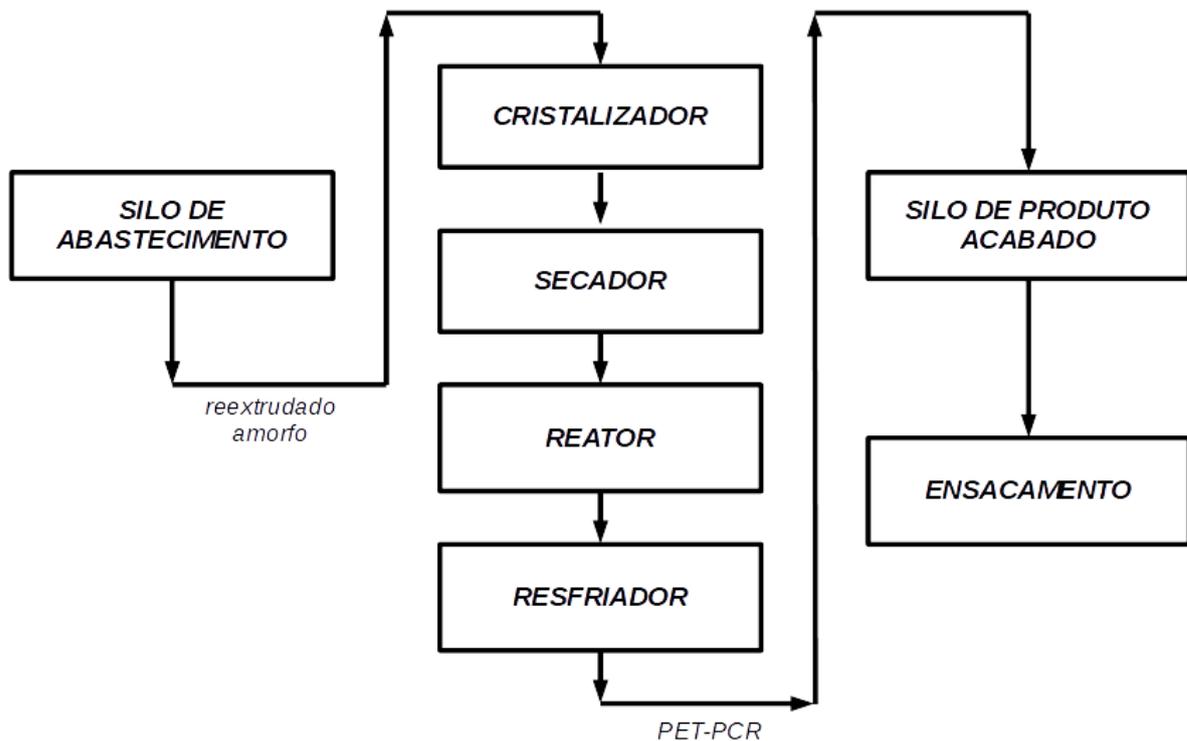
O consumo de água nessa etapa não é expressivo. A água residual é destinada também à Estação de Tratamento de Efluentes.

Essa etapa gera como resíduos as borras do lançamento do processo e o material resultante da retrolimpeza dos filtros de polímero, que precisam ser destinados externamente. O material que é separado no peneiramento é quantificado, para fins de controle de qualidade da produção, mas é reaproveitado através de sua reinserção na alimentação do Reator.

O processo chamado de Linha de Pós-condensação no Estado Sólido é aquele que confere ao reextrudado amorfo as propriedades finais de cristalização e viscosidade intrínseca requeridas pelo mercado, transformando-o finalmente em PET-PCR B2B. Consiste de equipamentos de processo, em operação contínua, fazendo o tratamento térmico do material utilizando altas temperaturas e ambiente inerte, para promover o aumento da cadeia molecular e retirada de subprodutos, sem afetar a cor do produto. Um sistema central de controle

monitora e controla as principais variáveis de processo. A Figura 10 apresenta um esquema básico dessa etapa.

Figura 10 – Esquema da pós-condensação no estado sólido do PET-PCR



Fonte: Autor.

O reextrudado amorfo é abastecido em silos de alimentação, que conduzem os *pellets* a um processo de cristalização. Após cristalizado, o material passa por uma etapa de secagem, para então ser conduzido a um Reator, onde a manutenção de temperatura e ambiente controlados promovem o aumento da cadeia molecular, através do processo de pós-condensação no estado sólido (SSP).

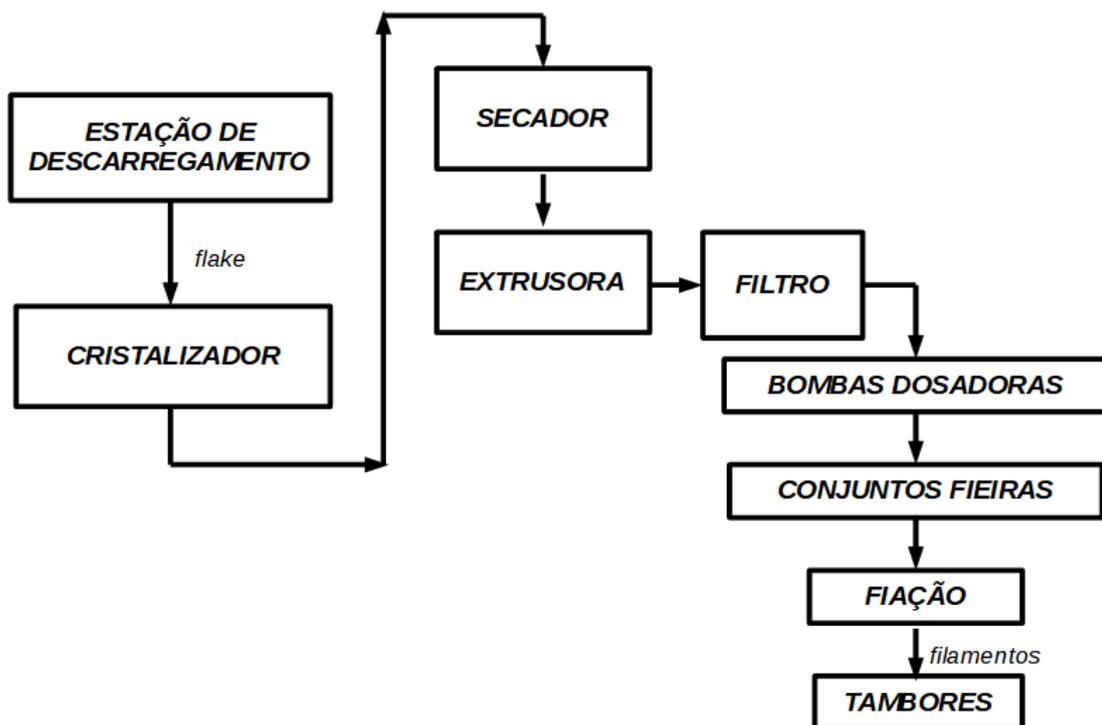
Após esse processo, o material é destinado a um resfriador, de onde é encaminhado para silos para posterior ensacamento em big-bags com capacidade de 1.250 kg. O produto final (PET-PCR) aguarda a liberação após classificação do material, que é feita baseada em avaliações de amostras em Laboratório de Controle de Qualidade e confirmação de normalidade no processo produtivo, e fica então disponível no Armazém de Produtos Acabados para ser expedido aos clientes.

O consumo de água é bastante baixo nesta etapa, e se dá apenas na forma de resfriamento do processo, através de circuitos de água gelada e torre de resfriamento. A geração de resíduos nesta etapa é praticamente desprezível.

### 3.1.3 Linha de Fiação e Linha de Estiragem, produção de Fibras de Poliéster Reciclada (B2F)

O processo chamado de Linha de Fiação é o responsável pela transformação de *flake* em filamentos. A Figura 11 apresenta um esquema básico dessa etapa.

Figura 11 – Esquema da produção de filamentos



Fonte: Autor.

Os *flakes* são alimentados a partir de estação de descarregamento, onde os big-bags contendo o material são esvaziados e transportados até um Cristalizador, onde a ação de agitação e aquecimento a partir de um soprador de ar com aquecimento elétrico condiciona os *flakes* para alimentação de um Secador. Na etapa de transporte pneumático entre o Cristalizador e o Secador, uma sequência de processos permite a retirada de parte do pó de PET, remanescente da etapa anterior.

Após a secagem dos *flakes*, com tempo de residência num ambiente com ar desumidificado e quente, esses alimentam uma extrusora. Se o produto requerer algum aditivo a ser incorporado em sua massa, como por exemplo pigmentos e aditivos ópticos, um sistema de dosagem alimenta esses insumos em conjunto com o *flake*. A extrusora promove, então, a fusão do material e o transforma numa massa que, sob pressão, passa por um filtro de telas que retém partículas que comprometeriam a qualidade do produto e o processo de fiação.

A massa filtrada é recalçada por bombas dosadoras através de conjuntos de filtração volumétrica e fieiras, ganhando a forma de filamentos que são resfriados pelo sopro de ar em temperatura controlada. Aplica-se uma emulsão molhando o conjunto de filamentos, com intuito de conferir propriedades para seu processamento posterior.

O conjunto de milhares de filamentos contínuos é coletado em tambores que contém da ordem de 700 kg de material fiado, e descontinuados através de corte assim que o tambor atinge o peso especificado.

O consumo dos tambores com material fiado aguarda a liberação após classificação do material, que é feita baseada em avaliações de amostras em Laboratório de Controle de Qualidade e confirmação de normalidade no processo produtivo.

O consumo de água nessa etapa se dá através da aplicação da emulsão e no consumo de vapor para aquecimento do ar desumidificado. O efluente é gerado nas situações de limpeza da área produtiva e descontroles que possam levar a transbordamento ou perdas de preparação e emulsões, sendo destinado também à Estação de Tratamento de Efluentes. Vale ressaltar que não se trata de uma geração significativa, comparativamente a outras etapas do processo industrial.

Essa etapa gera como resíduos as borras do lançamento do processo e o material resultante da retrolimpeza do filtro de polímero, que precisam ser destinados externamente.

O processo chamado de Linha de Estiragem é aquele que confere aos filamentos as propriedades mecânicas e dimensionais finais requeridas pelo mercado, transformando-os em fibra cortada (Fibra de Poliéster Reciclada B2F). A Figura 12 apresenta um esquema básico dessa etapa.

Figura 12 – Esquema da produção de fibra cortada



Fonte: Autor.

Pode-se considerar uma primeira grande etapa, onde um agrupamento de tambores com filamentos é alinhado para alimentação da Estiradeira, que consiste de conjuntos de rolos com superfícies, velocidades e temperaturas definidas de forma a promover o estiramento e o tratamento térmico dos filamentos. Nessa etapa, aplicam-se emulsões com objetivo não somente de facilitar o processamento interno, mas também de conferir propriedades no produto final e para o processamento nas instalações do cliente.

Após estirado, o conjunto de filamentos contínuos passa por um Encrespador, que promoverá ondulações com amplitude e frequência controladas no material.

O material úmido passa então por um Secador, de forma que a umidade excessiva seja retirada dos filamentos.

O conjunto de dezenas de milhares de filamentos contínuos, agora encrespados e secos, são direcionados a um Cortador que promoverá a adequação do comprimento das fibras à necessidade do mercado.

Os flocos de material cortado, semelhantes à fibra de algodão, alimentam então um Enfardador, que fará a compactação no produto acabado no formato de fardos embalados, cada um contendo da ordem de 300 kg de fibra cortada. O produto final (Fibra de Poliéster Reciclada) aguarda a liberação após classificação do material, que é feita baseada em avaliações de amostras em Laboratório de Controle de Qualidade e confirmação de normalidade no processo produtivo, e fica então disponível no Armazém de Produtos Acabados para ser expedido aos clientes.

O consumo de água nesta etapa se dá através da aplicação das emulsões e no consumo de vapor para aquecimento da Estiradeira e do Secador. O efluente é gerado nas situações de limpeza da área produtiva e descontroles que possam levar a transbordamento ou perdas de preparação e emulsões, sendo destinado também à Estação de Tratamento de Efluentes. Vale

ressaltar que não se trata de uma geração significativa, comparativamente a outras etapas do processo industrial.

Esta etapa gera como resíduos o material do lançamento e interrupções do processo, além de sobras de material de tambores e limpeza do processo nas mudanças de lotes, que precisam ser destinados externamente.

### **3.1.4 Utilidades**

É importante esclarecer que a indústria analisada possui uma Central de Utilidades responsável por atender as diversas fábricas e suas etapas de produção com processos tais como a distribuição da energia elétrica, a geração de vapor, o aquecimento de fluido térmico, o resfriamento com torres de resfriamento e sistemas de água gelada, suprimento de ar comprimido e nitrogênio gasoso, além do abastecimento de água e o tratamento de efluentes.

As etapas de produção descritas para os processos B2B e B2F são clientes dos insumos e serviços disponibilizados pela Central de Utilidades. Sempre que possível, através de medidores, cálculos e/ou balanços de massa e energia, atribui-se a cada etapa-fim a quota-parte daquilo que é demandado, de forma que possa ser alocada as quantidades mais representativas a cada diferente produto. Esse conceito é aplicado para o estudo de ACV em questão.

Detalha-se, a seguir, um pouco mais alguns aspectos que já foram mencionados na descrição das etapas de fabricação dos produtos, e que são de suma relevância para avaliação de impactos ambientais deste estudo por se tratar de gestão de águas, efluentes e energia.

A energia elétrica é consumida de forma direta nas etapas de fabricação, nos motores, aquecedores e outros equipamentos que constituem esses processos, mas também de forma indireta pelo consumo de energia elétrica na Central de Utilidades, para bombeamento, processos de tratamento de água e efluentes, produção de ar comprimido etc. Através de Subestações Unitárias dedicadas, tem-se um domínio bastante grande do consumo de energia elétrica em cada fábrica (diretamente). Para apuração do consumo indireto de energia elétrica, usa-se de balanços de massa e energia e histórico de consumos, de forma que o consumo da Central de Utilidades também é bem alocado/distribuído nos processos de fabricação que demandam seus insumos e serviços.

Outra fonte de energia de grande relevância na matriz da planta é o gás natural, utilizado em Caldeira para geração de vapor e em Aquecedor de Fluido Térmico. Ambos os

sistemas de combustão passaram por adaptação no início dos anos 2010 com a melhor tecnologia disponível para a aplicação requerida, devido à substituição do antigo insumo energético, Óleo Combustível A2, pelo gás natural.

A água que abastece as fábricas é captada através de poços profundos. Parte da água passa por tratamento em Osmose Reversa, com intuito de consumo na reposição do sistema de geração de vapor e algumas aplicações na fabricação, como resfriamento da Calha de Extrusão (Linha de Extrusão) e Preparação de Emulsões (Linhas de Fiação e Estiragem). A água bruta é utilizada em sistemas onde a qualidade da água subterrânea já atende à necessidade, como por exemplo a reposição da Linha de Lavagem e do Sistema de Água Gelada. Outras utilizações da água de poços, menos relevantes em termos de consumo, são a alimentação de vestiários, banheiros e chuveiros de emergência.

O tratamento de efluentes usa tecnologia de reator biológico aeróbico de lodos ativados com aeração prolongada, e sua origem remonta ao tratamento dos efluentes das plantas químicas do complexo industrial. Com alta eficiência de remoção de carga orgânica e a partir da necessidade de reciclar a água na unidade, no final dos anos 1990 foi implantado um processo de clarificação de água para condicionar o efluente tratado e utilizá-lo como água de reposição nos sistemas de torre de resfriamento, além de disponibilizar essa água reciclada para limpeza das áreas produtivas.

Com a implantação da Recicladora, contribuindo com um novo efluente de características muito distintas do que havia até então, foi necessário construir um processo de pré-tratamento físico/químico, de forma a compatibilizar as correntes para um tratamento biológico eficiente. Para que a carga orgânica oriunda da lavagem das garrafas seja admitida no reator aeróbio, é necessário a correção do pH e a retirada da alta carga de sólidos contida no efluente da Linha de Lavagem. Implantou-se um processo de filtração do efluente da Recicladora, por membranas geotêxteis, retendo-se então um lodo com grande concentração de material inorgânico. Devido à carga orgânica expressiva desse novo efluente, a quantidade de lodo biológico descartado na estação de tratamento de efluentes também aumentou, bem como o volume de água reciclada disponível ao final do tratamento. O lodo biológico descartado do sistema passa por desaguamento em membranas geotêxteis, e posteriormente pode ter como destinação final (externa) o coprocessamento em fornos de cimenteiras, aterro sanitário ou compostagem.

## 3.2 DADOS DE FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO

As informações de fabricação utilizadas neste trabalho foram extraídas de um banco de dados de quatro anos que continha as produções e os consumos de matérias-primas, outros materiais e insumos energéticos, mês a mês, desde o lançamento da unidade de reciclagem de garrafas PET no final de 2013.

Estes dados são oriundos de planilhas de fechamentos de turno de trabalho, diários e mensais, contendo a apropriação, por exemplo, das matérias-primas e das utilidades consumidas, bem como os volumes de produção para os produtos principais de cada etapa, seus resíduos e subprodutos.

### 3.2.1 Matéria-prima principal: garrafas PET

A matéria-prima principal – as garrafas PET – tem agrupamentos devido a características próprias que impactavam na sua destinação dentro da Recicladora. Por exemplo, tratava-se de forma distinta as garrafas incolores, as verdes, as coloridas, as de óleo e as *sleeve*, cujos critérios, características e impactos serão detalhados adiante. Todas estas categorias também podem ter um outro atributo classificador, com relação à origem ser pós-consumo (PC) ou pós-industrial (PI).

A principal categoria de garrafas PET é a de garrafas incolores. Além da maior oferta no mercado, é a de mais ampla utilização nos processos de reciclagem por ser aquela cujo produto reciclado oferece a menor limitação às aplicações finais. Para o segmento B2B, a maior preocupação é com relação à origem da garrafa ser um produto alimentício ou não, visto que a legislação exige que a resina PET-PCR somente seja destinada ao mercado alimentício se produzida apenas com embalagens originalmente alimentícias. Como o mercado de resíduos brasileiro ainda não trabalha com esta categorização, a empresa recicladora tem que promover procedimentos de garantia de cumprimento desta exigência da legislação, triando as garrafas incolores adquiridas do mercado.

A segunda categoria mais importante em termos de volume é a de garrafas PET verdes. Embora majoritariamente oriundas de produtos alimentícios, a cor acaba sendo um limitante para os produtos reciclados a partir desta matéria-prima. Na empresa em análise, sua destinação era tipicamente para a produção de fibras têxteis (B2F), pois sua destinação ao mercado B2B não tinha aceitação do mercado, com alegações de não homogeneidade de cor.

A categoria de garrafas PET “óleo”, embora praticamente 100% incolor e alimentícia, ganhou esta segregação no mercado da reciclagem desde que os volumes passaram a ser expressivos. O principal motivo é o resíduo do produto embalado que fica na garrafa descartada, cuja limpeza nos processos de lavagem impõe limitações e cuidados, sob risco de contaminação do processo de produção que não seja adequado para tal exigência de limpeza.

As garrafas coloridas também ganharam uma categoria própria e diferente daquela das garrafas verdes, principalmente pela incorporação de pigmentos e corantes que podem comprometer os processos de reciclagem, seja pelo impacto na cor final do produto, seja pela influência no comportamento dos processos de filtração, extrusão etc.

A categoria das garrafas *sleeve* é relativamente recente no mercado de sucatas, e deve-se principalmente ao grande aumento de participação desse tipo de embalagem. Para os processos de reciclagem, o desafio imposto por esse tipo de garrafa é a mistura de materiais: embora a maior parte do material utilizado na composição da embalagem seja o PET, o rótulo *sleeve* costuma ser de PVC, o mais desafiador contaminante da reciclagem do PET. Assim, faz-se necessária a retirada prévia do rótulo para evitar a contaminação do processo de produção. Na empresa em análise, que utiliza processo de Seleção Automática de Garrafas, os rótulos *sleeve* levam à segregação indevida do material desejado (PET) em virtude do material do rótulo (filme de PVC ou outros), pois o equipamento de seleção avalia a embalagem em questão, cujo interior é uma garrafa PET, como se fosse constituído do material do rótulo.

### **3.2.2 Outros insumos materiais e energéticos**

Outros materiais utilizados no processo e produção são: aditivos, como por exemplo *toner* para adequação de cor do produto final; insumos químicos, como por exemplo detergentes para a limpeza; e elementos de filtração e embalagem, como por exemplo telas de filtração e *big-bags*.

Os principais insumos energéticos são a eletricidade, majoritariamente consumida nos motores de acionamento de equipamentos rotativos, como moinhos, extrusoras, bombas e esteiras; e o gás natural, utilizado para produção de vapor d’água e aquecimento de fluido térmico, que por sua vez promovem o aquecimento do processo produtivo.

### 3.2.3 Subprodutos e resíduos

O processo de descontaminação de garrafas PET pós-consumo gera diversos subprodutos. Além do pó de PET – pequenas partículas de PET oriundas do processo de moagem e que devido a sua granulometria não têm aplicação desejada no processo de reciclagem em questão – destacam-se a separação de rótulos e tampas, bem como outros plásticos que são adquiridos involuntariamente como contaminantes dos fardos de garrafas PET comprados do mercado, metais, resíduos dos produtos contidos nas embalagens coletadas (restos de refrigerante, óleo, produtos de limpeza etc.), contaminantes agregados no trajeto entre o descarte do consumidor até a chegada à Recicladora (lixo doméstico, areia, terra etc.).

Finalmente, quantifica-se que para a produção de 1 tonelada de *flakes* de PET, existe a geração paralela média de 333 kg de subprodutos diretamente no processo de Lavagem através da separação manual dos materiais que constituem a embalagem do fardo de garrafas PET prensadas (arames, fitas, ráfias, papelão etc.), das separações automática e manual, já com a matéria-prima pré-lavada (materiais metálicos, outros plásticos, cores indesejadas etc.) e dos resíduos do processo de moagem, lavagem, peneiramento e despoeiramento. O processo de tratamento dos efluentes da Linha de Lavagem também gera resíduos sólidos, como: 1) a farinha fóssil contaminada no processo de reaproveitamento de água do processo no Filtro a Vácuo (para retirada, principalmente, da cola contida nas embalagens e removida dos *flakes* no processo de lavagem); 2) os resíduos sólidos coletados no processo de filtração em membranas geotêxteis (Tratamento Preliminar) e 3) o lodo biológico descartado na ETE.

Dessa forma, deve haver um cuidado com o processo de alocação. O processo de alocação adotado é o econômico, visto que a justificativa para a reciclagem das embalagens PET é a recuperação desse polímero, como citado por Chehebe (1997): “(...) os valores atribuídos pela sociedade aos produtos são a principal razão para a existência e a manutenção do processo produtivo e conseqüentemente a razão do efeito ambiental (...)”. Pode-se e deve-se buscar a redução da geração dos subprodutos através de diversas ações que estão fora do escopo da atividade de reciclagem propriamente dita, como, por exemplo, cuidados no projeto das embalagens (mistura de materiais, uso de cores etc.) e cuidados no descarte (coleta seletiva, por exemplo). Os subprodutos gerados no processo de descontaminação das garrafas PET pós-consumo têm um valor de mercado bastante menor que aquele pago pela matéria-prima desejada (PET pós-consumo), variando, por exemplo, de 1 : 12 para o papelão até 1 : 4

para o pó de PET, ficando os demais contaminantes, como metais e outros plásticos, dentro destes limites. Para os resíduos associados ao tratamento do efluente, ao contrário, além dos gastos para tratamento interno e condicionamento, há um desembolso para sua destinação: os resíduos sólidos da filtração a vácuo e da contenção em membranas geotêxteis são destinados a aterros sanitários ou a coprocessamento em cimenteiras, enquanto o lodo biológico descartado do tratamento de efluentes, além das destinações citadas, também pode ser enviado à compostagem. Tipicamente, a definição para uma ou outra destinação se dá pelas condições de mercado.

Quanto aos subprodutos da Linha de Lavagem diretamente, o perímetro dessa etapa do processo de produção já contempla os consumos energéticos envolvidos na sua geração e separação; portanto não há interferência no critério de alocação. Para os resíduos sólidos retidos na membrana geotêxtil, há um limite bastante claro para os produtos químicos utilizados nesse processo, e o consumo energético pode ser bem avaliado. Para o lodo descartado no reator biológico da ETE, o critério de alocação deve ser a contribuição da carga orgânica de alimentação do processo biológico, visto que o tratamento é compartilhado também com outras fábricas que têm ali seus efluentes tratados.

