



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DA RECICLAGEM DE PET GRAU GARRAFA

Camila Távora de Mello Soares

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientadores: Professora Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco e Thiago Santiago Gomes

Rio de Janeiro
Setembro de 2017

Avaliação do Desempenho Ambiental da Reciclagem de PET Grau Garrafa

Camila Távora de Mello Soares

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO AMBIENTAL

Examinado por:

Professora Elen B. Acordi Vasques Pacheco, DSc

Professora Cláudia do Rosário Vaz Morgado, DSc

Professora Christine Rabello Nascimento, DSc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

Setembro de 2017

S676a

Soares, Camila Távora de Mello

Avaliação do Desempenho Ambiental da Reciclagem de PET Grau Garrafa / Camila Távora de Mello Soares. -- Rio de Janeiro, 2017.

72 f.

Orientadores: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco e Thiago Santiago Gomes. Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Bacharel em Engenharia Ambiental, 2017.

1. Reciclagem de PET. 2. Avaliação do Ciclo de Vida. 3. Desempenho Ambiental. I. Pacheco, Elen Beatriz Acordi Vasques, orient. II. Santiago Gomes, Thiago, orient. III. Título.

*“It's the circle of life
And it moves us all
Through despair and hope
Through faith and love”*

(Elton John)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por minha vida e proteção em meus caminhos.

À minha família, pelo amor e apoio incondicional. À minha mãe, Vera, pela preocupação, carinho e torcida. Ao meu pai, Antônio, pelas