### **3.2.4 Logística de abastecimento de garrafas**

Com relação ao recebimento de matéria-prima, os fardos de garrafas PET pós-consumo prensadas foram tipicamente comprados de sucateiros, respondendo por algo da ordem de 95% do suprimento. Observou-se que praticamente a totalidade do transporte foi rodoviário, em caminhões de pequeno porte ou carretas, com carga média inferior a 9 t de fardos de garrafas PET. As condições de idade da frota e de manutenção dos veículos também variavam bastante.

Principalmente para as maiores distâncias, observou-se predominância da categoria de frete denominada “frete retorno”, cuja característica é a de se aproveitar a disponibilidade em um dos trechos da viagem para um novo carregamento que vai agregar proventos ao transportador, sendo que a remuneração devida já está paga pela contratação original. Por exemplo, caminhões que são contratados para levar cargas do Sudeste ao Nordeste e que, uma vez que voltariam vazios, aproveitam para trazer cargas de oportunidade, como por exemplo os fardos de garrafa PET, que por si só não justificariam a contratação de um frete dedicado.

## 4 RESULTADOS

Neste tópico, apresenta-se o desenvolvimento das quatro fases distintas da ACV: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação. Ainda que sob risco de se tornar redundante, algumas definições de tópicos anteriores são resgatadas, com o intuito de agrupar as informações mais relevantes e ter uma melhor contextualização.

Devido à característica do trabalho de avaliar duas diferentes rotas tecnológicas de reciclagem, B2B e B2F, que compartilham etapas de grande relevância para o processo estudado (a Logística de Abastecimento de Garrafas e a Produção de *Flakes*), os resultados da ACV serão apresentados de forma ampla sempre que possível (por exemplo, objetivo e escopo) e de forma mais específica quando necessário (por exemplo, análise de inventário e avaliação de impacto). Assim, espera-se abordar as individualidades de cada etapa do processo avaliado, além do devido agrupamento para cada sistema de produto.

### 4.1 DEFINIÇÃO DE OBJETIVO E ESCOPO

#### 4.1.1 Objetivo do estudo

O objetivo desta ACV é avaliar os impactos ambientais da reciclagem de garrafas PET pós-consumo no contexto brasileiro, para as alternativas de Resina Grau Garrafa (processo B2B) e Fibras Cortadas de Poliéster Recicladas (processo B2F).

Objetiva-se entender os impactos ambientais dos produtos reciclados de PET entre si (B2B x B2F), fazer comparações com informações da literatura sobre produtos de outras regiões, reciclados e virgens, identificar oportunidades e propor melhorias ambientais para o sistema de produto estudado. Também se propõe a disponibilizar informações importantes para os atores envolvidos na cadeia de sustentabilidade ambiental do PET: produtores, empresas clientes (grandes marcas, transformadores, envasadores etc.), consumidores finais, coletores de recicláveis, governos, comunidade acadêmica etc.

Dentre as razões para a realização do estudo, pode-se citar a necessidade de conhecer melhor os aspectos e os impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida da reciclagem

mecânica de garrafas PET pós-consumo e disponibilizar dados adequados à realidade brasileira, associados ao ciclo de vida dos dois processos de reciclagem (B2B e B2F).

O público-alvo deste estudo são principalmente empresas e entidades envolvidas na cadeia de produção, consumo e reciclagem de PET, bem como usuários da ferramenta ACV que utilizem em seus estudos os recursos abordados no escopo deste trabalho.

#### **4.1.2 Escopo do estudo**

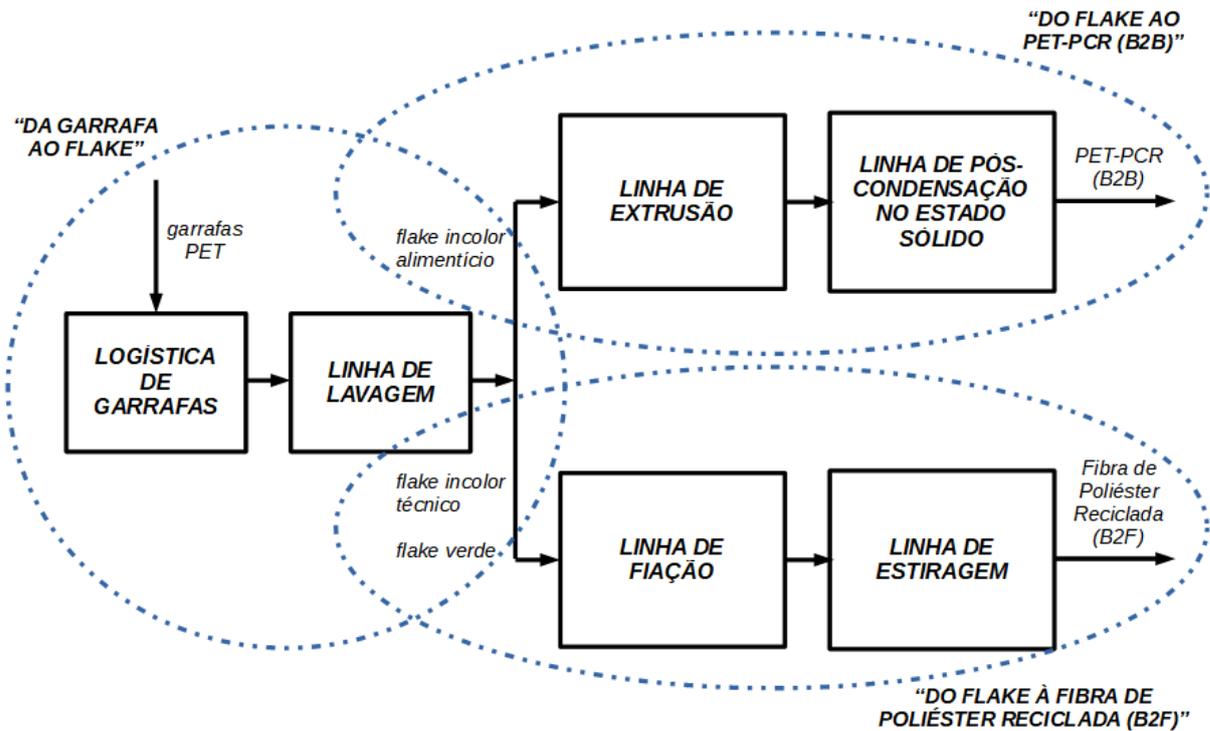
De acordo com as normas de referência, é importante que o escopo seja bem definido, explicitando determinados itens, de forma que objetivo declarado seja atendido.

##### **4.1.2.1 Sistemas de produto**

A abrangência desta ACV é “do berço ao portão”. Compreende a etapa de transporte da matéria-prima, na forma de fardos de garrafas PET pós-consumo prensadas, desde os pontos de concentração e adensamento desse tipo de material (tipicamente comerciantes de recicláveis) até o seu recebimento pela Recicladora, seguido das etapas de conversão na indústria recicladora: 1) segregação, limpeza e trituração das garrafas até a forma de *flakes*; 2) transformação dos *flakes* em resina PET-PCR (processo B2B) e 3) transformação dos *flakes* em Fibra de Poliéster Reciclado (processo B2F); até a disponibilização do produto acabado para venda, no portão da fábrica.

Para melhor análise e facilitando futuras consultas, revisões e comparações, este estudo modela o processo de produção com o agrupamento em três blocos, de forma que os resultados de cada um possam ser avaliados com uma certa independência, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Sistemas de produto modelados pelo agrupamento de etapas do processo. Embora os produtos reciclados finais sejam apenas o B2B e o B2F, tratar o sistema de produto “da garrafa ao *flake*” traz ganhos para os cálculos e para análises e comparações



Fonte: Autor.

As características gerais de cada sistema de produto são descritas a seguir.

- Da garrafa ao *flake*: para o sistema de produto de produção de *flake*, englobam-se as etapas de Logística de Aquisição de Garrafas e a Linha de Lavagem. O fluxo de entrada principal são os fardos de garrafa PET prensadas. O fluxo de saída principal desse sistema é o *flake*, que pode ser tipificado em três produtos distintos, em função do destino de sua aplicação: para o B2B, *flake* incolor alimentício; e para aplicação B2F, *flake* incolor técnico e *flake* verde. O grande diferenciador entre esses tipos é a composição da matéria-prima (diferentes classes de garrafa, que são o fluxo de entrada principal), de forma a resultar em *flakes* distintos em cor e origem. Com relação à produtividade e ao consumo de insumos materiais e energéticos, não se percebem diferenças significativas entre esses tipos de *flakes*. Pelo potencial identificado de exploração de melhorias, resultante de características bastante marcantes e diferenciadas, as duas etapas constituintes mereceram uma tratativa especial na análise de inventário e avaliação de impacto

ambiental. A etapa de logística tem como fluxo de entrada de energia o diesel (e sua cadeia de produção) consumido pelos caminhões, e como fluxo de saída as emissões associadas ao seu consumo (e produção). Já a etapa da descontaminação da garrafa e produção do *flake* vai ter fluxo de entrada de energéticos contendo eletricidade e gás natural, para alimentação do processo de produção, e combustíveis como diesel e GLP para máquinas de movimentação de materiais, além de fluxo de entrada de materiais como água e produtos químicos. Como fluxos de saída de maior destaque, tem-se os subprodutos originados da contaminação da matéria-prima principal (fardos de garrafa) e do tratamento de efluentes, além das emissões oriundas do consumo dos combustíveis e sua produção, e daquelas associadas à geração de eletricidade.

- Do *flake* ao PET-PCR (B2B): para o sistema de produto de resina PET-PCR, processo B2B, englobam-se as etapas de Linha de Extrusão e Linha de Pós-condensação no Estado Sólido. O fluxo de saída principal desse sistema é o PET-PCR Grau Alimentício, e por isso demanda como fluxo de entrada principal o *flake* incolor alimentício. Outros fluxos de entrada de importância são a eletricidade, o gás natural, o nitrogênio líquido e a água. Fluxos de saída de destaque são as emissões da combustão do gás natural e os resíduos sólidos (refugo da Extrusão), além das associadas à produção dos insumos, geração de eletricidade etc.
- Do *flake* à Fibra de Poliéster Reciclada (B2F): para o sistema de produto de Fibra de Poliéster Reciclada, processo B2F, englobam-se as etapas de Linha de Fiação e Linha de Estiragem. O fluxo de saída principal desse sistema é a Fibra de Poliéster Reciclada, que em função de requisitos do produto final pode demandar como fluxo de entrada principal o *flake* incolor técnico, o *flake* verde ou a combinação de ambos. Como fluxos de entrada de relevância, destaca-se também a eletricidade e o gás natural, e como fluxos de saída de importância os resíduos sólidos, além das emissões associadas à transformação da energia.

#### 4.1.2.2 Função do produto, unidade funcional e fluxos de referência

As finalidades dos produtos reciclados, que são os fluxos de saída principais deste estudo, são bem definidas e consolidadas no mercado, delineando adequadamente a função do

sistema de produto: destinação da matéria-prima (recuperada do descarte pós-consumo) ao produto reciclado (e substituição de material virgem por material reciclado).

Tanto a resina PET-PCR quanto a Fibra de Poliéster Reciclado são produtos intermediários, isto é, são utilizados por outras indústrias como matéria-prima. A função a ser analisada é a disponibilização (produção) de determinada massa de PET-PCR para atender a indústria de embalagens ou de determinada massa de Fibra de Poliéster Reciclada para atender a indústria têxtil. No caso de embalagens, a proposta é a substituição total ou parcial do PET virgem por PET-PCR. No caso de artigos têxteis, a proposta é a substituição total ou parcial da Fibra de Poliéster virgem por Fibra de Poliéster Reciclada.

Para exemplificar algumas características de desempenho, e dar uma ordem de grandeza prática sobre a aplicação dos produtos avaliados: a) uma garrafa PET de refrigerante de 2 litros pesa em torno de 50 g; se fabricadas com 100% de PET-PCR, 1 t de PET-PCR transforma-se em 20.000 garrafas de 2 litros; b) uma camiseta de adulto pesa em torno de 200 g; se feita com fibra de poliéster reciclado, costuma conter 50% desse material e, portanto, 1 t de Fibra de Poliéster Reciclada seria incorporada em 10.000 camisetas.

Pressupõe-se que a qualidade dos produtos reciclados seja equiparável aos virgens e/ou seja tal que atenda às necessidades da indústria, de forma que seu emprego parcial ou total não o seja por limitação imposta por suas características típicas, senão por motivos de otimização do processo ou produto, da oferta de material e/ou por questões estratégicas do negócio. Pode-se exemplificar com as seguintes situações hipotéticas:

- Dada a escala de produção e para uma constância com relação à cor de determinada embalagem, opta-se por usar uma mistura de 20% de PET-PCR e 80% de PET virgem;
- Dado o requisito de qualidade de um tecido, otimiza-se seu processo de fabricação pelo uso de 40% de Fibra de Poliéster Reciclada, 30% de Fibra de Poliéster Virgem e 30% de Algodão;
- Dada a disponibilidade limitada de PET-PCR no mercado, opta-se por adotar uma porcentagem desse insumo em todas as garrafas produzidas, em vez de usá-lo na totalidade para apenas alguns lotes ou tipos de garrafas.

Assim, considera-se substituição de 1 t de PET virgem por 1 t de PET-PCR e 1 t de Fibra de Poliéster virgem por 1 t de Fibra de Poliéster Reciclada. Este trabalho não pretende comparar a substituição de outras matérias-primas pelo PET reciclado, mas sim averiguar os

impactos do uso do PET reciclado em substituição do PET virgem que, por diversas outras razões, já tenha sido definido como solução para determinada aplicação técnica e mercadológica.

A unidade funcional é definida como 1 t de Resina PET-PCR ou 1 t de Fibra de Poliéster Reciclada. O fluxo de referência estabelecido é igual à própria unidade funcional, ou seja, a produção de 1 t de Resina PET-PCR ou 1 t de Fibra de Poliéster Reciclada.

Observação: devido à característica própria deste estudo e de acordo com a metodologia proposta, será adotada unidade funcional específica para o sistema de produto de produção de *flake*, equivalente a 1 tonelada de *flake* e, a seu tempo, também apresentados resultados baseados em 1 tonelada de fardos de garrafa PET prensadas para o inventário e avaliação de impacto ambiental da logística de garrafas.

#### 4.1.2.3 Fronteira do sistema

A abrangência desse estudo é “do berço ao portão”.

Como critérios de corte, foram consideradas a massa dos insumos consumidos e efluentes, emissões atmosféricas e resíduos gerados, as entradas de energia e a significância ambiental dos mesmos. Assim, compõem os fluxos de entrada do sistema de produto: fardos de garrafas PET pós-consumo prensadas, água, nitrogênio, produção e distribuição de energia elétrica e gás natural, diesel e GLP; e os fluxos de saída: resina PET-PCR, Fibra de Poliéster Reciclado, emissões atmosféricas e resíduos sólidos.

Os demais insumos utilizados na unidade industrial, embora disponíveis e quantificados no banco de dados original de estudo, tem massa desprezível diante dos já citados como relevantes. Para certificar que mesmo alguns dos insumos importados não teriam impacto com relação à logística de abastecimento, foi feita a avaliação de impacto ambiental de seu transporte (consumo de energia e emissões) e confirmou-se sua irrelevância para a avaliação geral do sistema de produto relacionado – detalhes na seção 4.1.2.7 – “Pressupostos”.

Devido ao sistema de tratamento de efluentes e reciclagem de água, o impacto referente ao descarte das purgas da Torre de Resfriamento ou do transbordo (excedente) das caixas de armazenagem de água reciclada não foi contabilizado.

Os resíduos sólidos foram considerados no inventário por sua relevância em termos de massa (subprodutos e refugos da produção e lodo gerado no tratamento de efluentes), mas seu impacto não foi contabilizado, uma vez que estes têm como alternativas de destinação o aterro industrial, o coprocessamento, a compostagem ou a reciclagem em unidades apropriadas e que buscam sua valorização econômica.

Os bens de capital e pessoais não são considerados neste estudo.

A abrangência geográfica para este estudo define-se pelo mercado brasileiro de fornecimento de materiais recicláveis e demandante de produtos reciclados, sendo a indústria de transformação avaliada, mais especificamente, uma planta de reciclagem de PET localizada no Sul do Estado de Minas Gerais, na divisa com o Estado de São Paulo, e estendendo-se pelo raio de abastecimento necessário para seu suprimento. O porte desta Recicladora é significativo para a realidade brasileira.

Caracterizando tecnologicamente o sistema, a indústria analisada detinha o estado da arte com relação à tecnologia de transformação de garrafas em *flakes* (Linha de Lavagem) e de *flakes* em grãos (Linha de Extrusão). Os demais processos, embora não necessariamente atualizados com relação a eficiência energética de versões mais modernas, apresentavam características de robustez que refletiam na reputada qualidade do produto final, como por exemplo o processo de Pós-condensação no Estado Sólido, originalmente concebido para processamento de resina virgem. Com relação às instalações de utilidades, vale destacar a gestão de boa eficiência de combustão do gás natural nos processos de aquecimento e a estação de tratamento de efluentes associada à reciclagem de água, e por isso com grande eficiência de remoção de carga orgânica e com baixo descarte de efluente tratado.

#### 4.1.2.4 Procedimentos de alocação

Não se verifica multifuncionalidade neste estudo, uma vez que os sistemas de produto procuraram caracterizar individualmente as distintas rotas tecnológicas. Dentro da referida etapa de processo, os métodos de alocação definidos para este trabalho refletem a abordagem de custeio da empresa avaliada, baseados em valores econômicos, como por exemplo na aplicação aos subprodutos da produção de *flakes*, que correspondem a uma fração mássica não desprezível no balanço de massa da Recicladora, mas que tem preços médios de venda muito inferiores ao produto final e mesmo à matéria-prima adquirida.

#### 4.1.2.5 Categorias de impacto selecionadas, metodologia de avaliação e interpretação

Para seleção das categorias de impacto ambiental que seriam pertinentes ao estudo, com objetivo de posterior comparação, baseou-se em pesquisa bibliográfica que avaliou trabalhos semelhantes ou afeitos ao tema, realizados em outras regiões e épocas, como citado no tópico 2.9 – “Seleção para o estudo: *software* de ACV, categorias de impacto ambiental e métodos de avaliação de impacto ambiental”.

Reapresenta-se a Tabela 7, com as categorias de impacto ambiental selecionadas, os métodos empregados e as unidades de medida.

Tabela 7 – Categorias de Impacto Ambiental e métodos de avaliação selecionados

<b>Categoria de Impacto Ambiental</b>	<b>Método</b>	<b>Unidade</b>
Potencial de Aquecimento Global	CML	kgCO <sub>2</sub> eq
Acidificação Terrestre	ReCiPe	kgSO <sub>2</sub> eq
Depleção de Recursos Abióticos – elementos	CML	kgSbeq
Depleção de Recursos Abióticos – fósseis	CML	MJ
Escassez Hídrica	AWARE	m <sup>3</sup> eqmundial
Depleção da Camada de Ozônio	CML	kgR11eq
Ecotoxicidade de água doce	USEtox	CTU <sub>e</sub>
Toxicidade humana – câncer	USEtox	CTU <sub>h</sub>
Toxicidade humana – não-câncer	USEtox	CTU <sub>h</sub>

Fonte: Autor.

A interpretação focou na comparação dos resultados com outros estudos e na identificação de *hotspots* ambientais, para exploração de oportunidades de melhoria.

#### 4.1.2.6 Requisitos de qualidade de dados

Atendendo à preocupação com relação à precisão, representatividade dos dados, consistência, reprodutibilidade, descreve-se as orientações básicas sobre os dados utilizados no estudo.

Os dados primários foram obtidos do banco de dados da Recicladora, o qual representa os valores medidos e/ou apontados para gestão de produção, de qualidade e de custos da Recicladora. Havia disponibilidade de dados de produção desde o final de 2013 até o final de 2017. Procurou-se trabalhar com, pelo menos, um ano de dados disponíveis, para que fossem minimizadas as possíveis influências de diferentes condições operacionais. A importância de

se usar um ciclo anual completo também se justifica para contemplar possíveis variações sazonais na oferta de matéria-prima ou demanda de produto reciclado. No entanto, no período inicial das atividades da facilidade estudada, além de ajustes e estabilização do processo produtivo recém-lançado, ainda não havia se firmado a produção da resina PET-PCR grau alimentício, que carecia de aprovações regulamentares da Anvisa. E, para o último ano de informações disponíveis, ocorreram significativas variações e interrupções na escala de produção, em virtude de fatores comerciais e administrativos alheios às operações de transformação. Portanto, o ano de 2016 foi o mais representativo em termos de estabilidade e ocupação da Recicladora. Esses dados são uma representação fiel das condições de operação de uma unidade de reciclagem, obtidos a partir da consulta de registros de produtividade, consumos de matéria-prima, materiais e energia, perdas de processo, características da cadeia de suprimento, emissões, indicadores de qualidade e ambientais etc. Para situações em que os fluxos primários de entrada ou saída requereram, foi realizado cálculo direto mediante conversão de dados e balanços de massa e energia.

Os dados secundários de geração de calor e energia e transporte foram levantados a partir da revisão da literatura pertinente e da utilização de banco de dados disponíveis no *software* GaBi e no GHG Protocol. Pela pertinência ao estudo, tem destaque a utilização de dados do sistema de produção de energia elétrica, de gás natural e de diesel, todos da matriz energética brasileira. Alguns sistemas são de aplicação global, como por exemplo os modelos de transporte. Contudo, deve-se ressaltar a existência de alguns dados secundários, referentes a certos insumos consumidos, para os quais não foram encontradas informações no contexto nacional, e para os quais utilizaram-se dados da Alemanha (cadeia produtiva do nitrogênio líquido) e da Comunidade Europeia (cadeia produtiva do GLP).

Todos os dados inventariados foram correlacionados com a respectiva unidade funcional definida.

#### 4.1.2.7 Pressupostos

Para realização da ACV, algumas considerações tiveram que ser feitas para a modelagem adequada dos fluxos de entrada e saída, ou mesmo para suprir dados indisponíveis. O embasamento para esses pressupostos é detalhado, de forma a garantir a maior confiabilidade possível ao estudo.

#### **Logística de abastecimento de garrafas**

A estimativa apropriada de consumo de combustível e a consequente emissão dos veículos é fundamental para o estudo. Para esse fim, valeu-se do modelo de transporte apresentado pelo *software* GaBi, que requer alguns parâmetros customizáveis e que foram analisados a partir de entrevistas com o pessoal envolvido e tendo uma planilha de dados de descarregamento de cargas referente a um período mais atual (2019). As entrevistas com o pessoal e algumas comparações com registros de alguns anos permitem dizer que a característica típica da logística de abastecimento de garrafas manteve-se a mesma (distâncias percorridas, carregamento e tipo de veículos), com a diferença que atualmente os dados de cada chegada são compilados com a informação da cidade de origem da carga.

Para esses cálculos, é importante ter o tipo de veículo utilizado, a carga média transportada, a distância percorrida e o combustível utilizado, dentre outros.

O modelo considera o tamanho do caminhão, a categoria de emissão (1980s, Euro 1, Euro 2 etc.) e a categoria das estradas (autoestrada, rural, urbana). De acordo com thinkstep (2019), o cálculo de emissões baseia-se em fatores de emissão (para cargas cheia e vazia, e nas diferentes categorias de estrada – autoestrada, rural e urbana), na capacidade de carga e na porcentagem de utilização. As emissões do modelo são: amônia, benzeno, dióxido de carbono, dióxido de carbono (biótico), monóxido de carbono, particulados (PM 2,5), metano, dióxido de nitrogênio, monóxido de nitrogênio, óxido nitroso, COVNM (Compostos Orgânicos Voláteis Não-Metano) e dióxido de enxofre. O cálculo de CO<sub>2</sub> é baseado em 3,18 kg CO<sub>2</sub>/kg diesel, e o diesel a uma densidade média de 0,83 kg/l, resultando em 2,64 kg CO<sub>2</sub>/l diesel. O cálculo do SO<sub>2</sub> depende do teor de enxofre do diesel.

### *Seleção do tipo de caminhão a ser modelado*

Através de entrevistas com pessoal envolvido, observações de campo e avaliação de registros de pesagem em balança rodoviária da empresa, chegou-se ao modelo de veículo que representa o modo típico de logística vigente.

O caminhão “típico” utilizado no transporte é do tipo *truck*, que pesa entre 7 e 8 t (vazio), e é antigo – fabricação anterior a 1992. Como referência, é o tipo de veículo que, se fosse transportar resina PET, transportaria 13 t de produto. Portanto, tem pelo menos 20 a 21 t de peso bruto.

### *Modelagem do caminhão, distância, carga e combustível*

Para a modelagem com a base de dados do *software* GaBi, considerou-se como veículo que representa o transporte médio atual: **truck, average 1980s (pre-Euro, antes de 1992), 20 a 26 t de peso bruto: GLO: Truck, diesel driven, 1980s, 20-26t gross weight/17,3 payload capacity.**

Para estimar o impacto da logística de abastecimento de garrafas, fez-se um levantamento a partir de banco de dados de recebimento da Recicladora que continha dados entre final de fevereiro e final de novembro de 2019. A distância média de origem dos fardos de garrafa PET foi de 750 km, e a carga média foi de 8.406 kg.

O diesel disponível no GaBi para o Brasil é o **BR: Diesel Mix at refinery**, contendo 500 ppm de enxofre e 6,19% em massa de biodiesel.

### *Utilização da capacidade de carga do caminhão e simulação de frete-retorno*

No modelo do GaBi, o parâmetro “utilização” ficou como 0,49 (carga média de 8,406 t dividido pela capacidade do caminhão de 17,3 t) considerando o trecho da viagem com o caminhão carregado de garrafas PET. Este parâmetro reflete o impacto do não uso da capacidade total de transporte do veículo, principalmente em função da densidade da carga. Para simulação de trecho da viagem do caminhão ser vazia (isto é, ir buscar vazio ou retornar ao destino vazio), o modelo recomenda a manutenção da distância percorrida e a divisão da utilização pela metade (no caso, utilizou-se 0,24).

É possível fazer algumas considerações para melhor estimar o frete-retorno a ser utilizado no modelo:

- Para distâncias muito longas ( $> 600$  km), pode-se afirmar que só se justifica economicamente o transporte deste tipo de carga se for na modalidade frete-retorno.
- Para distâncias pequenas ( $< 150$  km), a situação de frete-retorno é mais rara pela dificuldade da oportunidade de carregamentos na região da Recicladora.
- Para as distâncias intermediárias (entre 150 e 600 km), a opção preferencial pelo tipo de frete não é evidente, mas como não se trata de carga perecível e que careça de cuidados extremos com relação ao espaço de estocagem tanto na origem quanto no destino (isto é, praticamente não existe pressão de tempo para saída do fornecedor ou chegada no comprador), para maior ganho econômico espera-se que haja prevalência da modalidade frete-retorno.
- É comum os caminhoneiros que fizeram frete-retorno para trazer a carga até a Recicladora reclamarem da falta de cargas na região para voltarem à sua origem, citando que costumam se deslocar até a região de Jundiaí-SP (190 km) ou Pouso Alegre-MG (120 km) para conseguirem nova carga.

Avaliando o banco de dados entre final de fevereiro e final de novembro de 2019, observa-se que 17% da carga chegou de distância menor que 150 km, 45% entre 150 e 600 km e 37% de distância superior a 600 km. Considerando que toda a carga vinda de distância curta mais metade da carga vinda de distância intermediária não têm frete-retorno, definiu-se que 40% das viagens não tenham a modalidade de frete-retorno. Com este percentual, imagina-se que o impacto ambiental ainda esteja sendo valorado de forma conservadora (isto é, o impacto ambiental tende a ser maior), pela incerteza da ocorrência ou não de frete-retorno na maior parcela da carga (de 45%, entre 150 e 600 km), pela distância desde o descarte pós-consumo que o material foi deslocado até o centro de concentração de recicláveis, para prensagem e carregamento, e pela distância que o caminhão teve que rodar vazio até estar novamente carregado. Para o modelo, portanto, será usado 0,39 como parâmetro de utilização, resultado da ponderação entre os cenários extremos.

#### ***Tipos de via: urbana, rural ou autoestrada***

Apresentam-se aqui, considerações para a participação de transporte por autoestradas, vias rurais e vias urbanas. Para a situação da logística da garrafa PET, desde o ponto de carregamento até a Recicladora, pode-se considerar:

- O acesso à Recicladora não é uma via urbana. Considerando que no ponto de carregamento possa-se transitar por áreas equivalentes à urbana (periferias das cidades de origem), a cada viagem estima-se que a distância urbana percorrida deva ser da ordem de 20 km.
- Considerando que algumas rodovias cortam cidades ao longo de seu trajeto e devem ser consideradas como vias urbanas nesses trechos (pela limitação de velocidade e trânsito mais intenso), para a viagem média de 750 km estima-se uma distância em torno de 50 km (10 cidades, com 5 km de trecho urbano cada).
  - Portanto, estima-se 70 km de vias urbanas (20 km + 50 km), para cada viagem média.
- Considerando como rurais as vias de menor velocidade no acesso à Recicladora, e que o mesmo vale para que se atinja a maior parte dos pontos de carregamento, as regiões próximas à origem e chegada devem corresponder a no máximo 40 km do trajeto.
- As principais rodovias utilizadas nas rotas de abastecimento não são as autoestradas de melhor qualidade do país. Portanto, parece fazer sentido considerar uma parte dos trechos de rodovias como sendo rurais, para refletir melhor o consumo e emissão de poluentes do caminhão. Para a viagem média de 750 km, estima-se em torno de 20% nestas condições – isto é, 150 km.
  - Portanto, estima-se 190 km de vias rurais (40 km + 150 km).

Dessa forma, usando as considerações acima, modela-se a distribuição de tipos de via com 66% autoestrada, 25% rural e 9% urbana.

### **Logística de abastecimento dos demais recursos materiais**

Com relação à logística de abastecimento, somente o transporte dos fardos de garrafa até a Recicladora foi mantido na ACV, pela pertinência ao tema estudado e pela relevância em termos de impacto ambiental (grandes distâncias e carga volumosa e leve).

Os transportes dos demais recursos materiais passaram pela seguinte análise: são mais típicos em termos de densidade da carga e utilizam transportadoras mais convencionais, resultando em frota de caminhões mais nova e uniforme, além de melhor utilização do conceito de frete-retorno. Como critério de avaliação/corte para comparação de modais e distâncias, foi utilizado o Potencial de Aquecimento Global (PAG), que além de ser um

método de avaliação de impacto ambiental global, tem sido o mais utilizado nos estudos de ACV de PET.

Considerando a distância máxima percorrida por um insumo, selecionou-se o meio filtrante terra diatomácea, com consumo de 6,9 kg/t de *flake* B2B, que é um produto importado da Europa, e teria uma distância de deslocamento marítimo (10.000 km) e, posteriormente, rodoviário desde o Porto de Santos até Poços de Caldas (350 km). Modelando com o *software* GaBi, verifica-se que o uso de um navio de contêineres com carregamento típico, abastecido com óleo pesado alemão e viajando 10.000 km, resulta num impacto de 0,975 kg de CO<sub>2</sub>eq. para o transporte de 6,9 kg. O uso de um caminhão Euro 2 (da ordem de 20 anos de vida), rodando 350 km (75% rodovia e 25% urbano) com diesel brasileiro resulta num impacto de 0,202 kg de CO<sub>2</sub>eq. para o transporte de 6,9 kg.

Os demais materiais consumidos (soda cáustica, detergente, ácidos etc.) totalizam menos de 40 kg/t de *flake*, e são de fornecimento nacional. A estimativa de 300 km de transporte rodoviário para estes itens é conservadora. O uso de um caminhão Euro 2 (da ordem de 20 anos de vida), rodando 300 km (75% rodovia e 25% urbano) com diesel brasileiro resulta num impacto de 1,007 kg de CO<sub>2</sub>eq. para o transporte de 40 kg.

O PAG do modelo do transporte de fardos de garrafa é de 95 kg de CO<sub>2</sub>eq. por tonelada de fardos de garrafas, e ainda há a eficiência de transformação da garrafa em *flake*, da ordem de 75%, que resulta numa contribuição ao PAG ainda maior para produção de 1 t de *flake*. Assim, pode-se afirmar que a contribuição ao PAG do transporte dos demais insumos vai ser menor que 2% daquele relacionado à matéria-prima principal, não justificando que seja incluído na modelagem final.

Essa análise também se somou ao critério de corte em massa e energia e corroborou para considerar-se como desprezível o impacto da distribuição do diesel consumido pelos caminhões e pela minicarregadeira, bem como do GLP consumido pelas empilhadeiras.

### **Processos de suprimento da matriz energética**

Selecionou-se na base de dados do *software* GaBi os seguintes processos:

- Energia elétrica - processo **BR: Electricity grid mix**, tendo como componentes principais 63,3% de hidroeletricidade, 13,7% à base de gás natural, 7,7% a partir de biomassa, 6,0% a partir de óleo pesado, e o complemento constituído de fontes nuclear, eólica, carvão mineral etc.

- Combustão do gás natural - processo **BR: Thermal energy from natural gas**, tendo como componentes principais 57,0% de produção nacional, 29,6% de gás boliviano e o complemento constituído de gás natural liquefeito, importado de outros países.

### **Emissões para o ar resultantes da combustão em caldeira, aquecedor de fluido térmico, empilhadeiras e minicarregadeira**

As fontes de combustão a gás natural possuem o potencial de emitir óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), compostos orgânicos voláteis (COV), traços de dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e material particulado (MP). A emissão de maior destaque é a de  $\text{NO}_x$ . Tanto a caldeira quanto o Aquecedor de Fluido Térmico da Recicladora utilizam a tecnologia de queimador de baixo  $\text{NO}_x$ , a qual realiza o processo de combustão em etapas, atrasando parcialmente o processo de combustão e resultando em uma chama mais fria, o que suprime a formação do  $\text{NO}_x$  térmico.

Com relação às emissões de gases de efeito estufa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ), pode-se afirmar que em caldeiras devidamente ajustadas aproximadamente todo o carbono combustível do gás natural (99,9%) é transformado em  $\text{CO}_2$  no processo de combustão. O carbono combustível que não se converte em  $\text{CO}_2$  resulta nas emissões de  $\text{CH}_4$ , CO e COV, devido à combustão incompleta.

Para apuração de emissões para o ar provenientes da combustão do gás natural, utilizaram-se os fatores de emissão do GHG Protocol (para  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ), do Anexo II do GUIA DE MELHOR TECNOLOGIA PRÁTICA DISPONÍVEL - FONTES DE COMBUSTÃO, da CETESB (para  $\text{NO}_x$ , MP e  $\text{SO}_x$ ) e do AP 42, do EPA (para CO e COV).

Os outros insumos energéticos, utilizados em equipamentos de movimentação de material, têm pequena participação na energia total consumida nos sistemas de produto avaliados. São eles o gás liquefeito de petróleo (GLP), consumido em empilhadeiras para movimentações diversas, e o diesel, consumido por uma minicarregadeira que faz a alimentação da linha com fardos de garrafa. Para calcular as emissões de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , foram usados os fatores de emissão do GHG Protocol.

### **Operação dos sistemas de combustão – caldeira e aquecedor de fluido térmico**

Tanto no sistema de geração de vapor (caldeira) quanto no sistema de aquecimento de fluido térmico (aquecedor), havia a preocupação com relação à eficiência energética. Além de manutenções preventivas e calibração das malhas de controle (instrumentação), monitorava-se periodicamente os gases de combustão, a cada turno de operação, através de analisadores portáteis de O<sub>2</sub> e CO, buscando trabalhar com a quantidade de ar adequada para a queima mais completa possível, cuidando para que o ar não estivesse em excesso ou em falta. Procurava-se trabalhar na faixa de 2 a 5% de O<sub>2</sub>.

### **Consumo de água, tratamento do efluente e geração de lodo**

A necessidade de água é imperiosa para o processo de lavagem. A quantidade a ser consumida foi uma preocupação desde a etapa do projeto da Recicladora, principalmente pela limitação de oferta de água na região. A busca pela eficiência no consumo desse bem foi um dos requisitos para seleção da tecnologia, que resultou num projeto que tem circuitos de filtração e reaproveitamento em diversas etapas, de forma a minimizar a quantidade de água limpa reposta no sistema. A água descartada pelos circuitos de filtração, contaminada com os insumos de lavagem e os resíduos do material processado, constitui o efluente da Linha de Lavagem, com vazão em torno de 8 m<sup>3</sup>/h e com DQO da ordem de 20 g/l.

O efluente tem seu pH corrigido e passa por um processo de filtração através de membranas geotêxteis, com objetivo de retenção de sólidos do tipo terra, areia e resíduos de plástico moído arrastados pelo efluente, de forma que os mesmos não atinjam o sistema de tratamento de efluentes biológico e venham a promover o assoreamento do mesmo, com o passar do tempo. Esse lodo coletado nas membranas geotêxteis é periodicamente destinado a aterros sanitários ou a coprocessamento em fornos de cimenteira, a uma taxa de 70 kg/t de *flake*, com teor de sólidos da ordem de 85%. Em ambas opções, é desembolsado pela empresa um valor por tonelada destinada e, por isso, a seleção da destinação é uma função do desembolso previsto a cada situação, resultante dos valores cobrados pelo tratamento de destino e pelo transporte do mesmo. Tipicamente, tanto o aterro industrial quanto a destinação para coprocessamento tinham como destino a região de Belo Horizonte, a 500 km da Recicladora.

O efluente líquido resultante da filtração na membrana geotêxtil é direcionado para a estação de tratamento biológico, com demanda química de oxigênio (DQO) média de

9.840 ppm. A carga orgânica oriunda da Recicladora corresponde a aproximadamente 70% da alimentação da ETE. Assim, resulta uma taxa de destinação de lodo biológico da ordem de 63 kg/t de *flake*, com teor de sólidos da ordem de 60%.

### **Resíduos sólidos**

Direta e indiretamente, a etapa maior geradora de resíduos sólidos é a Linha de Lavagem. Os contaminantes dos fardos, como material de amarração e suportaço (arames, fitilhos, papelão, rafia etc.), materiais indevidos contidos no material comprado no mercado, como outros plásticos (PE, PP, PVC, PS etc.) e metais (alumínio, aço etc.), são segregados ao longo do processo de beneficiamento. Pó de PET e *flakes* de PET contendo contaminantes diminutos como madeira, borracha e outros materiais, também são rejeitos sólidos do processamento nessa etapa.

Outros contaminantes, como o conteúdo residual das garrafas (refrigerante, óleo, produtos de limpeza etc.), areia, terra etc., são incorporados ao efluente, e retidos como sólidos no tratamento físico-químico, ou constituindo majoritariamente a carga orgânica que é tratada no reator biológico aeróbico com lodos ativados, donde resulta em descarte de lodo biológico.

Com relação aos insumos materiais consumidos diretamente na Linha de Lavagem, dá-se especial destaque ao meio filtrante utilizado num dos circuitos internos de reaproveitamento de água, principalmente pelo motivo do mesmo, após uso e descarte, ter destinação para aterro sanitário ou coprocessamento em fornos de cimento, a uma taxa média de 7 kg/t de *flake*.

Os demais fluxos secundários, constituídos por papelão, metais e plásticos, ainda que já moídos ou na forma de pó, têm destinação a outras rotas de reciclagem, sendo tratados como subprodutos do processo, por serem materiais de valor comercial – ainda que irrisórios, se comparados ao valor de aquisição do fardo de garrafa PET prensada. Ou seja, são materiais inseridos em outros fluxos de reciclagem de sucatas.

Nenhum dos insumos consumidos tem aspecto que justifique maior preocupação com relação a sua origem e destinação de forma específica, visto que todos resultam em algum dos tipos de lodo ou de subproduto, devidamente gerenciados no tocante a manuseio e destinação. Excluindo a matéria-prima principal, a massa equivalente dos demais insumos corresponde a um consumo médio menor que 50 kg/t de *flake*.

As demais etapas contidas nos sistemas de produto contribuem principalmente, em volume, com refugo de material, oriundo de processos de filtração de polímero, material de lançamento, parada e transição de lotes de produção.

#### 4.1.2.8 Limitações

Ao se fazer comparações com outros estudos, ou mesmo na sua reprodução futura, algumas limitações ou restrições devem ter atenção especial, e são aqui destacadas ou reforçadas.

A utilização de cadeias produtivas do nitrogênio líquido e do GLP a partir de bases de dados não brasileiras são pouco significativas para o resultado final, mas dentro do possível são passíveis de revisão para melhor adequação do modelo usado.

As matrizes elétrica e de gás natural podem ser ajustadas a condições mais específicas, e variam com o tempo e de forma regional. Portanto, podem ser uma fonte de variação não desprezível.

Com relação ao tipo de caminhão empregado no transporte da matéria-prima principal, e as considerações sobre suas rotas, foi assumida uma condição média, que também pode ter grande dispersão, além de, logicamente, poder ser utilizado um outro modal logístico.

As características da Recicladora avaliada (tecnologia de transformação, tratamento de efluentes, processos de gestão, localização, incentivo fiscal etc.) também resultam numa condição própria que acaba por influenciar nos resultados do estudo.

#### 4.1.2.9 Tipo de análise crítica

Não se mostrou necessária, pois não tem objetivo de elaborar afirmações comparativas entre produtos que sejam divulgadas ao público.

#### 4.1.2.10 Tipo e formato do relatório requerido para o estudo

A dissertação de mestrado que é fruto desse estudo de ACV é o formato selecionado para seu registro, por atender os requisitos de fidelidade, imparcialidade e exatidão.

## 4.2 ANÁLISE DE INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

Os dados coletados no banco de dados da Recicladora, literatura disponível e banco de dados de ACV passaram por procedimentos de cálculo e quantificação dos fluxos de entrada e saída, de materiais e energia.

Os inventários foram estruturados por etapa de processo, quantificando as entradas e saídas relevantes, e são apresentados na forma de tabelas, contendo:

- Fluxos de entrada: agrupados em consumo de recursos materiais e energéticos, renováveis e não-renováveis
- Fluxos de saída: agrupados em saída principal (produtos intermediários ou final), emissões ao ar, à água (efluentes líquidos) e ao solo (resíduos sólidos).

As etapas inventariadas são: 1) Transporte de garrafas PET pós-consumo (dos comerciantes de recicláveis ao pátio de armazenagem da Recicladora), 2) Linha de Lavagem, 3) Linha de Extrusão, 4) Linha de Pós-condensação no Estado Sólido, 5) Linha de Fiação e 6) Linha de Estiragem.

Com a justificativa de que a informação dos dados primários dos processos de reciclagem de PET é uma das grandes contribuições dessa ACV, não foram incorporadas nas Tabelas 8 a 13 os dados de inventário das cadeias produtivas dos recursos considerados, isto é, usou-se uma abrangência “do portão ao portão”. Exemplificando, as tabelas apresentam o consumo de gás natural, de eletricidade e de diesel dentro dos limites da Recicladora, mas não os recursos despendidos na produção e disponibilização do gás natural e da eletricidade que alimentam a fábrica e do diesel consumido pelos caminhões da logística de matéria-prima principal.

Em seguida à apresentação dos inventários por etapa, é feito o agrupamento por sistema de produto, de forma que seja possível uma visualização geral dos principais fluxos de entrada para os processos B2B e B2F, também “do portão ao portão”. Opta-se por este tipo de abrangência na demonstração dos dados primários derivados, pois estes são os acessíveis à atuação mais direta, podendo resultar em otimizações alcançáveis. As cadeias de produção dos insumos são de mais difícil acesso para modificação.

De qualquer forma, para que a avaliação “do berço ao portão” não fique restrita somente à etapa posterior de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida, serão apresentadas análises com essa abrangência para os sistemas de produto “Da garrafa ao *flake*”, “Do *flake* ao

PET-PCR” (B2B) e “Do *flake* à Fibra de Poliéster Reciclada” (B2F), de forma a evidenciar o consumo de recursos, respeitando sua respectiva unidade funcional.

#### **4.2.1 Inventário do Ciclo de Vida, por etapa (abordagem “do portão ao portão”)**

Em todas as etapas do processo em que há consumo de eletricidade – Linhas de Lavagem, de Extrusão, de Pós-condensação no Estado Sólido, de Fiação e de Estiragem – esse consumo dá-se de maneira direta nos equipamentos que compõe o processo, e também de maneira indireta, através dos equipamentos e processos de utilidades que alimentam a referida linha, como geração de ar comprimido, sistemas de resfriamento, bombeamento e tratamento de água etc. O consumo total de eletricidade é apurado através de medições diretas no processo produtivo, adicionadas de alocação do consumo da eletricidade nos serviços compartilhados.

Os demais fluxos de entrada serão caracterizados nos tópicos referentes a cada etapa.

##### **4.2.1.1 Transporte de garrafas PET pós-consumo (dos comerciantes de recicláveis ao Pátio de Armazenagem da Recicladora)**

Considera-se como fluxo de saída principal o fardo de garrafas PET pós-consumo prensadas, que é descarregado no Pátio de Matérias-Primas da Recicladora. A unidade funcional é 1 t desse material.

O fluxo de entrada considera o diesel consumido pelos caminhões, calculado pela modelagem de distância e carga médias, além de outros fatores, como descrito no item 4.2.7 – “Pressupostos”. As emissões para o ar derivadas da combustão do diesel constituem os demais fluxos de saída, e também são resultado do modelo utilizado.

A Tabela 8 apresenta os resultados de inventário calculados para esta etapa.

Tabela 8 – Resultados da Análise de Inventário da Logística de Abastecimento de Garrafas

<b>Fluxos de Entrada</b>	<b>Unidade Funcional (un./t de garrafas)</b>	<b>un.</b>	<b>Obs.</b>
<b><u>Consumo de Energia</u></b>			
<b>Recurso Energético não-renovável</b>			
diesel, consumido pelos caminhões	28,0	kg	(1)
<hr/>			
<b>Fluxos de Saída</b>	<b>Unidade Funcional (un./t de garrafas)</b>	<b>un.</b>	<b>Obs.</b>
<b><u>Saída Principal</u></b>			
1 t de fardos de garrafas PET pós-consumo prensadas	1.000	kg	
<b><u>Emissões</u></b>			
<b>para o ar</b>			
proveniente do consumo do diesel pelos caminhões			
- amônia	0,000333	kg	(1)
- CO <sub>2</sub> fóssil	83,5	kg	(1)
- CO <sub>2</sub> biogênico	5,51	kg	(1)
- CO	0,174	kg	(1)
- NO <sub>2</sub>	0,0808	kg	(1)
- NO	1,07	kg	(1)
- óxido nitroso	0,000834	kg	(1)
- SO <sub>2</sub>	0,028	kg	(1)
- metano	0,00122	kg	(1)
- COVNM	0,000849	kg	(1)
- COVNM (não-especificados)	0,0496	kg	(1)
- particulados (PM 2,5)	0,0367	kg	(1)

Fonte: Autor.

Obs.: (1) Calculado, a partir da adaptação do modelo do GaBi

#### 4.2.1.2 Linha de Lavagem (produção de *flake* alimentício, para processo B2B, e *flakes* técnico e verde, para processo B2F)

Considera-se como fluxo de saída principal o *flake*, que é armazenado em big-bags para consumo posterior nos processos B2B ou B2F. Como fluxos de saída secundários, tem-se os subprodutos segregados ou gerados pelo processo de separação, moagem e lavagem,

armazenados em big-bags ou coletados em caçambas. Os dados que originaram as saídas provêm de pesagem, identificação e apontamento em ordens de produção. A unidade funcional para a etapa é 1 t de *flake*.

Os fluxos de entrada de recursos energéticos são compostos, principalmente, por eletricidade e gás natural, mas também consideram GLP e diesel, utilizados em equipamentos para movimentação de material.

O gás natural é consumido numa caldeira que produz vapor saturado para aquecimento da água de processo da Linha de Lavagem. O consumo de gás natural é apurado através de medidor, na alimentação da caldeira, e a fração de vapor consumida pela Linha de Lavagem é apurada por medição do vapor consumido.

Os outros insumos energéticos têm pequena participação na energia total consumida. O GLP é utilizado em empilhadeiras para movimentação de material, e seu consumo é apurado através de balanços mensais de consumo de cilindros de GLP. O diesel é consumido por uma minicarregadeira que faz a alimentação da linha com fardos de garrafa, e seu consumo é apurado pela medição no reabastecimento da máquina.

Com relação aos demais fluxos de saída, as emissões para o ar são derivadas da combustão do gás natural, do GLP e do diesel, e calculadas a partir dos consumos dos combustíveis, como descrito no item 4.1.2.7 – “Pressupostos”. As emissões para a água e para o solo são apuradas a partir de dados de monitoramento ambiental, como análises laboratoriais, medições de processo da estação de tratamento de efluentes e pesagem de resíduos sólidos para sua destinação. Vale ressaltar que a emissão para a água apontada nesse inventário corresponde exatamente às características de vazão e qualidade (demanda bioquímica de oxigênio e teor de sólidos suspensos) da saída de efluentes da Linha de Lavagem, sendo que os mesmos são direcionados para o tratamento biológico da Central de Utilidades, onde a sequência de processos resulta na retenção e descarte de lodo, no abatimento da carga orgânica e na água reciclada para uso na unidade industrial.

Os fluxos de entrada de recursos materiais são compostos pela matéria-prima principal, constituída por garrafas PET pós-consumo, por insumos utilizados diretamente no processo de lavagem, como água, detergente, soda cáustica, meio filtrante etc., e por insumos indiretos, usados no tratamento das águas e do efluente, como ácidos, floculantes, nutrientes, inibidores de corrosão etc. Estes são apurados, tipicamente, por pesagem, medição e apontamento em ordens de produção.

Em função do produto desejado (no caso, *flakes* de PET), a Linha de Lavagem é alimentada com composição específica de matéria-prima (garrafas). Assim, embora a ordem de grandeza dos consumos de insumos materiais e energéticos seja parecida para os diferentes tipos de *flake* que abastecem os processos B2B e B2F, o aproveitamento das matérias-primas tem perceptível diferença.

O *flake* alimentício, direcionado ao B2B, é o mais restritivo em termos de qualidade de cor e origem: somente são desejadas garrafas de origem alimentícia e transparentes, com tolerância de aceitação para garrafas alimentícias azuis translúcidas (típicas de embalagem de água mineral). Portanto, toda garrafa PET que é alimentada no processo e que não atende aos requisitos citados tendem a ser retiradas do processo, caracterizando uma “perda” no sistema. Importante esclarecer que essas garrafas indesejadas estão contidas nos fardos de garrafa comprados do mercado fornecedor e, aos olhos da necessidade do processo B2B, são consideradas “contaminantes”. Mas, uma vez segregadas nas etapas de Seleção Automática ou Manual de Garrafas, são devidamente identificadas e inventariadas para eventual utilização posterior na produção de outros tipos de *flake* que as tolerem.

O processo B2F demanda *flake* tipo técnico ou verde. O tipo técnico procura concentrar somente garrafas transparentes, de forma que possa ser usado na fabricação de fibras não-pigmentadas. Além de obviamente garrafas verdes, que são a maioria absoluta das garrafas PET coloridas do mercado, o *flake* tipo verde consome garrafas de outras cores num certo limite de tolerância, e são usadas para fabricação de fibras pretas ou cinzas.

A Tabela 9 apresenta os resultados de inventário calculados para a produção de *flakes* alimentício, técnico e verde. Devido à metodologia de cálculo, alguns valores são gerais para os três tipos, como por exemplo o GLP e o diesel e suas emissões para o ar, além do consumo de água e as emissões para água e para o solo.

Tabela 9 – Resultados da Análise de Inventário da Linha de Lavagem

(continua)			
Fluxos de Entrada	Unidade Funcional (un./t de <i>flake</i> ) Alimentício / Técnico / Verde	un.	Obs.
<b><u>Consumo de Energia</u></b>			
<b>Recursos Energéticos não-renováveis</b>			
gás natural, consumido na caldeira	72,7 / 69,5 / 71,7	kg	(1)
GLP, consumido pelas empilhadeiras	1,13	kg	(1)
diesel, consumido pela minicarregadeira	0,89	kg	(1)
<b>Energia elétrica</b>	1.265 / 1.257 / 1.231	MJ	(1)
<b><u>Consumo de Materiais</u></b>			
<b>Recursos Materiais não-renováveis</b>			
garrafas incolores	1.157 / 1.150 / N.A.	kg	(1)
garrafas de óleo	229 / 191 / N.A.	kg	(1)
garrafas verdes	N.A. / N.A. / 1.209	kg	(1)
soda cáustica+meio filtrante+detergente+anti-espumante	31 / 31 / 31	kg	(1)
<b>Recursos Materiais renováveis</b>			
água	5.820	kg	(1)
Fluxos de Saída	Unidade Funcional (un./t de <i>flake</i> ) Alimentício / Técnico / Verde	un.	Obs.
<b><u>Saída Principal</u></b>			
1 t de <i>flake</i> incolor alimentício	1.000 / N.A. / N.A.	kg	
1 t de <i>flake</i> incolor técnico	N.A. / 1.000 / N.A.	kg	
1 t de <i>flake</i> verde	N.A. / N.A. / 1.000	kg	

Tabela 9 – Resultados da Análise de Inventário da Linha de Lavagem

(continuação)			
Fluxos de Saída	Unidade Funcional (un./t de <i>flake</i> ) Alimentício / Técnico / Verde	un.	Obs.
<b><u>Saídas Secundárias</u></b>			
rótulos e tampas	166,1 / 198,7 / 125,3	kg	(1)
pó de PET	33,2 / 37,1 / 37,1	kg	(1)
outros plásticos	22,4 / 21,3 / 11,8	kg	(1)
aparas plásticas	14,7 / 10,5 / 10,1	kg	(1)
<i>flakes</i> descartados	7,1 / 6,3 / 1,7	kg	(1)
papelão	3,3 / 3,6 / 1,6	kg	(1)
fitilhos	2,5 / 2,4 / 1,9	kg	(1)
descarte contaminantes magnéticos	2,0 / 2,6 / 3,0	kg	(1)
arames	1,8 / 4,9 / 2,6	kg	(1)
<b><u>Emissões</u></b>			
<b>para o ar</b>			
proveniente do consumo do gás natural na caldeira			
- CO <sub>2</sub>	203,1861 / 194,0913 / 200,2923	kg	(2)
- NO <sub>x</sub>	0,2202 / 0,2103 / 0,2171	kg	(3)
- CO	0,1321 / 0,1262 / 0,1302	kg	(4)
- material particulado	0,0215 / 0,0206 / 0,0212	kg	(3)
- COV	0,0087 / 0,083 / 0,0085	kg	(4)
- CH <sub>4</sub>	0,0036 / 0,0035 / 0,0036	kg	(2)
- SO <sub>x</sub>	0,0009 / 0,0009 / 0,0009	kg	(3)
- N <sub>2</sub> O	0,0004 / 0,0003 / 0,0004	kg	(2)
proveniente do consumo do GLP nas empilhadeiras			
- CO <sub>2</sub>	3,3264	kg	(2)
- CH <sub>4</sub>	0,0033	kg	(2)
- N <sub>2</sub> O	0,00001	kg	(2)

Tabela 9 – Resultados da Análise de Inventário da Linha de Lavagem

(conclusão)			
Fluxos de Saída	Unidade Funcional (un./t de flake) Alimentício / Técnico / Verde	un.	Obs.
proveniente do consumo do diesel na minicarregadeira			
- CO <sub>2</sub> fóssil	2,5455	kg	(2)
- CO <sub>2</sub> biogênico	0,1789	kg	(2)
- CH <sub>4</sub>	0,0002	kg	(2)
- N <sub>2</sub> O	0,0001	kg	(2)
<b>para a água</b>			
- DBO	22	kg	(1)
- sólidos suspensos	0,5	kg	(1)
(que chegam ao tratamento biológico)			
<b>para o solo</b>			
- lodo da Pré-ETE	70	kg	(1)
- lodo da ETE (biológico)	63	kg	(1)
- meio filtrante usado	7	kg	(1)

Fonte: Autor.

Obs.: (1) Calculado, a partir da base de dados da Recicladora

(2) Calculado, a partir do GHG Protocol

(3) Calculado, a partir de CETESB

(4) Calculado, a partir do AP42 EPA

#### 4.2.1.3 Linha de Extrusão (processo B2B)

Considera-se como fluxo de saída principal o reextrudado amorfo, que é armazenado em big-bags para consumo posterior na etapa de pós-condensação no estado sólido. Como fluxo de saída secundário, tem-se o refugo do processo. Os dados que originaram as saídas provêm de pesagem, identificação e apontamento em ordens de produção. A unidade funcional é 1 t de reextrudado amorfo.

Os fluxos de entrada de materiais contêm o *flake* alimentício, como entrada principal, e o *toner*, que tem como função melhorar a cor do produto final. Ambos são apurados por pesagem, medição e apontamento em ordem de produção.

O fluxo de entrada de recurso energético é composto por energia elétrica.

Com relação aos fluxos de saída, não foram apontadas emissões para a água, em virtude do descarte de efluente ser praticamente isento de carga orgânica.

A Tabela 10 apresenta os resultados de inventário calculados para essa etapa.

Tabela 10 – Resultados da Análise de Inventário da Linha de Extrusão

<b>Fluxos de Entrada</b>	<b>Unidade Funcional (un./t de reextrudado amorfo)</b>	<b>un.</b>	<b>Obs.</b>
<b><u>Consumo de Energia</u></b>			
<b>Energia elétrica</b>		1.453 MJ	(1)
<b><u>Consumo de Materiais</u></b>			
<b>Recursos Materiais não-renováveis</b>			
<i>flake</i> alimentício		1.015 kg	(1)
<i>toner</i>		4,4 kg	(1)
<b>Recursos Materiais renováveis</b>			
água		2.630 kg	(1)
<b>Fluxos de Saída</b>	<b>Unidade Funcional (un./t de reextrudado amorfo)</b>	<b>un.</b>	<b>Obs.</b>
<b><u>Saída Principal</u></b>			
1 t de reextrudado amorfo		1.000 kg	
<b><u>Saída Secundária</u></b>			
refugo		14,6 kg	(1)

Fonte: Autor.

Obs.: (1) Calculado, a partir da base de dados da Recicladora

#### 4.2.1.4 Linha de Pós-condensação no Estado Sólido (processo B2B)

Considera-se como fluxo de saída principal o PET-PCR, que é armazenado em big-bags para venda aos clientes. A unidade funcional é 1 t de PET-PCR.

Os fluxos de entrada de materiais contêm o reextrudado amorfo, como entrada principal, e o nitrogênio líquido, que tem como função ser um meio inerte para a reação de pós-condensação. São apurados por pesagem, medição e apontamento em ordem de produção.

Os fluxos de entrada de recursos energéticos são compostos, principalmente, por eletricidade e gás natural, mas também consideram GLP utilizados em equipamento para movimentação de material.

O gás natural é consumido num aquecedor de fluido térmico que mantém o processo aquecido em temperaturas da ordem de 280 °C. O consumo de gás natural é apurado através de medidor, na alimentação do aquecedor de fluido térmico, e a fração consumida pela Linha de Pós-condensação no Estado Sólido é apurada por meio de rateio entre os consumidores, baseado na carga térmica demandada.

O GLP é utilizado em empilhadeira para movimentação de material, e seu consumo é apurado através de balanços mensais de consumo de cilindros de GLP.

Com relação aos demais fluxos de saída, as emissões para o ar são derivadas da combustão do gás natural e do GLP, e calculadas a partir dos consumos dos combustíveis, como descrito no item 4.1.2.7 – “Pressupostos”.

Com relação aos fluxos de saída, não foram apontadas emissões para a água ou para o solo, em virtude de serem desprezíveis.

A Tabela 11 apresenta os resultados de inventário calculados para essa etapa.

Tabela 11 – Resultados da Análise de Inventário da Linha de Pós-condensação no Estado Sólido

		(continua)	
Fluxos de Entrada	Unidade Funcional (un./t de PET-PCR)	un.	Obs.
<b><u>Consumo de Energia</u></b>			
<b>Recursos Energéticos não-renováveis</b>			
gás natural, consumido no aquecedor de fluido térmico	48,7	kg	(1)
GLP, consumido pela empilhadeira	1,31	kg	(1)
<b>Energia elétrica</b>	1.394	MJ	(1)
<b><u>Consumo de Materiais</u></b>			
<b>Recursos Materiais não-renováveis</b>			
reextrudado amorfo	1.000	kg	(1)
<b>Recursos Materiais renováveis</b>			
nitrogênio líquido	76,4	kg	(1)
Fluxos de Saída	Unidade Funcional (un./t de PET-PCR)	un.	Obs.
<b><u>Saída Principal</u></b>			
1 t de PET-PCR	1.000	kg	
<b><u>Emissões</u></b>			
<b>para o ar</b>			
proveniente do consumo do gás natural no aquecedor de fluido térmico			
- CO <sub>2</sub>	136,0086	kg	(2)
- NO <sub>x</sub>	0,1474	kg	(3)
- CO	0,0884	kg	(4)
- material particulado	0,0144	kg	(3)
- COV	0,0058	kg	(4)
- CH <sub>4</sub>	0,0024	kg	(2)
- SO <sub>x</sub>	0,0006	kg	(3)

Tabela 11 – Resultados da Análise de Inventário da Linha de Pós-condensação no Estado Sólido

		(conclusão)		
Fluxos de Saída	Unidade Funcional (un./t de PET-PCR)	un.	Obs.	
- N <sub>2</sub> O	0,0002	kg	(2)	
proveniente do consumo do GLP nas empilhadeiras				
- CO <sub>2</sub>	3,8364	kg	(2)	
- CH <sub>4</sub>	0,00377	kg	(2)	
- N <sub>2</sub> O	0,00001	kg	(2)	

Fonte: Autor.

Obs.: (1) Calculado, a partir da base de dados da Recicladora

(2) Calculado, a partir do GHG Protocol

(3) Calculado, a partir de CETESB

(4) Calculado, a partir do AP42 EPA

#### 4.2.1.5 Linha de Fiação (processo B2F)

Considera-se como fluxo de saída principal os filamentos, que são armazenados em tambores para consumo na etapa posterior de estiragem. Como fluxo de saída secundário, tem-se o refugo do processo. Os dados que originaram as saídas provêm de pesagem e apontamento em ordens de produção. A unidade funcional é 1 t de filamentos.

Os fluxos de entrada de materiais contêm os *flakes* técnico e verde, como entradas principais, e o máster-batch preto, que tem como função conferir a cor preta ou cinza ao produto final. Todos são apurados por pesagem, medição e apontamento em ordem de produção.

Os fluxos de entrada de recursos energéticos são compostos por eletricidade e gás natural. O gás natural é consumido numa caldeira e num aquecedor de fluido térmico, com objetivo de manter aquecidos diferentes pontos do processo de produção, através de vapor e fluido térmico. O consumo de gás natural é apurado através de medidor, na alimentação de cada um dos equipamentos de combustão, e a fração consumida pela Linha de Fiação é apurada por meio de rateio entre os consumidores, baseado em medições e na carga térmica demandada.

Com relação aos demais fluxos de saída, as emissões para o ar são derivadas da combustão do gás natural, e calculadas a partir dos consumos dos combustíveis, como descrito no item 4.1.2.7 – “Pressupostos”.

Com relação aos fluxos de saída, não foram apontadas emissões para a água ou para o solo, em virtude de serem desprezíveis.

A Tabela 12 apresenta os resultados de inventário calculados para essa etapa.

Tabela 12 – Resultados da Análise de Inventário da Linha de Fiação

		(continua)	
Fluxos de Entrada	Unidade Funcional (un./t de filamentos)	un.	Obs.
<b><u>Consumo de Energia</u></b>			
<b>Recursos Energéticos não-renováveis</b>			
gás natural, consumido na caldeira e no aquecedor de fluido térmico	16,7	kg	(1)
<b>Energia elétrica</b>	1.772	MJ	(1)
<b><u>Consumo de Materiais</u></b>			
<b>Recursos Materiais não-renováveis</b>			
<i>flake</i> técnico	423	kg	(1)
<i>flake</i> verde	524	kg	(1)
máster-batch preto	32,7	kg	(1)
Fluxos de Saída	Unidade Funcional (un./t de filamentos)	un.	Obs.
<b><u>Saída Principal</u></b>			
1 t de filamentos	1.000	kg	
<b><u>Saída Secundária</u></b>			
refugo	54	kg	(1)

Tabela 12 – Resultados da Análise de Inventário da Linha de Fiação

		(conclusão)	
Fluxos de Saída	Unidade Funcional (un./t de filamentos)	un.	Obs.
<b><u>Emissões</u></b>			
<b>para o ar</b>			
proveniente do consumo do gás natural na caldeira e no aquecedor de fluido térmico			
- CO <sub>2</sub>	46,7142	kg	(2)
- NO <sub>x</sub>	0,0506	kg	(3)
- CO	0,0304	kg	(4)
- material particulado	0,0049	kg	(3)
- COV	0,0020	kg	(4)
- CH <sub>4</sub>	0,0008	kg	(2)
- SO <sub>x</sub>	0,0002	kg	(3)
- N <sub>2</sub> O	0,0001	kg	(2)

Fonte: Autor.

- Obs.: (1) Calculado, a partir da base de dados da Recicladora  
 (2) Calculado, a partir do GHG Protocol  
 (3) Calculado, a partir de CETESB  
 (4) Calculado, a partir do AP42 EPA

#### 4.2.1.6 Linha de Estiragem (processo B2F)

Considera-se como fluxo de saída principal a Fibra de Poliéster Reciclada, que é armazenada em fardos prensados para venda aos clientes. Como fluxo de saída secundário, tem-se o refugo do processo. Os dados que originaram as saídas provêm de pesagem e apontamento em ordens de produção. A unidade funcional é 1 t de Fibra de Poliéster Reciclada.

O fluxo de entrada de materiais principal contém os filamentos, como entrada principal. Seu consumo é apurado por pesagem, medição e apontamento em ordem de produção.

Os fluxos de entrada de recursos energéticos são compostos, principalmente, por eletricidade e gás natural, mas também consideram GLP utilizados em equipamento para movimentação de material.

O gás natural é consumido numa caldeira, fornecendo vapor para aquecimento do processo. O consumo de gás natural é apurado através de medidor, na alimentação da caldeira, e a fração consumida pela Linha de Estiragem é apurada por meio de rateio entre os consumidores, baseado em medições.

O GLP é utilizado em empilhadeira para movimentação de material, e seu consumo é apurado através de balanços mensais de consumo de cilindros de GLP.

Com relação aos demais fluxos de saída, as emissões para o ar são derivadas da combustão do gás natural e do GLP, e calculadas a partir dos consumos dos combustíveis, como descrito no item 4.1.2.7 – “Pressupostos”.

Com relação aos fluxos de saída, não foram apontadas emissões para a água ou para o solo, em virtude de serem desprezíveis.

A Tabela 13 apresenta os resultados de inventário calculados para essa etapa.

Tabela 13 – Resultados da Análise de Inventário da Linha de Estiragem

<b>Fluxos de Entrada</b>	<b>Unidade Funcional (un./t de Fibra de Poliéster Reciclada)</b>	<b>un.</b>	<b>Obs.</b>
<b>(continua)</b>			
<b><u>Consumo de Energia</u></b>			
<b>Recursos Energéticos não-renováveis</b>			
gás natural, consumido na caldeira	101,7	kg	(1)
GLP, consumido pela empilhadeira	0,30	kg	(1)
<b>Energia elétrica</b>	1.311	MJ	(1)
<b><u>Consumo de Materiais</u></b>			
<b>Recursos Materiais não-renováveis</b>			
filamentos	1.024	kg	(1)
<b>Recursos Materiais renováveis</b>			
água	5.760	kg	(1)

Tabela 13 – Resultados da Análise de Inventário da Linha de Estiragem

(conclusão)			
Fluxos de Saída	Unidade Funcional (un./t de Fibra de Poliéster Reciclada)	un.	Obs.
<b><u>Saída Principal</u></b>			
1 t de Fibra de Poliéster Reciclada	1.000	kg	
<b><u>Saída Secundária</u></b>			
refugo		24 kg	(1)
<b><u>Emissões</u></b>			
<b>para o ar</b>			
proveniente do consumo do gás natural na caldeira e no aquecedor de fluido térmico			
- CO <sub>2</sub>	284,0058	kg	(2)
- NO <sub>x</sub>	0,3078	kg	(3)
- CO	0,1847	kg	(4)
- material particulado	0,0301	kg	(3)
- COV	0,0121	kg	(4)
- CH <sub>4</sub>	0,0051	kg	(2)
- SO <sub>x</sub>	0,0013	kg	(3)
- N <sub>2</sub> O	0,0005	kg	(2)
proveniente do consumo do GLP na empilhadeira			
- CO <sub>2</sub>	0,8867	kg	(2)
- CH <sub>4</sub>	0,00087	kg	(2)
- N <sub>2</sub> O	0,000003	kg	(2)

Fonte: Autor.

Obs.: (1) Calculado, a partir da base de dados da Recicladora

(2) Calculado, a partir do GHG Protocol

(3) Calculado, a partir de CETESB

(4) Calculado, a partir do AP42 EPA

#### **4.2.2 Inventário do Ciclo de Vida, por sistema de produto (abordagem “do portão ao portão”)**

Uma vez que os estudos disponíveis na literatura (GOMES et al., 2019) atestam as vantagens ambientais da alternativa da reciclagem do PET frente a alternativa de aterros sanitários, a discussão sobre a destinação dos resíduos sólidos do processo de reciclagem torna-se menos importante. Vale lembrar que, tipicamente, a matéria-prima que alimenta o processo estudado estaria, na melhor das hipóteses, na rota natural de destinação ao aterro sanitário – a realidade brasileira ainda encontra lixões e corpos hídricos como destinos. A mesma é “desviada” para a cadeia da reciclagem e, ainda que os resíduos oriundos de seu beneficiamento fossem destinados ao aterro sanitário, o balanço de massa apontaria um saldo positivo a uma porção que ganharia a oportunidade de um novo ciclo de utilização, e resultaria na substituição de PET virgem pelo material reciclado. Mas o cenário de destinação dos resíduos sólidos da reciclagem ao aterro sanitário é extremamente conservador. É fato que apenas uma pequena fração tem necessidade desse tipo de destinação: os subprodutos e refugos conseguem encaminhamento em outras rotas de reciclagem de materiais, e mesmo os lodos do tratamento de efluentes tecnicamente podem ser destinados a opções mais interessantes ambientalmente, como a compostagem e o coprocessamento.

Sobre as emissões para a água, apontou-se uma caracterização qualitativa e quantitativa da geração de efluentes, pela oportunidade de essa passar a ser uma rara referência na literatura e demonstrar o desafio dos processos. No entanto, a prática da unidade fabril avaliada de ter uma estação de tratamento de efluentes com foco no reuso da água, torna menos relevante a análise deste aspecto ambiental, visto que pouco é despejado nos corpos hídricos.

As emissões para o ar são derivadas diretamente dos processos de combustão das fontes de energia. Por isso, a avaliação do consumo dos recursos energéticos tende a resultar satisfatoriamente na identificação das mesmas oportunidades de ganhos que seriam obtidas avaliando essas emissões. Isto é, avaliar os consumos e identificar oportunidades de redução são mais intuitivas e trazem os ganhos nas emissões, proporcionalmente.

Assim, o resumo dos processos B2B e B2F para os principais fluxos de entrada das etapas, com abrangência “do portão ao portão” e com as devidas correções para a unidade funcional respectiva – t de PET-PCR para o B2B, e t de Fibra de Poliéster Reciclada para o B2F – tem foco no consumo de garrafas PET pós-consumo, de recursos energéticos e de água,

como apresentado na Tabela 14. A correção nas unidades funcionais, entre etapas, se dá pela multiplicação da eficiência de transformação do fluxo de entrada principal no fluxo de saída principal. Por exemplo, para o B2B, não há perdas de material na Pós-condensação no Estado Sólido, portanto para produção de 1 t de PET-PCR, requer-se 1 t de reextrudado amorfo. A Extrusão, por sua vez, requer 1.014,6 kg de *flake* alimentício para produção de 1 t de reextrudado amorfo, pois nesta etapa há geração de 14,6 kg de refugo por tonelada de produto. A produção de 1 tonelada do *flake* alimentício vai requerer 1.386 kg de garrafas. Portanto, para exemplificar a quantidade de garrafas necessárias para produção de 1 t de PET-PCR, a multiplicação seria  $1 \times 1,015 \times 1,386 = 1.407$  kg de garrafas.

Tabela 14 – Principais fluxos de entrada, B2B e B2F – “do portão ao portão”

	<b>Unidade Funcional (un./t de PET- PCR)</b>	<b>Unidade Funcional (un./t de Fibra de Poliéster Reciclada)</b>	<b>un.</b>
garrafas PET pós-consumo	1.407	1.299	kg
gás natural, consumido na caldeira e no aquecedor de fluido térmico	122,5	191,2	kg
diesel, consumido nos caminhões e na minicarregadeira	40,3	37,3	kg
GLP, consumido pelas empilhadeiras	2,5	1,5	kg
energia elétrica	4.131	4.397	MJ
água	8.536	11.722	kg

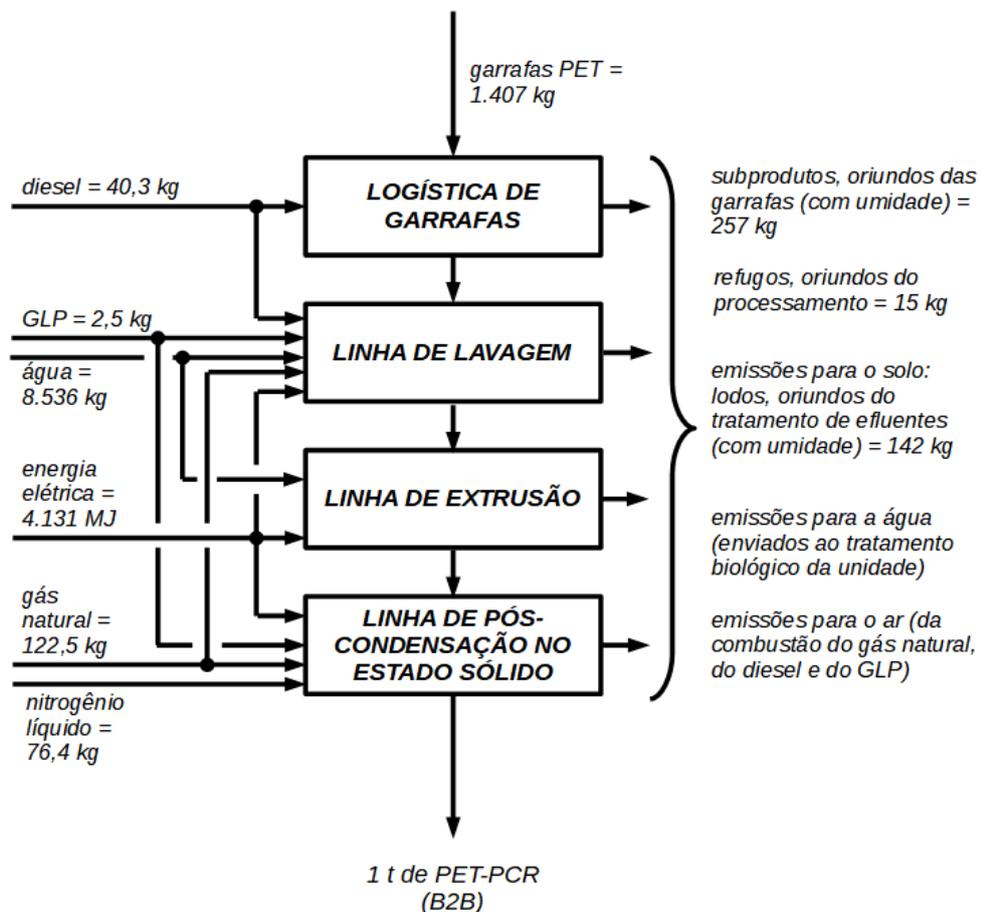
Fonte: Autor.

Com relação à diferença de consumo de garrafas entre os produtos, observado na Tabela 14, pode-se justificar tal comportamento pelas características requeridas por cada um. O *flake* alimentício, requerido pelo B2B, é o mais restritivo dos produtos da Linha de Lavagem: em sua produção, mais material é segregado nas Seleções Automática e Manual; por exemplo, as embalagens de origem não-alimentícia precisam ser retiradas do processo. Além disso, observa-se que o nível de contaminação dos fardos incolores é mais alto que para os fardos verdes. Enquanto é comum uma embalagem em PVC ser confundida com uma embalagem PET na cadeia de coleta, segregação e compactação (do descarte pelo consumidor

ao comerciante de recicláveis), observa-se que existem poucas embalagens coloridas em PVC. Outras duas características do mercado, em conjunto com a tecnologia empregada na Recicladora, acarretam em maior ineficiência do *flake* alimentício com relação ao consumo de fardos de garrafas. A primeira é com relação às embalagens *sleeve*, que são tipicamente constituídas de PET incolor, mas são descartadas pelo Seleccionador Automático de Garrafas por duas razões: ou porque o rótulo *sleeve* é de PVC, e a máquina enxerga a embalagem como se fosse inteira deste material, ou porque as cores do rótulo que recobre toda embalagem fazem a máquina descartar a garrafa por considerá-la colorida. A segunda característica é a sujidade das garrafas: a depender do caminho que a embalagem percorreu e de materiais que ela teve contato – ainda é comum encontrar garrafas que passaram por “lixões” – a pré-lavagem não é suficiente para limpar a garrafa de forma que a máquina a identifique como sendo incolor, e ela acaba sendo descartada como PET colorido.

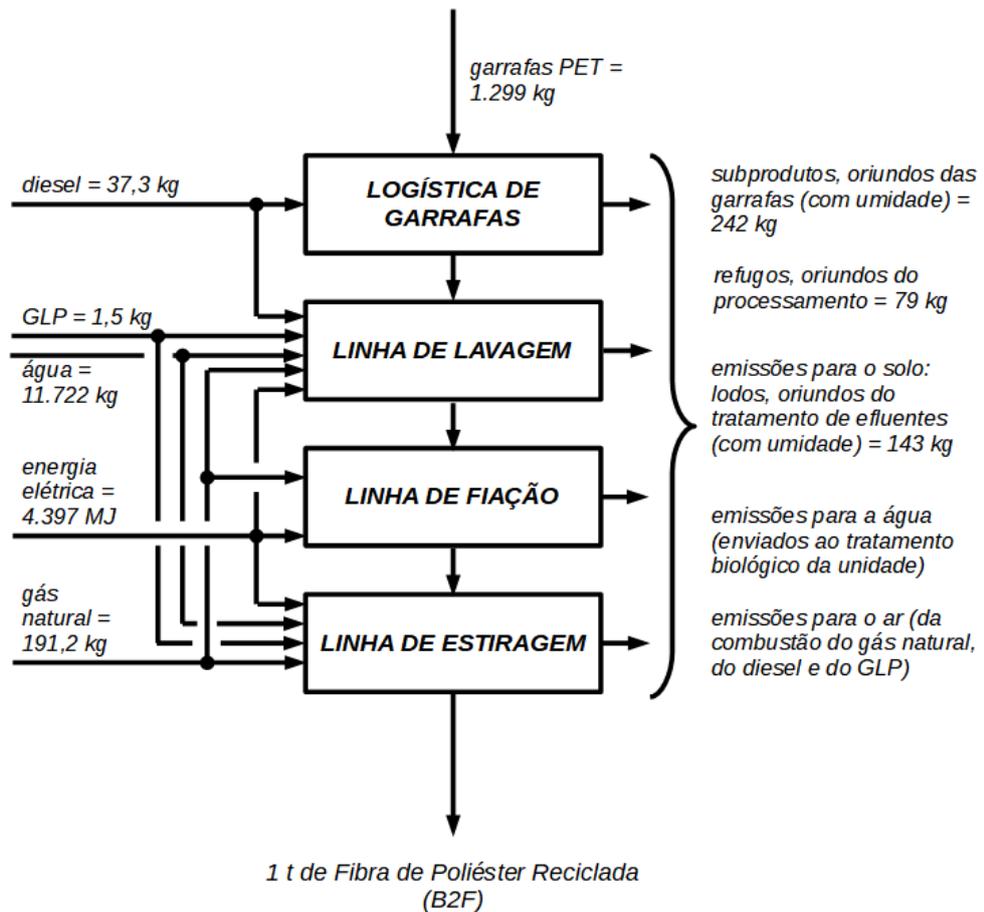
As Figuras 14 e 15 ilustram os ICV para os produtos B2B e B2F, respectivamente.

Figura 14 – ICV do B2B



Fonte: Autor.

Figura 15 – ICV do B2F



Fonte: Autor.

Para análise dos recursos energéticos, fez-se seu agrupamento convertendo os combustíveis para MJ, utilizando-se o Poder Calorífico Inferior (PCI). As Tabelas 15 e 16 apresentam esses dados consolidados, com agrupamento por etapa de produção e por subsistema (“caminhão”, “eletricidade”, “aquecimento” e “movimentação de materiais”).

Tabela 15 – Recursos Energéticos, B2B e B2F – “do portão ao portão”, por etapa

	etapas				total
	Logística de Garrafas	Lavagem	Extrusão (B2B) / Fiação (B2F)	Pós-condensação no Estado Sólido (B2B) / Estiragem (B2F)	
B2B	1.651 MJ 13,7%	5.048 MJ 42,0%	1.453 MJ 12,1%	3.878 MJ 32,2%	12.030 MJ 100%
B2F	1.524 MJ 9,8%	4.969 MJ 32,0%	2.665 MJ 17,1%	6.384 MJ 41,1%	15.542 MJ 100%

Fonte: Autor.

Tabela 16 – Recursos Energéticos, B2B e B2F – “do portão ao portão”, por subsistema

	subsistemas				total
	“caminhões”	“eletricidade”	“aquecimento”	“movimentação de materiais”	
B2B	1.651 MJ 13,7%	4.131 MJ 34,3%	6.096 MJ 50,7%	152 MJ 1,3%	12.030 MJ 100%
B2F	1.524 MJ 9,8%	4.397 MJ 28,3%	9.515 MJ 61,2%	106 MJ 0,7%	15.542 MJ 100%

Fonte: Autor.

A Tabela 15 demonstra que o B2F consome mais energia que o B2B. Nas etapas envolvidas até a produção do *flake*, os consumos em termos absolutos são equivalentes entre os dois processos. As etapas de Fiação e, principalmente, Estiragem, que produzem o B2F, consomem mais que as etapas Extrusão e Pós-condensação no Estado Sólido, que produzem o B2B. Embora logicamente sejam processos que envolvam tecnologias distintas, pois os produtos-alvo requerem processamento diferente, é possível fazer algumas considerações para elucidação. O processo B2B é mais moderno, dimensionado exatamente para a demanda empregada, enquanto o B2F é constituído de equipamentos e processos com algumas décadas de defasagem tecnológica, com algumas adaptações para produção de material reciclado. A capacidade produtiva também é diferente entre as tecnologias, levando a uma maior eficiência para o B2B.

Para o B2B, chama a atenção, em termos de consumo relativo, a participação da Linha de Lavagem com 42,0% do consumo total, seguido da Pós-condensação no Estado Sólido, com 32,2%. Para este último, vale também o comentário de que a etapa tem uma defasagem em “idade tecnológica” frente às outras do B2B, pois era uma unidade já disponível para produção de resina PET virgem, no final dos anos 1980. Para o B2F, a maior consumidora é a Estiragem, com 41,1%, seguido da Linha de Lavagem com 32,0%. A Estiragem, além de ser a maior consumidora de vapor de toda Recicladora, tem uma grande quantidade de motores de grande porte que, por mais que tenham sido modernizados com o passar do tempo, ainda são responsáveis por movimentar mecanismos com concepção já ultrapassada. A Linha de Lavagem, com destaque relativo em termos de consumo para ambos processos B2B e B2F, tem como característica uma grande quantidade de equipamentos rotativos, esteiras e roscas transportadoras, mas principalmente a lavagem do material a quente (aquecimento a vapor), o que confere uma qualidade diferenciada ao *flake* produzido.

A Tabela 16 apresenta o consumo por subsistemas, para que outras oportunidades de melhoria sejam identificadas a partir de uma abordagem diferente. Observa-se que “aquecimento”, com 61,2% para o B2F e 50,7% para o B2B, é o subsistema de maior participação. Foram agrupados nesse subsistema tanto o Sistema de Geração e Distribuição de Vapor (Caldeira) quanto o Sistema de Fluido Térmico (Aquecedor de Fluido Térmico), ambos a partir da combustão do gás natural. Embora os queimadores sejam tecnologicamente atualizados, pois foram fruto da conversão dos equipamentos de queima de óleo combustível para gás natural, vislumbra-se a oportunidade de ganhos com a adequação do porte dos equipamentos e do sistema de distribuição dos fluidos de aquecimento. Isto se deve a eles também existirem antes do investimento na planta B2B, numa condição original de alimentarem diversas unidades químicas de maior porte, que acabaram sendo desativadas e os sistemas, portanto, terem ficado superdimensionados. A decisão de aproveitar-se tais sistemas quando do investimento na planta B2B fazia sentido com relação à melhor utilização do equipamento que já estava em uso (maior carga, melhor eficiência) e à menor necessidade de aporte de capital. Mas, sem dúvida, uma reavaliação merece ser feita, com a possibilidade de haver não somente ganhos ambientais, mas também econômicos.

Cabe ressaltar que os comentários aqui feitos sobre o consumo de energia em nada desabonam a qualidade dos produtos, reputada pelo mercado, tanto para o B2B quanto para o

B2F. As análises aqui feitas têm somente a intenção de apontar a possibilidade de se obter ganhos energéticos, com a atualização tecnológica dos processos mais antigos.

Quando se avalia o consumo de água, é importante ressaltar que se trata daquele volume de água que a Central de Utilidades capta através dos poços profundos, e de alguma forma condiciona e bombeia para alimentação dos processos produtivos. A Tabela 17 apresenta o consumo total de água, para B2B e B2F, respeitando a unidade funcional do produto em questão. Percebe-se a grande relevância da etapa de lavagem das garrafas para transformação em *flakes*, cujo maior consumo está associado à reposição do circuito de água de lavagem. Vale destacar que o conceito utilizado nesse processo valoriza o baixo consumo de água, através de subcircuitos de reciclagem de água entre os subprocessos que constituem a Linha de Lavagem. Mundo afora, outros processos de produção de *flake* que não utilizam tecnologia semelhante tendem a consumir muito mais água, sendo a indisponibilidade desse recurso, muitas vezes, um limitante para sua instalação ou ampliação de escala. Na tecnologia avaliada, a água filtrada após o uso de uma etapa mais nobre é usada como reposição para uma menos demandante em qualidade (fluxo em cascata), economizando-se também calor e produtos químicos. Quando se esgota a possibilidade de reaproveitamento interno, há o descarte do efluente para o sistema de tratamento. A grande diferença de consumo de água entre B2B e B2F deve-se ao processo de fabricação das fibras, que requer o uso do vapor, para aquecimento e secagem, e o consumo de emulsões, preparadas com água desmineralizada.

Tabela 17 – Consumo de água, B2B e B2F – “do portão ao portão”, por etapa

	Etapas		total
	Lavagem	Extrusão (B2B) / Estiragem (B2F)	
B2B	5.906 kg 69,2%	2.630 kg 30,8%	8.536 kg 100%
B2F	5.962 kg 50,9%	5.760 kg 49,1%	11.722 kg 100%

Fonte: Autor.

### 4.2.3 Inventário do Ciclo de Vida, por sistema de produto (abordagem “do berço ao portão”)

Para compor a abordagem “do berço ao portão”, incorporou-se as informações dos bancos de dados relativos à cadeia de produção do diesel, da eletricidade, do gás natural, do GLP e do nitrogênio líquido. Fez-se uma análise do inventário de ciclo de vida dos sistemas de produto propostos para o estudo – “Da garrafa ao *flake*”, “Do *flake* ao PET-PCR” (B2B) e “Do *flake* à Fibra de Poliéster Reciclada” (B2F) – com objetivo de identificar pontos de atenção para o consumo de recursos.

Pelo contexto do trabalho e sua inserção na discussão atual sobre uso de derivados de petróleo e energia fóssil, deu-se especial atenção ao consumo de recursos energéticos não-renováveis. No desenvolvimento do estudo, percebeu-se que os recursos gás natural e óleo cru concentravam mais de 85% da demanda, conforme apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Consumo de recursos energéticos não-renováveis, B2B e B2F

	B2B		B2F	
Gás Natural	65,4%		74,7%	
Óleo Cru	21,1%		16,0%	
outros	13,5%		9,3%	
total	318	kg/t de PET-PCR	401	kg/t de Fibra de Poliéster Reciclada

Fonte: Autor.

Pode-se associar o consumo de óleo cru às cadeias produtivas do diesel, principalmente, e também a uma porção da matriz elétrica brasileira. O gás natural, além do consumo já explícito na Recicladora através da combustão em caldeira e aquecedor de fluido térmico, também está presente na composição da matriz elétrica brasileira: ambos, óleo cru e gás natural, pela operação de parte das termoelétricas que alimentam o sistema elétrico nacional.

A Tabela 19 apresenta, para o sistema de produto “da garrafa ao *flake*”, as informações compiladas, com agrupamento por subsistema de consumo. Como antecipado, percebe-se a preponderância do recurso gás natural no subsistema “aquecimento”, devido ao combustível consumido na caldeira, e do recurso óleo cru no subsistema “caminhão”, devido ao consumo do diesel. Também se nota a participação não desprezível de ambos os recursos no subsistema “eletricidade”.

Tabela 19 – Consumo de recursos energéticos não-renováveis, “da garrafa ao *flake*”

	tipo de <i>flake</i>	subsistema			kg/t de <i>flake</i>
		“caminhão”	“eletricidade”	“aquecimento”	
Gás Natural	alimentício	2,3%	12,1%	85,1%	111,6
	técnico	2,3%	12,6%	85,1%	106,5
	verde	2,1%	12,1%	85,6%	109,2
Óleo Cru	alimentício	81,7%	13,0%	0,8%	49,7
	técnico	81,3%	13,2%	0,8%	48,3
	verde	79,9%	14,1%	0,9%	44,3

Fonte: Autor.

As Tabelas 20 e 21 apresentam, respectivamente, para os sistemas de produto “do *flake* ao PET-PCR” (B2B) e “do *flake* à Fibra de Poliéster Reciclada” (B2F), as informações compiladas, com agrupamento por etapas de produção.

Tabela 20 – Consumo de recursos energéticos não-renováveis, “do *flake* ao PET-PCR” (B2B)

	etapa				kg/t de PET-PCR
	Logística de Garrafas	Linha de Lavagem	Linha de Extrusão	Linha de Pós-condensação no Estado Sólido	
Gás Natural	1,3%	52,1%	7,6%	39,0%	207,9
Óleo Cru	61,6%	13,7%	11,1%	13,6%	66,9

Fonte: Autor.

Tabela 21 – Consumo de recursos energéticos não-renováveis, “do *flake* à Fibra de Poliéster Reciclada” (B2F)

	etapa				kg/t de PET-PCR
	Logística de Garrafas	Linha de Lavagem	Linha de Fiação	Linha de Estiragem	
Gás Natural	0,8%	36,1%	13,9%	49,2%	299,4
Óleo Cru	59,4%	14,3%	14,5%	11,8%	64,1

Fonte: Autor.

Como visto que os maiores consumos de recursos energéticos da Recicladora são os subsistemas “aquecimento” e “eletricidade”, a análise que se pode fazer com relação ao recurso gás natural é exatamente a mesma que foi feita para as apurações “do portão ao portão”, para as Tabelas 15, 16 e 17.

Já para o recurso óleo cru, nota-se a predominância de seu consumo na etapa de Logística de Garrafas, devido à sua relação direta com o diesel, majoritariamente consumido

pelos caminhões. Essa etapa talvez seja a que tem mais possibilidades de melhorias ambientais, pela observação de práticas diversas entre os fornecedores, com relação a qualidade e formato dos fardos de garrafas e seleção do veículo, bem como pelo fomento de políticas de coleta de material pós-consumo mais efetivas, que permitissem que o material reciclável fosse coletado num raio mais próximo da Recicladora, diminuindo as distâncias percorridas e utilizando melhor a capacidade dos veículos.

#### 4.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA (AICV)

Com objetivo de estudar a significância dos impactos ambientais potenciais, os dados consolidados dos inventários foram correlacionados às categorias de impacto ambiental, aplicando-se os métodos recomendados para o estudo, conforme apresentados previamente na Tabela 7.

Para apoio nos cálculos, utilizou-se o *software* de ACV GaBi. Os indicadores resultantes, manuseados em planilha própria desenvolvida para o estudo, são apresentados nas Tabelas de 22 a 26.

A Tabela 22 apresenta os resultados da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para os processos B2B e B2F, com abrangência “do berço ao portão”. Analisando-a, observa-se que para a maioria das categorias de impacto ambiental, o B2F tem um potencial de impacto maior que o B2B. A única exceção, onde o B2B tem 7% menos potencial de impacto que o B2F, é para a categoria de Depleção da Camada de Ozônio. Para a categoria de Ecotoxicidade de Água Doce, pode-se considerar o potencial de impacto de ambas sejam idênticos. As maiores diferenças de potencial de impacto ambiental do B2F frente ao B2B são: Depleção de Recursos Abióticos – fósseis (30% maior), Toxicidade Humana – câncer (28% maior) e Potencial de Aquecimento Global (24% maior). Vale ressaltar que esta comparação é relativa entre os produtos estudados, dentro do escopo de estudo desta ACV.

Tabela 22 – Resultados da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida, B2B e B2F – “do berço ao portão”

<b>Categoria de Impacto Ambiental</b>	<b>Método</b>	<b>Unidade</b>	<b>B2B</b>	<b>B2F</b>
Potencial de Aquecimento Global	CML	kgCO <sub>2</sub> eq	986	1.218
Acidificação Terrestre	ReCiPe	kgSO <sub>2</sub> eq	3,34	3,83
Depleção de Recursos Abióticos – elementos	CML	kgSbeq	1,65 x 10 <sup>-4</sup>	1,70 x 10 <sup>-4</sup>
Depleção de Recursos Abióticos – fósseis	CML	MJ	12.773	16.576
Escassez Hídrica	AWARE	m <sup>3</sup> eqmundial	173,1	189,8
Depleção da Camada de Ozônio	CML	kgR11eq	2,21 x 10 <sup>-10</sup>	2,06 x 10 <sup>-10</sup>
Ecotoxicidade de água doce	USEtox	CTU <sub>e</sub>	2,43	2,42
Toxicidade humana – câncer	USEtox	CTU <sub>h</sub>	1,88 x 10 <sup>-7</sup>	2,42 x 10 <sup>-7</sup>
Toxicidade humana – não-câncer	USEtox	CTU <sub>h</sub>	4,12 x 10 <sup>-9</sup>	4,95 x 10 <sup>-9</sup>

Fonte: Autor.

A análise detalhada para cada processo será feita a seguir, com apoio de tabelas que apresentam maior detalhamento do potencial de impacto ambiental, segregados por etapa de produção e por subsistema.

#### 4.3.1 AICV do B2B

A Tabela 23 apresenta os indicadores resultantes da AICV, agrupados pelas etapas de produção do B2B. De forma geral, pode-se observar que, a depender da categoria de impacto ambiental de interesse, o foco para investigação de oportunidades de melhoria pode estar em uma ou outra etapa. Para a Logística de Garrafas, a categoria de maior destaque é a de Ecotoxicidade de Água Doce, correspondendo a 48,0% do potencial de impacto total do B2B. A Linha de Lavagem tem destaque na categoria Toxicidade Humana – câncer, e na Depleção de Recursos Abióticos – fósseis, com 44,0% e 42,7% do potencial de impacto total, respectivamente. A Linha de Pós-condensação no Estado Sólido se destaca na Depleção da Camada de Ozônio, com 42,1% do potencial de impacto total.

Tabela 23 – Resultados da AICV, para o B2B – “do berço ao portão”, por etapa

Categoria de Impacto Ambiental	B2B – etapas			
	Logística de Garrafas	Lavagem	Extrusão	Pós-condensação no Estado Sólido
Potencial de Aquecimento Global	13,5%	39,3%	14,1%	33,1%
Acidificação Terrestre	5,2%	35,1%	26,0%	33,7%
Depleção de Recursos Abióticos – elementos	2,3%	31,1%	27,8%	38,8%
Depleção de Recursos Abióticos – fósseis	14,5%	42,7%	9,6%	33,2%
Escassez Hídrica	0,1%	35,2%	34,5%	30,2%
Depleção da Camada de Ozônio	0,1%	27,1%	30,7%	42,1%
Ecotoxicidade de água doce	48,0%	18,1%	14,8%	19,1%
Toxicidade humana – câncer	0,6%	44,0%	18,8%	36,6%
Toxicidade humana – não-câncer	7,3%	37,8%	21,2%	33,7%

Fonte: Autor.

A Tabela 24 apresenta agrupamento dos indicadores resultantes da AICV na forma de subsistemas. Observa-se que “aquecimento” e “eletricidade” são os grandes responsáveis pelo potencial de impacto ambiental de praticamente todas as categorias. A coluna “outros destaques” apresenta subsistemas de importância para a categoria específica, e que também merecem ser analisados. Vale a pena destacar a presença do subsistema “produção do diesel”, com 49,2% do potencial de impacto ambiental total da categoria Ecotoxicidade de Água Doce.

Tabela 24 – Resultados da AICV, para o B2B – “do berço ao portão”, por subsistema

<b>B2B – subsistemas</b>				
<b>Categoria de Impacto Ambiental</b>	<b>“aquecimento”</b>	<b>“eletricidade”</b>	<b>outros destaques</b>	<b>demais</b>
Potencial de Aquecimento Global	43,2%	40,1%	12,7% (emissões dos caminhões)	4,0%
Acidificação Terrestre	19,9%	74,0%	3,1% (emiss. dos caminhões) 2,1% (produção do diesel)	0,9%
Depleção de Recursos Abióticos – elementos	10,6%	79,0%	7,8% (produção do nitrogênio líquido)	2,6%
Depleção de Recursos Abióticos – fósseis	55,5%	27,1%	14,9% (produção do diesel)	3,5%
Escassez Hídrica	0,1%	88,8%	7,4% (Lavagem) 3,3% (Extrusão)	1,4%
Depleção da Camada de Ozônio	0,01%	87,2%	12,6% (produção do nitrogênio líquido)	0,19%
Ecotoxicidade de água doce	5,5%	42,0%	49,2% (produção do diesel)	3,3%
Toxicidade humana – câncer	45,7%	53,4%	-	0,9%
Toxicidade humana – não-câncer	31,2%	60,4%	5,5% (produção do diesel)	2,9%

Fonte: Autor.

A análise conjunta das Tabelas 23 e 24 permite interessantes conclusões. Evidentemente, como os subsistemas “aquecimento” e “eletricidade” permeiam as três etapas de produção industrial do processo B2B, ações para redução de seus consumos tendem a ter o impacto mais significativo e difuso pelas diferentes categorias selecionadas.

De forma mais específica, ações relacionadas à diminuição do consumo de diesel na Logística de Garrafas devem ser a prioridade para que se reduza o potencial de impacto da

categoria Ecotoxicidade de Água Doce. Esse tipo de ação também deve ter reflexo importante na Depleção de Recursos Abióticos – fósseis, pois a produção de diesel corresponde a 14,9% do potencial de impacto total, e no Potencial de Aquecimento Global, visto que 12,7% do resultado atual está associado às emissões dos caminhões.

O nitrogênio líquido, utilizado na etapa de Pós-Condensação no Estado Sólido, tem um papel de destaque nas categorias Depleção da Camada de Ozônio (12,6%) e Depleção de Recursos Abióticos – elementos (7,8%). Trata-se de um produto de uso intenso de energia elétrica em sua cadeia de produção. Cabe uma ressalva de que, na modelagem, por falta de informação nacional, utilizou-se os dados de produto estrangeiro, o que pode ter imputado alguma contribuição de matriz energética diferente da brasileira. Mas ainda que futuramente seja adequada esta fonte de informação, seu impacto ainda deverá ser de destaque, de mesma magnitude.

Com relação à Escassez Hídrica, vale destacar que o consumo interno na Recicladora (“do portão ao portão”) totaliza 10,7% do potencial de impacto total. A maior parte desse potencial de impacto está relacionado ao subsistema de “eletricidade”, com 88,8%.

#### **4.3.2 AICV do B2F**

A Tabela 25 apresenta os indicadores resultantes da AICV, agrupados pelas etapas de produção do B2F. Assim como na análise feita para o processo B2B, de forma geral pode-se observar que, a depender da categoria de impacto ambiental de interesse, o foco para investigação de oportunidades de melhoria pode estar em uma ou outra etapa. Para a Logística de Garrafas, a categoria de maior destaque é a de Ecotoxicidade de Água Doce, correspondendo a 44,6% do potencial de impacto total do B2F. A Linha de Estiragem tem destaque na categoria Toxicidade Humana – câncer, e na Depleção de Recursos Abióticos – fósseis, com 42,6% e 42,3% do potencial de impacto total, respectivamente. A Linha de Fiação se destaca na Depleção da Camada de Ozônio, com 41,1% do potencial de impacto total.

Tabela 25 – Resultados da AICV, para o B2F – “do berço ao portão”, por etapa

Categoria de Impacto Ambiental	B2F – etapas			
	Logística de Garrafas	Lavagem	Fiação	Estiragem
Potencial de Aquecimento Global	10,1%	31,3%	19,2%	39,4%
Acidificação Terrestre	4,2%	30,2%	30,8%	34,8%
Depleção de Recursos Abióticos – elementos	2,1%	29,9%	35,1%	32,9%
Depleção de Recursos Abióticos – fósseis	10,3%	32,3%	15,1%	42,3%
Escassez Hídrica	0,1%	31,9%	35,6%	32,4%
Depleção da Camada de Ozônio	0,1%	29,0%	41,1%	29,8%
Ecotoxicidade de água doce	44,6%	18,0%	19,3%	18,1%
Toxicidade humana – câncer	0,4%	33,8%	23,2%	42,6%
Toxicidade humana – não-câncer	5,6%	31,0%	25,8%	37,6%

Fonte: Autor.

A Tabela 26 apresenta agrupamento dos indicadores resultantes da AICV na forma de subsistemas. Observa-se que, da mesma forma que para o B2B, “aquecimento” e “eletricidade” são os grandes responsáveis pelo potencial de impacto ambiental de praticamente todas as categorias. A coluna “outros destaques” apresenta subsistemas de importância para a categoria específica, e que também merecem ser analisados. Vale a pena destacar a presença do subsistema “produção do diesel”, com 45,7% do potencial de impacto ambiental total da categoria Ecotoxicidade de Água Doce.

Tabela 26 – Resultados da AICV, para o B2F – “do berço ao portão”, por subsistema

<b>B2F – subsistemas</b>				
<b>Categoria de Impacto Ambiental</b>	<b>“aquecimento”</b>	<b>“eletricidade”</b>	<b>outros destaques</b>	<b>demais</b>
Potencial de Aquecimento Global	54,5%	34,7%	9,5% (emissões dos caminhões)	1,3%
Acidificação Terrestre	27,0%	68,7%	2,5% (emiss. dos caminhões) 1,7% (produção do diesel)	0,1%
Depleção de Recursos Abióticos – elementos	16,0%	81,7%	2,1% (produção do diesel)	0,2%
Depleção de Recursos Abióticos – fósseis	66,7%	22,2%	10,6% (produção do diesel)	0,5%
Escassez Hídrica	0,2%	86,3%	6,8% (Lavagem) 6,6% (Estiragem)	0,1%
Depleção da Camada de Ozônio	0,01%	99,8%	-	0,19%
Ecotoxicidade de água doce	8,6%	44,9%	45,7% (produção do diesel)	0,8%
Toxicidade humana – câncer	55,4%	44,2%	0,3% (produção do diesel)	0,1%
Toxicidade humana – não-câncer	40,6%	53,6%	4,2% (produção do diesel)	1,6%

Fonte: Autor.

A análise conjunta das Tabelas 25 e 26 permite interessantes conclusões. Evidentemente, como os subsistemas “aquecimento” e “eletricidade” permeiam as três etapas de produção industrial do processo B2F, ações para redução de seus consumos tendem a ter o impacto mais significativo e difuso pelas diferentes categorias selecionadas.

De forma mais específica, ações relacionadas à diminuição do consumo de diesel na Logística de Garrafas devem ser a prioridade para que se reduza o potencial de impacto da

categoria Ecotoxicidade de Água Doce. Esse tipo de ação também deve ter reflexo importante na Depleção de Recursos Abióticos – fósseis, pois a produção de diesel corresponde a 10,6% do potencial de impacto total; no Potencial de Aquecimento Global, visto que 9,5% do resultado atual está associado às emissões dos caminhões; e no Toxicidade Humana – não-câncer, para o qual a produção do diesel totaliza 4,2%.

Com relação à Escassez Hídrica, vale destacar que o consumo interno na Recicladora (“do portão ao portão”) totaliza 13,4% do potencial de impacto total. A maior parte desse potencial de impacto está relacionado ao subsistema de “eletricidade”, com 86,3%.

#### 4.4 INTERPRETAÇÃO

A fonte de dados primária mostrou-se adequada para a proposta deste estudo, principalmente por retratar as informações de gestão de produção e custos da Recicladora. Sobre sua representatividade, pode-se fazer algumas considerações com relação à possível variação observada nas informações de produção e consumo oriundas do banco de dados e que estavam disponíveis, mês a mês. Ao longo do tempo, as diferenças de consumo específico podem ter diferentes explicações: além de ajustes de parâmetros de processo, que podem levar a maior ou menor produtividade e/ou eficiência, a opção pela consolidação de um período maior de dados (12 meses) para a análise, como foi feita neste estudo, tende a oferecer maior confiabilidade, pois minimiza a chance de avaliação de pontos fora da normalidade. Ademais, seja por razões técnicas ou econômicas, enquanto algumas variáveis de produção são mais facilmente medidas e com boa precisão, como, por exemplo, o volume produzido nas diferentes etapas (*flakes*, amorfo, pós-condensado, filamentos e fibras), outras são menos precisas, como, por exemplo, os subprodutos, com grande variação de umidade, necessidade de acúmulo para permitir a quantificação de sua produção etc.

Outra característica importante do processo de medição analisado é o apontamento de consumo da matéria-prima principal, que são as garrafas PET. Este se dá basicamente pelo balanço entre a variação do estoque de matéria-prima no pátio de estocagem, as entradas (chegadas de garrafas PET) e as saídas (abastecimento da Linha de Lavagem). As entradas são bem controladas, com pesagem caminhão a caminhão, mas o apontamento do inventário estocado é estimado com base em baias de cargas descarregadas, mas que pela dinâmica de operação da fábrica podem ser consumidas parcialmente, o que leva a uma estimativa do que

resta para uso futuro. Nessa metodologia, o erro da estimativa que pode acontecer num determinado fechamento de balanço, tende a ser compensado num fechamento futuro.

A variação no consumo de eletricidade, gás natural e nitrogênio, além de ajustes do processo analisado, pode ser reflexo da variação da eficiência da sua geração, em função da carga do sistema, e/ou da metodologia de apuração de consumo das utilidades. Devido à dificuldade técnica de medição consumidor a consumidor, apropria-se o consumo de forma estimada baseada em histórico, parâmetros de processo e taxa de ocupação das diferentes fábricas; ou seja, a variação na taxa de ocupação de outras fábricas presentes na mesma unidade pode refletir em diferentes consumos apontados.

Enfim, a quantidade de informações primárias relevantes disponível associada à adoção de um período de tempo de 12 meses permitiu que o estudo fosse conduzido de forma confiável. A seleção de categorias de impacto ambiental e respectiva metodologia de AICV recomendada para o contexto brasileiro foram diferenciais para que se atingissem os objetivos do trabalho. Não somente os indicadores aos quais os cálculos conduziram, mas muito do processo de sua construção e análise, revelaram oportunidades de melhoria e de questionamento – o que acaba por ser, talvez, dos motivadores mais nobres de um estudo como este, de ACV.

Poucos são os trabalhos semelhantes no mundo, que permitam comparação direta dos resultados. Mas é necessário fazê-lo da melhor forma com aquilo que se encontra na literatura, com os recortes necessários, para validação e valorização do estudo.

A começar pelas metodologias de AICV. Este estudo demonstra os resultados para diversas categorias de impacto, selecionadas por serem as mais citadas em estudos de ACV do PET. Mas o fato de nem toda metodologia ser global, e o método utilizado para uma avaliação regional não necessariamente ter sido a utilizada para avaliar o contexto brasileiro, restringem ainda mais o número de publicações para comparação. As categorias de impacto que poderão compor o quadro comparativo são o Potencial de Aquecimento Global e a Depleção de Recursos Abióticos – fósseis (CML).

Para o presente estudo, usou-se a abordagem convencional de “*cut-off*” para definição do limite do sistema. Baseado nesse conceito, as garrafas PET pós-consumo são consideradas como resíduos, e esses não carregam nenhum ônus ambiental da primeira vida. Assim, o “berço” da segunda vida foi definido como a coleta e o transporte de garrafas PET pós-consumo.

O trabalho de Shen et al. (2010a) traz informação sobre fibras de poliéster recicladas de diferentes locais e rotas tecnológicas, com a mesma abordagem de “*cut-off*” e também outras. Assim, pode-se resgatar o impacto publicado pela autora para uma fibra obtida na Europa Ocidental, por reciclagem mecânica, equivalente à deste estudo: Potencial de Aquecimento Global de 0,96 tCO<sub>2</sub>eq. e Depleção de Recursos Abióticos – fósseis de 13 GJ. Ajustando as unidades calculadas para a Fibra de Poliéster Reciclada estudada por esta ACV, tem-se os valores de 1,22 tCO<sub>2</sub>eq. e 16,6 GJ, respectivamente. Não é possível fazer muitas justificativas sobre o porquê da diferença numérica, pois não se tem informações detalhadas do escopo da ACV. Mas podem-se ressaltar os aspectos próprios do sistema de produto avaliado neste estudo brasileiro: 1) logística de abastecimento de garrafas – enquanto neste estudo a distância média percorrida foi de 750 km, Shen et al. (2010a) cita que na Europa Ocidental essa distância varia de 300 a 400 km; 2) consumo energético do tratamento de efluentes inserido na medição do impacto; 3) tecnologia e porte da Recicladora B2F.

Para comparação com o produto virgem, é necessário mudar a abordagem sobre a carga ambiental que estaria “embutida” nas garrafas PET pós-consumo. O mesmo trabalho de Shen et al. (2010a) propõe a abordagem de “valorização do resíduo”, acrescentando ao material coletado para reciclagem a carga ambiental oriunda da produção do polímero virgem que foi transformado em garrafa, ponderada por um fator de alocação que leva em conta o preço das garrafas pós-consumo e o preço da resina virgem. Apenas para efeitos comparativos, a mesma fibra reciclada na Europa Ocidental citada pela autora passa, naquele estudo, a ter Potencial de Aquecimento Global de 2,03 tCO<sub>2</sub>eq. e Depleção de Recursos Abióticos – fósseis de 40 GJ. A fibra de poliéster virgem, citada por Shen et al. (2010a) no estudo comparativo, tem indicadores de 4,06 tCO<sub>2</sub>eq. e 95 GJ, respectivamente. Para uma comparação mais adequada, o correto, para o contexto brasileiro, seria adicionar o equivalente do polímero PET utilizado no Brasil, cuja informação não está disponível. Mas estima-se que a ordem de grandeza do impacto seja semelhante aos valores europeus (escala e tecnologia) utilizados pela autora, e dá-se por satisfeito na comparação, demonstrando que a Fibra de Poliéster Reciclado tem potencial de impacto ambiental bastante menor que a fibra virgem.

Para o B2B, Shen et al. (2012) informa que a resina PET virgem, Europa, tem Potencial de Aquecimento Global de 2,15 tCO<sub>2</sub>eq. e Depleção de Recursos Abióticos – fósseis de 68,6 GJ, enquanto a resina reciclada, no estado amorfo, Europa, pela abordagem de “*cut-off*”, teria 1,01 tCO<sub>2</sub>eq e 9,5 GJ, respectivamente. Ajustando os valores encontrados para

o PET-PCR deste estudo, teria-se 0,99 kgCO<sub>2</sub>eq. e 12,7 GJ. Semelhante ao que foi apresentado para a fibra, não é possível fazer muitas justificativas sobre o porquê da diferença numérica, pois não se tem informações detalhadas do escopo da ACV. Continuam válidas as ressalvas sobre a logística de abastecimento brasileira, além da inclusão de energia consumida no tratamento de efluentes, tecnologia e porte da Recicladora B2B etc.

Mas, de qualquer forma, com todas as particularidades que uma comparação entre ACV exige, pode-se afirmar que a ordem de grandeza dos valores de potencial de impacto encontradas neste estudo estão compatíveis com informações da literatura, e que frente aos produtos virgens, o ganho ambiental dos produtos é mais que justificado.

Para as etapas de logística de garrafas e produção de *flakes*, também é possível traçar algumas comparações com a literatura.

As informações de Arena et al. (2003) foram selecionadas para comparação. Na realidade italiana estudada pelo autor, aponta-se um indicador para o abastecimento de garrafas de 0,025 km/kg de garrafa; considerando 750 km de distância média e 8.406 kg de carga média transportada, este estudo brasileiro apresenta este indicador calculado em 0,089 km/kg, ou seja, 3,5 vezes maior. Com relação à quantidade de garrafas para produção de *flake*, o autor cita 1.320 kg de garrafa/t de *flake*, e este estudo mostrou os valores de 1.386, 1.341 e 1.209, respectivamente para produção de *flake* alimentício, técnico e verde.

As análises dos resultados das fases de ICV e AICV do B2B e B2F serão resgatadas, de forma conjunta, para que sejam identificadas as questões significativas, levando-se a conclusões e propondo-se recomendações para a melhoria ambiental.

#### 4.4.1 Identificação de *hotspots*

A Tabela 27 resume os principais fluxos de entrada e saída, com abrangência “do portão ao portão”, para os processos B2B e B2F, respeitando suas unidades funcionais.

Tabela 27 – Principais fluxos de entrada e saída, B2B e B2F – “do portão ao portão”

	<b>Unidade Funcional (un./t de PET-PCR)</b>	<b>Unidade Funcional (un./t de Fibra de Poliéster Reciclada)</b>	<b>un.</b>
<u>Consumos</u>			
garrafas PET pós-consumo	1.407	1.299	kg
recursos energéticos	12.030	15.542	MJ
água	8.536	11.722	kg
<u>Saídas</u>			
produto reciclado PET-PCR ou Fibra de Poliéster Reciclado	1.000	1.000	kg
subprodutos, oriundos das garrafas destino típico: reciclagem em outros processos (com umidade)	257	242	kg
lodos, oriundos do tratamento de efluentes destino típico: coprocessamento ou aterro sanitário (com umidade)	142	143	kg
refugos, oriundos do processamento destino típico: reciclagem em outros processos	15	79	kg

Fonte: Autor.

Avaliando a Tabela 27, cabe de início ressaltar que B2B e B2F resultam em produtos finais com aplicações diferentes e, portanto, características e processos de fabricação também distintos, embora similares com relação a condições típicas de temperatura, pressão, filtração etc., definidas pela opção do PET como matéria-prima. Os aspectos do produto final também refletem em alguns dos parâmetros apresentados no trabalho, como por exemplo o refugo do processo: enquanto os *pellets* do PET-PCR têm dimensões milimétricas, os filamentos são

conformados com diâmetro em escala micrométrica. A inclusão de cargas nas fibras, por exemplo, contribui para aumentar o desafio da conversão da matéria-prima em produto.

O consumo de garrafas reflete as características exigidas pelo produto final, bem como a qualidade da matéria-prima que é disponibilizada pelo mercado de recicláveis. Se por um lado o *flake* alimentício é o mais restritivo com relação à cor das garrafas e origem a partir de embalagens alimentícias, aquilo que é PET e é segregado pela Seleção de Garrafas na Linha de Lavagem, nas campanhas de produção desse tipo de *flake*, é reaproveitado, posteriormente, em campanhas de produção de *flakes* técnico ou verde, pois são bem tolerados na Fibra de Poliéster Reciclada. Aliás, cabe o comentário que a existência de fibras pretas ou cinzas no portfólio de produtos da empresa foi um grande diferencial para a performance da Recicladora, por serem consumidores de garrafas PET coloridas. Se não houvesse essa alternativa de aplicação interna, a aquisição de matéria-prima seria ainda mais dificultada – pois se deveria buscar apenas garrafas incolores – ou a empresa deveria passar a tratar o material colorido também como um subproduto, e revendê-lo ao mercado de recicláveis.

As características dos diferentes processos de produção B2B e B2F, usando cada um mais ou menos ciclos de aquecimento/resfriamento, aquecimento na forma de vapor etc., são o principal motivo das diferenças de consumo de energia e água. Logicamente, fatores como modernidade e atualização tecnológica das instalações, escala de produção e dimensionamento do suprimento das utilidades também contribuem para os resultados observados.

Com relação aos fluxos de saída, é importante ressaltar que alguns deles contêm uma expressiva quantidade de umidade, como por exemplo o lodo descartado do tratamento biológico de efluentes. A geração apresentada na tabela reflete as condições que foram obtidas com as tecnologias de desaguamento empregadas. O consumo de energia associado aos tratamentos internos à Unidade Recicladora está incluído nos dados de recursos energéticos apresentados como fluxo de entrada.

A Tabela 28 traz uma comparação relativa entre os resultados da AICV do B2B e do B2F, com abrangência “do berço ao portão”, para cada categoria de impacto ambiental avaliada. Mais uma vez, convém ressaltar que os resultados da Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida indicam o potencial de causar efeitos ambientais, e não a previsão de impactos reais.

Tabela 28 – Comparação Relativa, B2B e B2F – AICV, “do berço ao portão”

<b>Categoria de Impacto Ambiental</b>	<b>B2B</b>	<b>B2F</b>
Potencial de Aquecimento Global		+ 24%
Acidificação Terrestre		+ 15%
Depleção de Recursos Abióticos – elementos		+ 3%
Depleção de Recursos Abióticos – fósseis		+ 30%
Escassez Hídrica		+ 10%
Depleção da Camada de Ozônio	+ 7%	
Ecotoxicidade de água doce	=	=
Toxicidade humana – câncer		+ 28%
Toxicidade humana – não-câncer		+ 20%

Fonte: Autor.

De forma geral, observa-se que o B2F apresentou um desempenho ambiental pior para praticamente todas as categorias de impacto avaliadas, isto é, o indicador avaliado é maior que a avaliação da mesma categoria para o B2B em 7 das 9 categorias. Enquanto o B2B teve performance 7% pior frente ao B2F apenas na categoria de Depleção da Camada de Ozônio, e possa-se considerar a equivalência entre os produtos para a Ecotoxicidade de Água Doce (diferença menor que 0,5%), para todas as outras categorias o B2F foi em média 16% pior, chegando esse valor a até 30% para a Depleção de Recursos Abióticos – fósseis.

Para identificação dos *hotspots* ambientais de cada produto, B2B e B2F foram analisados individualmente, considerando a segmentação por etapas de processo (Logística de Garrafas, Linha de Lavagem, Fiação etc.) e também por subsistemas (“eletricidade”, “aquecimento” etc.). No entanto, dadas as similaridades e processos comuns, algumas das conclusões surgidas da análise individual são exploradas de forma conjunta, valendo-se também de informações do ICV para sua definição.

A Tabela 29 apresenta para o B2B e o B2F, com abrangência “do berço ao portão”, os destaques em cada categoria, considerando as etapas de produção. As etapas em que há uma concentração maior que 40% da categoria em questão, estão destacadas com cor mais escura e com diagonal dupla. Se a concentração está na faixa de 35 a 40%, o destaque está com uma cor intermediária e com diagonal simples.

Tabela 29 – Destaques da AICV, para B2B e B2F – “do berço ao portão”, por etapa

<b>B2B e B2F – etapas – concentração da categoria</b>								
<b>2 diagonais, cor escura: maior que 40%</b>								
<b>1 diagonal, cor intermediária: entre 35 e 40%</b>								
Categoria de Impacto Ambiental	B2B				B2F			
	Logística de Garrafas	Lavagem	Extrusão	Pós-condensação no Estado Sólido	Logística de Garrafas	Lavagem	Fiação	Estiragem
Potencial de Aquecimento Global		1						1
Acidificação Terrestre		1						
Depleção de Recursos Abióticos – elementos				1			1	
Depleção de Recursos Abióticos – fósseis		2						2
Escassez Hídrica		1					1	
Depleção da Camada de Ozônio				2			2	
Ecotoxicidade de água doce	2				2			
Toxicidade humana – câncer		2		1				2
Toxicidade humana – não-câncer		1						1

Fonte: Autor.

Nota: As etapas em que há uma concentração maior que 40% da categoria em questão, estão destacadas com cor mais escura e com diagonal dupla. Se a concentração está na faixa de 35 a 40%, o destaque está com uma cor intermediária e com diagonal simples.

Observa-se que, dentre os destaques onde há maior concentração, isto é, concentrações acima de 40% na etapa, a Ecotoxicidade de Água Doce está concentrada na Logística de Garrafas, em ambos os produtos, B2B e B2F. Resgatando-se as análises que já foram feitas para o ICV e a AICV, o processo associado à magnitude desse indicador é a cadeia de produção de diesel dentro do subsistema “caminhões”, identificado na ICV como maior demandante do recurso básico óleo cru. Portanto, esse será um primeiro *hotspot*.

Os demais destaques dentre as etapas de produção, na faixa entre 35 e 40% e acima de 40%, são difusos entre os produtos B2B e B2F. Por exemplo, a Linha de Lavagem não apresentou nenhum destaque por categoria para o B2F, enquanto esta etapa é a que mais tem destaques para o B2B. Sendo esse um processo comum a ambos, e considerando que os parâmetros de processo dos diferentes *flakes* demandados e produzidos não tem diferença significativa entre si, pode-se concluir que essa não similaridade de destaques seja devida às características dos processos exclusivos de cada um – Extrusão e Pós-condensação no Estado Sólido, para o B2B, e Fiação e Estiragem, para o B2F.

A Tabela 30 apresenta para o B2B e o B2F, com abrangência “do berço ao portão”, os destaques em cada categoria, considerando o agrupamento por subsistemas. Para os subsistemas em que há uma concentração maior que 50% da categoria em questão, estão destacados com cor mais escura e com diagonal dupla. Se a concentração está na faixa de 40 a 50%, o destaque está com uma cor intermediária e com diagonal simples.

Tabela 30 – Destaques da AICV, para B2B e B2F – “do berço ao portão”, por subsistema

<b>B2B e B2F– subsistemas – concentração da categoria</b>						
<b>2 diagonais, cor escura: maior que 50%</b>						
<b>1 diagonal, cor intermediária: entre 40 e 50%</b>						
<b>Categoria de Impacto Ambiental</b>	<b>B2B</b>			<b>B2F</b>		
	<b>“aquecimento”</b>	<b>“eletricidade”</b>	<b>“outros destaques”</b>	<b>“aquecimento”</b>	<b>“eletricidade”</b>	<b>“outros destaques”</b>
Potencial de Aquecimento Global	Diagonal simples (intermediária)	Diagonal simples (intermediária)		Diagonal simples (intermediária)		
Acidificação Terrestre		Diagonal dupla (escura)			Diagonal dupla (escura)	
Depleção de Recursos Abióticos – elementos		Diagonal dupla (escura)			Diagonal dupla (escura)	
Depleção de Recursos Abióticos – fósseis	Diagonal dupla (escura)			Diagonal dupla (escura)		
Escassez Hídrica		Diagonal dupla (escura)			Diagonal dupla (escura)	
Depleção da Camada de Ozônio		Diagonal dupla (escura)			Diagonal dupla (escura)	
Ecotoxicidade de água doce		Diagonal simples (intermediária)	Diagonal simples (intermediária)		Diagonal simples (intermediária)	Diagonal simples (intermediária)
Toxicidade humana – câncer	Diagonal dupla (escura)	Diagonal dupla (escura)		Diagonal dupla (escura)	Diagonal simples (intermediária)	
Toxicidade humana – não-câncer		Diagonal dupla (escura)		Diagonal simples (intermediária)	Diagonal dupla (escura)	

Fonte: Autor.

Nota: Para os subsistemas em que há uma concentração maior que 50% da categoria em questão, estão destacados com cor mais escura e com diagonal dupla. Se a concentração está na faixa de 40 a 50%, o destaque está com uma cor intermediária e com diagonal simples.

Os subsistemas “aquecimento” e “eletricidade” são os mais relevantes. Observa-se, de primeira mão, que apenas um subsistema diferente desses apresentou destaque, com participação de 40 a 50%, para a Ecotoxicidade de Água Doce. Nesse caso, foi a cadeia de produção do diesel, conforme já discutido e referenciado na avaliação da Logística de Garrafas como *hotspot*.

No mais, a análise dos destaques somente reforça a importância dos subsistemas “aquecimento” e “eletricidade”, dada a relevância da participação deles em cada categoria de

impacto ambiental analisada. Observa-se que a soma da participação desses dois subsistemas corresponde a mais de 80% do potencial de impacto para todas as categorias, a não ser a Ecotoxicidade de Água Doce, já abordada.

A representatividade da “eletricidade”, sozinha, chega a ser pelo menos da ordem de 80% e até superior, para as categorias Depleção de Recursos Abióticos – elementos, Escassez Hídrica e Depleção da Camada de Ozônio. Também é o principal destaque para Acidificação Terrestre e Toxicidade Humana – não-câncer.

O “aquecimento” tem maior participação na categoria Depleção de Recursos Abióticos – fósseis, com participação acima de 55%, e também participações importantes, acima de 40%, nas categorias Potencial de Aquecimento Global e Toxicidade Humana – câncer.

Assim, pode-se identificar os subsistemas “eletricidade” e “aquecimento” como *hotspots*. No caso do “aquecimento”, pode-se ainda fazer o paralelo com o resgate da análise do ICV, onde o principal recurso energético não-renovável consumido foi o recurso básico gás natural.

A Tabela 31 apresenta os *hotspots* identificados.

Tabela 31 – *Hotspots* identificados, para B2B e B2F

	<b>Etapa / Subsistema / Recurso</b>	<b>Categorias Principais</b>
1	Logística de Garrafas “caminhões” produção de diesel (AICV) consumo de óleo cru (ICV)	Ecotoxicidade de Água Doce
2	“aquecimento” Processos Industriais consumo de gás natural (ICV)	Depl. Recursos Abióticos – fósseis Potencial de Aquecimento Global
3	“eletricidade” Processos Industriais	Depl. Recursos Abióticos – elementos Escassez Hídrica Depl. Camada de Ozônio

Fonte: Autor.

#### 4.4.2 Propostas de melhoria

Ao longo do estudo, algumas oportunidades de melhoria no cenário de operação da Recicladora foram identificadas e devem ser exploradas, com intuito de avaliar os ganhos potenciais nos impactos ambientais associados a ações que, sem necessitar de grandes investimentos, trariam benefícios à sociedade, como, por exemplo, ganhos ambientais advindos da uniformização de procedimentos, do compartilhamento de boas práticas e que políticas públicas de incentivo à reciclagem poderiam trazer à cadeia.

Com essa premissa de desenvolvimento e implantação de ações factíveis, do ponto de vista de tecnologia disponível e recursos justificados, propõe-se dois grandes eixos para aplicação das melhores práticas vivenciadas no histórico da Recicladora em estudo: a) Saturação da capacidade produtiva e b) Melhoria na cadeia de suprimento de garrafas PET. Conforme detalhamento a seguir, a saturação da capacidade produtiva tende a resultar em ganhos na eficiência energética, atendendo diretamente aos *hotspots* ligados aos subsistemas “aquecimento” e “eletricidade”. O outro *hotspot*, referente à logística de garrafas, será abordado com o detalhamento das oportunidades identificadas nas melhores práticas de fornecimento verificadas no histórico da Recicladora.

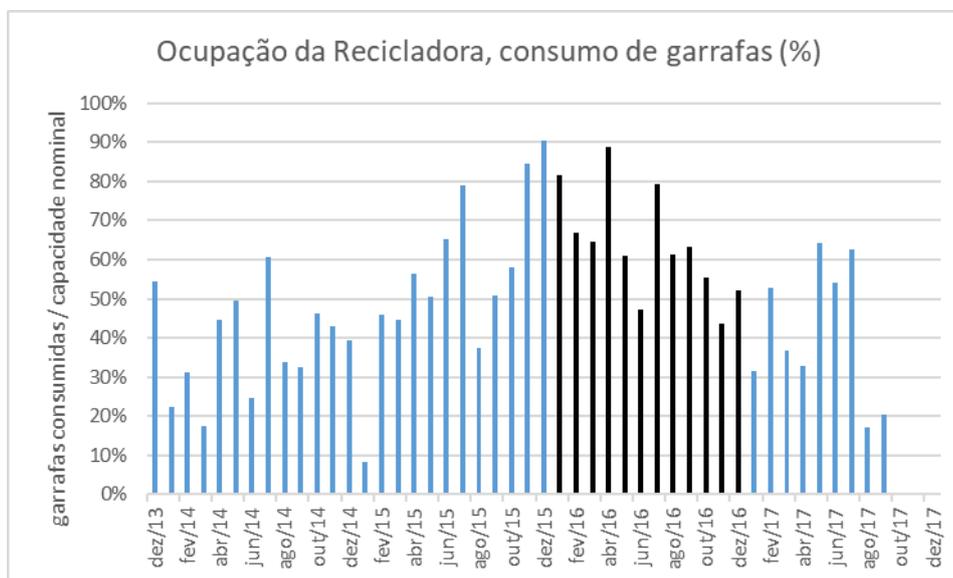
Por fim, um outro eixo também é citado, com sugestão de projetos que requerem investimentos mais pontuais e expressivos em equipamentos e sistemas, para se obter ganhos ambientais.

A quantificação da maior parte das melhorias propostas ficará para estudos futuros; neste, as justificativas para tal exploração serão fundamentadas.

##### 4.4.2.1 Saturação da capacidade produtiva

Pode-se fazer uma análise sobre a ocupação dos processos industriais. Na empresa analisada, paradoxalmente, há a disponibilidade do estado da arte na tecnologia de reciclagem mecânica, mas a não ocupação da capacidade produtiva, conforme apresentado na Figura 16. Como referência, no ano de 2016 considerado para a modelagem, o qual foi o de maior ocupação até então, a produção da Recicladora esteve abaixo de sua capacidade produtiva instalada: foi de 3.900 t de *flake* alimentício, 2.300 t de *flake* técnico, 2.700 t de *flake* verde, 3.400 t de PET-PCR B2B e 4.900 t de Fibra de Poliéster Reciclada B2F.

Figura 16 – Ocupação da Recicladora: % de garrafas consumidas frente à capacidade nominal



Fonte: Autor.

Uma vez que o Projeto de Investimento que resultou na instalação da Recicladora considerava a operação contínua da planta de forma a maximizar seu retorno, é evidente que as interrupções de produção causadas pela não disponibilidade de matéria-prima implicam em grave ineficiência que repercute no impacto ambiental.

Para construção do cenário ideal de utilização da Unidade Recicladora, imagina-se a disponibilidade de matéria-prima para operação de forma contínua, 24 h/dia, 7 dias/semana, tal qual havia sido concebido no projeto de investimento da instalação fabril. A partir de uma análise dos dados mensais disponíveis no banco de dados, os consumos energéticos ótimos referentes a esse desempenho hipotético de saturação das capacidades produtivas podem ser estimados.

O processo B2B é aquele com menor ocupação e, portanto, o que tem maior potencial em contribuir com os ganhos energéticos. Ressalta-se que o processo B2F também se beneficiaria dos ganhos advindos da saturação do B2B, pois os sistemas compartilhados operariam num regime ótimo que repercutiria positivamente, também, no consumo que é apropriado às Fibras de Poliéster Recicladas.

Avaliando a produção de cada etapa do processo B2B, mês a mês, pôde-se perceber as diferentes ocupações das linhas de produção ao longo do ano em estudo. A Tabela 32 compila

informações da variação observada, em termos relativos, referentes à produção mensal (t/mês) e ao consumo específico de eletricidade (kWh/t) e gás natural (m<sup>3</sup>/t).

Tabela 32 – Variação de produção mensal e consumos específicos das etapas B2B, no período avaliado

	relação valor de pico mensal / valor médio anual		
	produção	eletricidade	gás natural
Linha de Lavagem	+ 37,5%	- 14,2%	- 36,2%
Extrusão	+ 50,0%	- 9,3%	X
Pós-condensação	+ 82,0%	- 23,4%	- 13,8%

Fonte: Autor.

De forma conservadora, assume-se que a produção máxima mensal real observada no ano seria a referência de limite produtivo para um primeiro estudo de saturação, deixando para um momento posterior a possível comparação com a capacidade nominal de cada linha de produção. A ocupação da planta, nesta premissa, já levaria a ganhos de eficiência com a redução de lançamentos, paradas e transições de produto. Por este motivo, espera-se que a saturação das capacidades da linha leve à redução do consumo específico de eletricidade e gás natural.

A avaliação para os consumos específicos de eletricidade e gás natural também é conservadora, pois assume-se que o mínimo consumo específico de eletricidade real observado no ano seria a referência de limite de eficiência dessas utilidades, deixando de lado, pelo menos, os ganhos que seriam oriundos da maior ocupação da planta, que como já dito levaria a ganhos de eficiência com a redução de lançamentos, paradas e transições de produto.

Ressalta-se, também, que a ociosidade das demais plantas de produção que estão na mesma unidade e compartilham utilidades com a Recicladora interfere no comportamento do consumo específico das utilidades, visto que a) alguns consumos são apropriados de acordo com critérios de alocação, e não propriamente através de medições diretas, b) afeta a eficiência de sistemas de geração de utilidades centrais e c) há necessidade de rateio de consumos fixos que são independentes dos sistemas diretos de fabricação, como por exemplo Tratamento de Efluentes, Iluminação e Administração.

#### 4.4.2.2 Melhoria na cadeia de suprimento de garrafas PET

As características reais que devem ser resgatadas do histórico de operações com este tipo de matéria-prima, para balizar as propostas de melhoria, são:

- a distância média de abastecimento, de 750 km;
- a carga média transportada, de 8.406 kg por viagem;
- utilização típica de caminhões do tipo *truck*, com mais de 20 anos de uso;
- conteúdo de material contaminante, nos fardos de garrafa: papelão, rafia, arames, outras embalagens não-PET, além de sujeira remanescente dos conteúdos originais e agregados no manuseio desde o descarte;
- formato e tamanho dos fardos: “quadrados” ou “retangulares”, variando de 80 a 300 kg; o peso médio (típico) de um fardo é da ordem de 150 kg.

Para a finalidade de obter ganhos na cadeia de suprimento, várias frentes de atuação podem ser adotadas: menores rotas de coleta da matéria-prima, caminhões adequados, melhoria da qualidade dos fardos de garrafas PET prensadas (menos contaminantes) e padronização do tamanho dos fardos, para melhor acomodação da carga no veículo de transporte, sem comprometer o processo produtivo.

À época do Projeto de Investimento, imaginava-se que os limites que justificariam financeiramente a operação de transporte das garrafas seriam da ordem de 500 km de distância. E que, devido ao consumo específico de PET da população brasileira, à demografia e ao incentivo fiscal que favoreceria o consumo de material oriundo de Minas Gerais, as regiões de atuação seriam, no limite, as de Belo Horizonte, de Uberlândia e de Juiz de Fora, além, logicamente, do entorno de Poços de Caldas.

Uma das surpresas desde o início da operação da Recicladora foi a distância de alguns fornecedores de garrafas. A avaliação do histórico de carregamentos recebidos revelou uma quantidade expressiva e recorrente de cargas das regiões Nordeste, Centro-Oeste e mesmo Norte, com distâncias que ultrapassam os 2.000 km.

Uma vez que a realidade nacional de coleta de resíduos sólidos urbanos ainda está aquém do desejável, não há dúvida que o incremento nas práticas que levem à maior oferta de material reciclável nas localidades tende a evitar o fenômeno de que parte dos materiais recicláveis viajem tanto, e mesmo assim uma parcela significativa continue sendo direcionada a aterros ou lixões, ou abandonados em locais baldios.

Com relação à qualidade dos fardos, além do óbvio impacto de contaminação da carga com materiais indevidos na origem da coleta, algumas boas práticas de amarração e uso de equipamentos adequados devem ser incentivadas para evitar o uso de papelões e capas de rafia no envelopamento dos fardos. Pelos indicadores levantados neste estudo, pode-se considerar que as perdas (massa de material comprado como fardo de garrafa PET prensada, mas que não é convertido em *flake* no final da Linha de Lavagem), numa média geral, são da ordem de 29%. Entrevistas com o pessoal envolvido diretamente na operação apontam que o *benchmark* para este parâmetro seria de 25%, atingido por alguns fornecedores que reputam ter maior controle do material que o adquirem para revenda, e equipamentos de prensagem adequados e bem mantidos.

Também há potencial de otimização do tamanho dos fardos. O uso de prensas adequadas para formação dos fardos é uma condição básica para que a ocupação dos caminhões seja otimizada. Observa-se uma variação muito grande nas dimensões e consequentemente nas densidades dos fardos de garrafas PET prensadas, em função das prensas e técnicas utilizadas na etapa de prensagem, o que acaba por influenciar na acomodação da carga na carroceria do veículo de transporte e, assim, impactando na eficiência do transporte. No histórico da empresa, observa-se que fardos grandes, da ordem de 300 kg e no formato “retangular”, são os que otimizam o transporte e a alimentação da fábrica.

Com relação ao tipo de caminhão, veículos maiores e mais modernos, com manutenção adequada, tendem a gerar menor impacto ambiental por volume transportado. Historicamente, são basicamente três os tipos de caminhões mais utilizados: *trucks*, carretas e *siders*. A opção por um ou outro modelo recai no custo do frete, disponibilidade do transportador e até mesmo nas condições de acesso do veículo ao local de coleta. Através de entrevistas com pessoal envolvido, observações de campo e avaliação de registros de pesagem em balança rodoviária da empresa, chegou-se ao modelo de veículo que representaria o modo desejado de logística. O veículo desejado para o transporte “ótimo” deste tipo de carga seria uma carreta, que pesa entre 13 e 14 t (vazia), e com até 20 anos de idade. Como referência, se fosse transportar resina PET, transportaria 25 t de produto. Portanto, tem pelo menos 38 a 39 t de peso bruto. O motivo da escolha deste porte de veículo é a constatação da maior capacidade de transporte, já praticada por alguns fornecedores. Com relação à idade do veículo, certamente seria desejável que fosse a menor possível, mas a realidade econômica

dos negócios no país aponta que a proposta de frota com até 20 anos de idade seria factível, por ser praticada por transportadoras com boa gestão. Como *benchmark*, portanto, a melhor referência seria o uso de carretas, que transportariam 15 t de fardos de garrafas retangulares de 300 kg cada.

#### 4.4.2.3 Outras possibilidades de ganhos ambientais

Outros ganhos ambientais podem ser explorados, diante do estudo que foi feito, mediante investimento em equipamentos e sistemas, como por exemplo:

- Energia: redimensionamento dos sistemas de utilidades, podendo explorar o conceito de fornecimento dedicado, que traria ganhos na distribuição dos fluidos pela localização mais próxima do consumidor, e com a adequação do porte do sistema. O aproveitamento da estrutura existente pode ter feito sentido para a implantação do Projeto, para aumentar sinergia, minimizar investimento etc., mas individualização e independência merecem estudo e avaliação:
  - Adequação de sistemas de geração de vapor e aquecimento de fluido térmico, otimizando-os para as condições de consumo.
  - Adequação de sistemas de ar comprimido e resfriamento, ao porte demandado.
- Instalação de um sistema de geração de eletricidade fotovoltaica, local e dedicada ao suprimento ainda que parcial da planta.
- Processamento interno dos subprodutos e refugos gerados.
- Adequação da estação de tratamento de efluentes, reavaliando o porte e considerando a possibilidade de uma etapa anaeróbia, além de buscar ganhos na separação de sólidos.
- Utilização de transporte pneumático de produtos intermediários, em substituição à movimentação dos mesmos por empilhadeiras.
- Aumentar a utilização da água reciclada, atualmente disponível e com oferta.
- Adequar/atualizar a tecnologia B2F, que é “antiga”, e não tão moderna ou performante quanto a B2B.

#### 4.4.3 Análise de sensibilidade: melhoria na Logística de Garrafas

Como análise de sensibilidade para a ACV desenvolvida, são quantificados os ganhos ambientais resultantes de alterações na Logística de Garrafas. A escolha pelo foco nesta etapa é motivada pelo referencial de possibilidades de melhorias identificadas na prática operacional, em que se considera a padronização de dimensões e formato de fardo em conjunto com a utilização de outro tipo de veículo, e pela comparação realizada com estudos de outros países, em que constatou-se a maior distância de transporte praticada no Brasil.

Para atender os parâmetros de *benchmark* descritos no item 4.4.2.2 – “Melhoria na cadeia de suprimentos de garrafas PET”, no modelo do *software* GaBi considerou-se como veículo **GLO: Truck-trailer, diesel driven, Euro 2, 34-40t gross weight/27 payload capacity**, o qual cumpre os requisitos de transporte de 15 t de carga e tem da ordem de 20 anos de idade.

Assumindo que a distância de coleta das garrafas PET seja reduzida para 400 km, baseado na maior distância de referência de Shen et al. (2010a) para a Europa Ocidental, os parâmetros de frete-retorno, utilização da capacidade de carga e tipos de via também devem ser revistos. Mantidas as considerações do item 4.1.2.7 – “Pressupostos”, e baseado no banco de dados de recebimentos de garrafas por origem, os seguintes parâmetros são obtidos:

- 41% de todas as cargas seriam referentes a uma distância menor que 150 km, e 59% entre 150 e 400 km, o que resulta na definição de 70% das viagens sem a modalidade de frete-retorno. Para a modelagem, portanto, implica em um parâmetro de utilização de 0,36;
- Composição dos tipos de via: 58,8% autoestrada, 30,0% rural e 11,2% urbana.

As demais condições do modelo original foram mantidas, como por exemplo as características do diesel.

Como resultado das alterações de parâmetros da Logística de Garrafas propostas, o consumo de diesel por t de garrafa passa a ser de 10,2 kg. No cenário original de estudo, este consumo foi de 28 kg de diesel/t de garrafa. Esta diminuição no consumo específico do combustível do veículo repercute em toda ACV, conforme apresentado nas Tabelas 33 a 36.

Tabela 33 – Impacto da melhoria na Logística de Garrafas, no ICV, “do portão ao portão”

	unidade	cenário original	novo cenário	relação novo/original	
<b><u>Consumo de diesel</u></b>					
<b>Logística de Garrafas</b>	kg/t de garrafa	28,0	10,2	36,4%	
<b>B2B</b>	kg/t de PET-PCR	40,3	15,2	37,7%	
<b>B2F</b>	kg/t de Fibra de Poliéster Reciclada	37,3	14,2	38,1%	
<b><u>Consumo de Recursos Energéticos</u></b>					
<b>B2B</b>	“caminhão”	MJ	1.651	602	36,4%
	<b>total</b>	MJ	12.030	10.980	91,3%
<b>B2F</b>	“caminhão”	MJ	1.524	555	36,4%
	<b>total</b>	MJ	15.542	14.573	93,8%

Fonte: Autor.

Observa-se, na Tabela 33, que a redução do consumo de diesel por t de garrafa transportada, a 36,5% do valor original, repercutiu em ganhos da mesma magnitude para os produtos B2B e B2F – 37,7% e 38,1%, respectivamente. Do ponto de vista do consumo total de recursos energéticos, o B2B apresentou redução de 8,7% e o B2F apresentou redução de 6,2%, como resultado das melhorias da Logística de Garrafas.

Tabela 34 – Impacto da melhoria na Logística de Garrafas, no ICV, “do berço ao portão”

		unidade	cenário original	novo cenário	relação novo/original
<b>Consumo de Recursos Energéticos Não-renováveis</b>					
<b>Flake Alimentício</b>	<b>Gás Natural</b>	kg/t de <i>flake</i>	111,6	109,9	98,5%
	<b>Óleo Cru</b>	kg/t de <i>flake</i>	49,7	23,9	48,1%
<b>Flake Técnico</b>	<b>Gás Natural</b>	kg/t de <i>flake</i>	106,5	104,9	98,5%
	<b>Óleo Cru</b>	kg/t de <i>flake</i>	48,3	23,4	48,4%
<b>Flake Verde</b>	<b>Gás Natural</b>	kg/t de <i>flake</i>	109,2	107,8	98,7%
	<b>Óleo Cru</b>	kg/t de <i>flake</i>	44,3	21,8	49,2%
<b>B2B</b>	<b>Gás Natural</b>	kg/t de PET-PCR	207,9	206,3	99,2%
	<b>Óleo Cru</b>	kg/t de PET-PCR	66,9	40,7	60,8%
	<b>total</b>	kg/t de PET-PCR	318	290	91,2%
<b>B2F</b>	<b>Gás Natural</b>	kg/t de Fibra de Poliéster Reciclada	299,4	297,9	99,5%
	<b>Óleo Cru</b>	kg/t de Fibra de Poliéster Reciclada	64,1	39,9	62,2%
	<b>total</b>	kg/t de Fibra de Poliéster Reciclada	401	375	93,5%

Fonte: Autor.

Com relação aos recursos energéticos não-renováveis, “do berço ao portão”, a Tabela 34 mostra a predominância da redução no consumo de Óleo Cru para todos os tipos de *flake*, variando de 48,1% a 49,2% dos valores originais. Nos produtos reciclados finais, B2B e B2F, a redução do consumo deste recurso energético não-renovável (Óleo Cru) chega a 39,2% e 37,8%, respectivamente.

Tabela 35 – Impacto da melhoria na Logística de Garrafas, na AICV do B2B, “do berço ao portão”

categoria de impacto ambiental	unidade	cenário original	novo cenário	relação novo/original
Potencial de Aquecimento Global	kgCO <sub>2</sub> eq	986	901	91,3%
Acidificação Terrestre	kgSO <sub>2</sub> eq	3,34	3,22	96,4%
Depleção de Recursos Abióticos – elementos	kgSbeq	1,65 x 10 <sup>-4</sup>	1,63 x 10 <sup>-4</sup>	98,8%
Depleção de Recursos Abióticos – fósseis	MJ	12.773	11.594	90,8%
Escassez Hídrica	m <sup>3</sup> eqmundial	173,1	173,0	99,9%
Depleção da Camada de Ozônio	kgR11eq	2,21 x 10 <sup>-10</sup>	2,21 x 10 <sup>-10</sup>	100,0%
Ecotoxicidade de água doce	CTU <sub>e</sub>	2,43	1,69	69,5%
Toxicidade humana – câncer	CTU <sub>h</sub>	1,88 x 10 <sup>-7</sup>	1,87 x 10 <sup>-7</sup>	99,5%
Toxicidade humana – não-câncer	CTU <sub>h</sub>	4,12 x 10 <sup>-9</sup>	3,93 x 10 <sup>-9</sup>	95,4%

Fonte: Autor.

Tabela 36 – Impacto da melhoria na Logística de Garrafas, na AICV do B2F, “do berço ao portão”

categoria de impacto ambiental	unidade	cenário original	novo cenário	relação novo/original
Potencial de Aquecimento Global	kgCO <sub>2</sub> eq	1.218	1.140	93,6%
Acidificação Terrestre	kgSO <sub>2</sub> eq	3,83	3,72	97,1%
Depleção de Recursos Abióticos – elementos	kgSbeq	1,70 x 10 <sup>-4</sup>	1,68 x 10 <sup>-4</sup>	98,8%
Depleção de Recursos Abióticos – fósseis	MJ	16.576	15.488	93,4%
Escassez Hídrica	m <sup>3</sup> eqmundial	189,8	189,6	99,9%
Depleção da Camada de Ozônio	kgR11eq	2,06 x 10 <sup>-10</sup>	2,06 x 10 <sup>-10</sup>	100,0%
Ecotoxicidade de água doce	CTU <sub>e</sub>	2,42	1,73	71,5%
Toxicidade humana – câncer	CTU <sub>h</sub>	2,42 x 10 <sup>-7</sup>	2,41 x 10 <sup>-7</sup>	99,6%
Toxicidade humana – não-câncer	CTU <sub>h</sub>	4,95 x 10 <sup>-9</sup>	4,77 x 10 <sup>-9</sup>	96,4%

Fonte: Autor.

As Tabelas 35 e 36 apresentam a variação na AICV para os produtos B2B e B2F, decorrentes da modificação proposta para a Logística de Garrafas. Para ambos, observa-se que o maior destaque é a redução da ordem de 30% do potencial de impacto na categoria Ecotoxicidade de Água Doce. Em seguida, as categorias de impacto com maior redução são a Depleção de Recursos Abióticos – fósseis e o Potencial de Aquecimento Global. Para o B2B, o potencial de impacto passaria a ser de 90,8% e 91,3% dos originais, respectivamente. Para o B2F, os ganhos proporcionais seriam um pouco menores: 93,4% e 93,6% dos originais, respectivamente. As categorias de impacto Escassez Hídrica e Depleção da Camada de Ozônio são as menos sensíveis para a melhoria na Logística de Garrafas, e permaneceriam praticamente inalteradas com a modificação no transporte da matéria-prima, para ambos os produtos.

Desta forma, constata-se que, se for possível estender a melhor prática testemunhada na operação da Recicladora, adotada por alguns fornecedores, de confecção de fardos de garrafa PET prensadas e utilização de veículo mais adequado para o transporte, e se a distância de busca da matéria-prima para suprimento das necessidades tiver o padrão europeu mais conservador, ganhos ambientais relevantes são alcançados, sem a necessidade de investimentos de capital robustos.

## 5 CONCLUSÃO

Nesta ACV foram avaliados os impactos ambientais da reciclagem de garrafas PET pós-consumo em contexto brasileiro, para as alternativas de Resina PET-PCR Grau Alimentício (processo B2B) e Fibras Cortadas de Poliéster Recicladas (processo B2F), utilizando dados primários reais de uma Unidade Recicladora localizada em Poços de Caldas-MG. A planta avaliada dispõe de tecnologia de reciclagem “grau alimentício” de ponta no segmento, além de englobar gestão e processos industriais robustos e diferenciados, como por exemplo o tratamento de efluentes e reciclagem de água.

Se, por um lado, as viabilidades legal e técnica de reciclagem de garrafas PET pós-consumo em novas embalagens alimentícias (“ciclo fechado”) é algo relativamente recente no país, a sua reciclagem em artigos têxteis (“ciclo aberto”) é praticada há algumas décadas e mostra-se oportuna para absorção de embalagens de destinação mais difícil para uma segunda vida, como por exemplo as garrafas PET coloridas. Assim, ambas as rotas de reciclagem estudadas neste trabalho mostraram-se complementares para a gestão da fração PET dos resíduos sólidos urbanos, e o conhecimento sobre seus impactos e identificação de oportunidades de melhoria são uma necessidade para os agentes da cadeia.

Para a Avaliação do Ciclo de Vida, selecionaram-se categorias de impacto ambiental pertinentes ao tema, através de pesquisa de outros estudos de ACV, em suas mais diferentes abordagens, ligados à reciclagem de garrafas PET. Para cálculos apropriados dos impactos associados às categorias de caráter regional, buscaram-se metodologias de AICV recomendadas para o contexto brasileiro. Por fim, a ACV das rotas B2B e B2F neste estudo contemplou as categorias e metodologias: Potencial de Aquecimento Global (CML), Acidificação Terrestre (ReCiPe), Depleção de Recursos Abióticos – elementos e fósseis (CML), Escassez Hídrica (AWARE), Depleção da Camada de Ozônio (CML), Ecotoxicidade de água doce (USEtox) e Toxicidade humana – câncer e não-câncer (USEtox).

O estudo de cada etapa dos processos de reciclagem, considerando como “berço” a Logística de Garrafas, e seguindo pelas etapas industriais de descontaminação e transformação do material pós-consumo até a forma final dos produtos reciclados no “portão” de saída da Unidade Recicladora (grãos para indústria de embalagens ou fibras para indústria têxtil), permitiu que diferentes sistemas de produto pudessem ser avaliados e que

comparações fossem feitas, entre os processos de reciclagem B2B e B2F, e também com relação a outros estudos.

O B2F mostrou-se com maior potencial de impacto para a maioria das categorias avaliadas, e na seguinte proporção superior ao B2B: Depleção de Recursos Abióticos – fósseis – 30%; Toxicidade humana – câncer – 28%; Potencial de Aquecimento Global – 24%; Toxicidade humana – não-câncer – 20%; Acidificação Terrestre – 15%; Escassez Hídrica – 10%; e Depleção de Recursos Abióticos – elementos – 3%. A categoria Ecotoxicidade de água doce pode ser considerada equivalente para ambos, pois a diferença encontrada entre eles foi menor que 0,5%. A única categoria em que o B2B teve potencial de impacto maior que o B2F foi a Depleção da Camada de Ozônio, com 7% a maior. A principal justificativa para as diferenças observadas é a aplicação final de cada produto reciclado, que implica em requisitos específicos de dimensões e propriedades e, portanto, requer distintas etapas de processamento, com consumos próprios de materiais e energia.

Com todas as ressalvas que uma comparação entre resultados de ACV exige, pode-se afirmar que, no Brasil: a) a distância percorrida pelas garrafas PET pós-consumo rumo à reciclagem está muito superior a referências internacionais, b) que a ordem de grandeza dos valores de potencial de impacto encontradas neste estudo para as categorias selecionadas estão compatíveis com informações da literatura, e c) que frente aos produtos virgens, o ganho ambiental dos produtos reciclados é mais que justificado.

A comparação das distâncias de transporte de garrafas até a Unidade Recicladora permite a constatação da necessidade de melhoria neste quesito. Enquanto neste estudo de caso brasileiro, a distância média encontrada foi de 750 km e com carga média transportada de 8.406 kg, resultando num indicador de 0,089 km/kg de garrafa, as referências encontradas na literatura foram de distâncias que variavam de 100 a 350 km em Taiwan, e 300 a 400 km na Europa Ocidental (Shen et al., 2010a) e um indicador de 0,025 km/kg de garrafa, para a Itália (Arena et al., 2003).

Com relação à quantidade de garrafas para produção de *flake*, os valores encontrados neste estudo, de 1.386, 1.341 e 1.209 kg de garrafa/t de *flake*, para produção de *flake* alimentício, técnico e verde, respectivamente, são bastante aderentes a Arena et al. (2003), que cita 1.320 kg de garrafa/t de *flake*.

Comparou-se o Potencial de Aquecimento Global e a Depleção de Recursos Abióticos – fósseis a outros estudos disponíveis, para produtos semelhantes. Para o B2B, conclui-se que os valores encontrados para o PET-PCR deste presente estudo são da mesma ordem de grandeza que os citados por Shen et al. (2012), para uma resina no estado amorfo, produzida na Europa (uma etapa de produção a menos que a do estudo brasileiro): para o Potencial de Aquecimento Global e a Depleção de Recursos Abióticos – fósseis, respectivamente, tem-se 1,01 tCO<sub>2</sub>eq e 9,5 GJ para o estudo europeu, e 0,99 kgCO<sub>2</sub>eq. e 12,7 GJ para o caso estudado nesta ACV. Há que se ressaltar que, no caso brasileiro, a resina reciclada foi ainda pós-condensada, isto é, passou por uma etapa a mais de processamento, para atingir as propriedades mecânicas do produto virgem grau garrafa.

Para o B2F, a comparação com fibra obtida por reciclagem mecânica, na Europa Ocidental, citada por Shen et al. (2010a) e equivalente à deste estudo, mostrou valores de 0,96 tCO<sub>2</sub>eq e 13 GJ para o estudo europeu, para as categorias de Potencial de Aquecimento Global e Depleção de Recursos Abióticos – fósseis, respectivamente, enquanto encontrou-se 1,22 kgCO<sub>2</sub>eq. e 16,6 GJ para este estudo brasileiro. Uma possível justificativa para a diferença a maior para a fibra brasileira é a desatualização tecnológica do processo B2F estudado.

Após análise do ICV e da AICV, avaliando etapa a etapa e subsistema a subsistema, identificou-se como *hotspots* os consumos de óleo diesel pelos caminhões, e de gás natural e eletricidade nos processos industriais. Baseado nesses *hotspots*, mas não se limitando a eles, algumas oportunidades de melhoria ambiental no cenário de operação da Recicladora foram identificadas, a partir das informações coletadas e analisadas para a ACV.

Especificamente para atuação na cadeia de suprimento de garrafas PET pós-consumo, apontam-se possibilidades de atuação com relação ao formato, peso e qualidade dos fardos, bem como na indicação de tipo de veículo que resultam na otimização desta etapa, baseados na experiência acumulada da Recicladora. Associadas à busca por rotas menores de abastecimento, estas ações diminuem o consumo de diesel dos sistemas de produto avaliados na ACV. A análise de sensibilidade utilizando a distância de 400 km para coleta, e carretas com até 20 anos transportando 15 t de fardos retangulares de 300 kg de garrafas prensadas, mostrou ganhos ambientais consideráveis, principalmente para as categorias Ecotoxicidade de água doce (B2B: -30,5% e B2F: -28,5%), Depleção de Recursos Abióticos – fósseis (B2B: -9,2% e B2F: -6,6%) e Potencial de Aquecimento Global (B2B: -8,7% e B2F: -6,4%).

Para a melhoria do consumo energético dos sistemas de produto B2B e B2F, identificou-se a ociosidade da Unidade Recicladora por falta de matéria-prima como primeiro foco a ser abordado. A maior ocupação da planta levaria a ganhos de eficiência, com a redução de lançamentos, paradas e transições de produto, resultando na redução do consumo específico de eletricidade e gás natural. Esta ação vai ao encontro da necessidade de correta destinação das garrafas PET pós-consumo descartado, tendo em vista a enorme quantidade de material que ainda é encaminhado para aterros ou lixões, ou é abandonado no ambiente.

A não-saturação da capacidade de reciclagem de PET instalada no país mostra a necessidade de evolução do mercado de reciclagem do Brasil, que requer uma política pública de incentivo à Coleta Seletiva, mas também exige uma visão mais sistêmica da problemática. É característico o conflito de interesses entre os comerciantes de recicláveis, que dominam o mercado, e os catadores autônomos, cooperativas e redes de cooperativas, com suas dificuldades de organização e que não conseguem suprir diretamente as Indústrias.

O poder público também tem a oportunidade de reavaliar tributação e incentivos, de forma que a iniciativa privada possa atuar de maneira mais segura, tanto com investimentos em processos que demandem material reciclável, como atuando, por exemplo, na implantação de Centrais Mecanizadas de Resíduos Sólidos Urbanos, que agreguem valor ao material coletado (oferta e qualidade).

A ACV realizada cumpre seu papel ao disponibilizar dados adequados à realidade brasileira da reciclagem mecânica de garrafas PET pós-consumo, não só contribuindo para diminuir a lacuna de informações sobre o tema, mas também deixando trilhas para que estudos de aprofundamento e variações se desenvolvam. Espera-se que o estudo possa contribuir com a discussão da necessidade de interação dos que atuam na cadeia de sustentabilidade ambiental do PET – empresas e entidades envolvidas na produção, consumo e reciclagem – desde o projeto das embalagens até as particularidades do descarte e coleta, e seus impactos na reciclabilidade do produto.

## REFERÊNCIAS

- ABIPET. Abertura do Evento e dados do mercado. *In*: PETTALK – CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DA INDÚSTRIA DO PET, 2019, São Paulo. **Palestras**. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/pettalk/index.html?method=mostrarInstitucional&id=320>. Acesso em: 08 abr. 2019.
- ABIPLAST. **PERFIL 2018**. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil2018/>. Acesso em: 18 ago. 2019.
- ALTUN, S.; AKAL-SOLMAZ, S. K.; USTUN, G. E.; et al. Life Cycle Assessment of direct and extrusion spinning: a case study. **Fresenius Environmental Bulletin**, Vol. 27, Ed. 2, p. 787-792. 2018.
- AMIENYO, D.; GUJBA, H.; STICHNOTHE, H.; AZAPAGIC, A. Life cycle environmental impacts of carbonated soft drinks. **International Journal of Life Cycle Assessment**, Assess 18:77–92. 2013.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-012-0459-y>
- ARENA, U.; MASTELLONE, M.; PERUGINI, F. Life Cycle Assessment of a Plastic Packaging Recycling System. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 8(2) p. 92-98. 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14040: 2009: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2009a. 21 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14044: 2009: gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2009b. 46 p.
- BARROS, M.V.; SALVADOR, R.; PIEKARSKI, C.M.; DE FRANCISCO, A.C. Mapping of main research lines concerning life cycle on packaging systems in Brazil and in the world. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 24 p. 1429-1443. 2019.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-018-1573-2>
- BORODIN, Y. V.; ALIFEROVA, T. E.; NCUBE, A. Waste management through life cycle assessment of products. **International Scientific Conference On Radiation-Thermal Effects And Processes In Inorganic Materials**, Vol. 81 artigo: 012085. 2015
- CAMPOLINA, J. M.; SIGRIST, C. S. L.; MORIS, V. A. S. Uma revisão de literatura sobre *softwares* utilizados em estudos de Avaliação do Ciclo de Vida. **REGET/UFMS - Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 735-750. 2015.
- CHEHEBE, J.R.B. **Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Ed., CNI, 1997.

CHEN, L.; PELTON, R. E. O.; SMITH, T. M. Comparative life cycle assessment of fossil and bio-based polyethylene terephthalate (PET) bottles. **Journal of Cleaner Production**, 137:667–676. 2016  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.094>

CHERUBINI, E.; RIBEIRO, P. T. **Diálogos Setoriais Brasil e União Europeia: desafios e soluções para o fortalecimento da ACV no Brasil**. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, Ibict, 2015.

CHILTON, T.; BURNLEY, S.; NESARATNAM, S. A life cycle assessment of the closed-loop recycling and thermal recovery of postconsumer PET. **Resources, Conservation and Recycling**, 54:1241–1249. 2010.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.04.002>

CZAPLICKA-KOLARZ, K.; BURCHART-KOROL, D.; KOROL, J. Application of Life Cycle Assessment and Exergy to Environmental Evaluation of Selected Polymers. **Polimery**, Vol. 58, Ed. 7-8, p. 605-609. 2013

DOS SANTOS, L. **Análise do ciclo de vida do polietileno tereftalato pós-consumo reciclado**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alfenas – Campus Poços de Caldas-MG, 2015.

FOOLMAUN, R. K.; RAMJEEAWON, T. Disposal of post-consumer polyethylene terephthalate (PET) bottles: comparison of five disposal alternatives in the small island state of Mauritius using a life cycle assessment tool. **Environmental Technology**, 33:563–572. 2012a.  
<https://doi.org/10.1080/09593330.2011.586055>

FOOLMAUN, R. K.; RAMJEEAWON, T. Comparative life cycle assessment and life cycle costing of four disposal scenarios for used polyethylene terephthalate bottles in Mauritius. **Environmental Technology**, 33:2007–2018. 2012b  
<https://doi.org/10.1080/09593330.2012.655321>

FORMIGONI, A.; RODRIGUES, E. **A Busca pela Sustentabilidade do PET, através da Sustentabilidade da Cadeia de Suprimentos**. 2009.  
2nd International Workshop Advances in Cleaner Production, Key Elements for a Sustainable World: Energy, Water and Climate Change  
São Paulo – Brazil – May 20th-22nd - 2009

GLOBALPET. Globalpet – Desenvolvendo o futuro. *In*: PETTALK – CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DA INDÚSTRIA DO PET, 2019, São Paulo. **Palestras**. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/peptalk/index.html?method=mostrarInstitucional&id=320>. Acesso em: 08 abr. 2019.

GOMES, T.S.; VISCONTE, L.L.Y.; PACHECO, E.B.A.V. Life Cycle Assessment of Polyethylene Terephthalate packaging: an overview. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 27, p. 533-548. 2019  
<https://doi.org/10.1007/s10924-019-01375-5>

GUINÉE, J.B. **Handbook on Life Cycle Assessment: operational guide to the ISO Standards**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Manual do Sistema ILCD – Sistema Internacional de Referência de Dados do Ciclo de Vida de Produtos e Processos**. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, Ibict, 2014.

INTINI, F.; KÜHTZ, S. Recycling in buildings: an LCA case study of a thermal insulation panel made of polyester fiber, recycled from post-consumer PET bottles. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 16:306–315. 2011.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-011-0267-9>

KEANE, M. A. **Catalytic conversion of waste plastics: focus on waste PVC**. 2007.

MADIVAL, S.; AURAS, R.; SINGH, S. P.; NARAYAN, R. Assessment of the environmental profile of PLA, PET and PS clamshell containers using LCA methodology. **Journal of Cleaner Production**, 17:1183–1194. 2009.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.03.015>

MAGRINI, A. et al. **Impactos ambientais causados pelos plásticos: uma discussão científica a respeito dos fatos e dos mitos**. Rio de Janeiro: E-papers, 2012. cap. 1.3, p. 22-27; cap. 7.3, 7.4 e 7.5, p. 225-245; cap. 7.7, p. 267-271.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, 26(1), p. 160-175. 2016.

MESQUITA, L. et al. **Inventário do ciclo de vida do pellet PET-PCR (pós-consumo reciclado) segundo as condições brasileiras**. 2014.

IV CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE GESTÃO PELO CICLO DE VIDA  
9 a 12 de novembro de 2014 São Bernardo do Campo – SP – Brasil

MOURAD, A.L.; GARCIA, E.E.C., VILHENA, A. **Avaliação do Ciclo de Vida: princípios e aplicações**. Campinas: CETEA/CEMPRE, 2002.

NAKANISHI, E.; ISOBE, S.; TAKAMATSU, T.; YASUOKA, H.; ITOH, H.; KUMAZAWA, H. Specification environment load for disposed plastics products in LCA. **Kagaku Kogaku Ronbunshu**, Vol. 23, Ed. 2, p. 137-142. 1997.

NAKATANI, J.; FUJII, M.; MORIGUCHI, Y.; HIRAO, M. Life-cycle assessment of domestic and transboundary recycling of postconsumer PET bottles. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 15:590–597. 2010.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-010-0189-y>

PIEKARSKI, C. M.; DA LUZ, L. M.; ZOCHE, L., DE FRANCISCO, A. C. Métodos de avaliação de impactos do ciclo de vida: uma discussão para adoção de métodos nas especificidades brasileiras. **Revista Gestão Industrial**, Vol. 08, n. 03, p. 222-240. 2012

PLASTICSEUROPE. **Plastics – the facts 2017**. Disponível em:

[https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics\\_the\\_facts\\_2017\\_FINAL\\_for\\_website\\_one\\_page.pdf](https://www.plasticseurope.org/application/files/5715/1717/4180/Plastics_the_facts_2017_FINAL_for_website_one_page.pdf). Acesso em: 10 jun. 2019.

ROMERO-HERNÁNDEZ, O.; ROMERO HERNÁNDEZ, S.; MUÑOZ, D.; DETTASILVEIRA, E.; PALACIOS-BRUN, A.; LAGUNA, A. Environmental implications and market analysis of soft drink packaging systems in Mexico. A waste management approach. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 14:107–113. 2009. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0053-5>

SALEH, Y. Comparative life cycle assessment of beverages packages in Palestine. **Journal of Cleaner Production**, 131:28–42. 2016 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.080>

SHEN, L., NIEUWLAAR, E.; WORRELL, E.; PATEL, M. K. Life cycle energy and GHG emissions of PET recycling: change-oriented effects. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, p. 522-536. 2011.

SHEN, L.; WORRELL, E.; PATEL, M. K. Comparing life cycle energy and GHG emissions of bio-based PET, recycled PET, PLA and man-made cellulose. **Biofuels, bioproducts & biorefining**, v. 6, p. 625-639. 2012.

SHEN, L.; WORRELL, E.; PATEL, M. K. Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, 55 34-52. 2010a. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.014>

SHEN, L.; WORRELL, E.; PATEL, M. K. Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres. **Resources, Conservation and Recycling**, 55:260–274. 2010b. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.10.001>

SINGH, A. K.; AGARWAL, H.; SINHA, R., JHA, S. K.; PRAKASH, A. Life cycle assessment of polyethylene terephthalate (PET) bottles. **ELK Asia Pacific Journals**, 2017.

SONG, H. S.; MOON, K. S.; HYUN, J. C. A life-cycle assessment (LCA) study on the various recycle routes of PET bottles. **Korean Journal of Chemical Engineering**, Vol. 16, Ed. 2, p. 202-207. 1999.

SONG, H. S.; HYUN, J.C. A study on the comparison of the various waste management scenarios for PET bottles using the life-cycle assessment (LCA) methodology. **Resources, Conservation and Recycling**, Vol. 27, Ed. 3. P. 267-284. 1999.

TALL, S. **Recycling of Mixed Plastic Waste – Is Separation Worthwhile?** Estocolmo: Royal Institute of Technology, 2000.

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

THINKSTEP, **GaBi Database & Modelling Principles**. 2018.

THINKSTEP, **Documentation for Duty Vehicle Processes**. 2019.

UGAYA, C. M. L.; DE ALMEIDA NETO, J. A.; DE FIGUEIREDO, M. C. B. (organização). **Recomendações de modelos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida para o contexto brasileiro**. Brasília: Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia, Ibict, 2019.

VALENTINO, G. **Life Cycle Assessment of PET bottles: closed and open loop recycling in Denmark and Lombardy region**. Dissertação. Politecnico de Milano, 2017.

VAN DER VELDEN, N. M.; PATEL, M. K.; VOGTLÄNDER, J. G. LCA benchmarking study on textiles made of cotton, polyester, nylon, acryl, or elastane. **International Journal of Life Cycle Assessment**, 19:331–356. 2014.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-013-0626-9>

WALLIS, G.; WEIL, D.; MADI, L.F.C. **O Mercado de Embalagem no Brasil**. In: **BRASIL pack trends 2020**. Campinas: ITAL, 2012. cap. 1, p. 9-39.

WILLIAMS, P.T. **Waste Treatment and Disposal**. 2. ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2005.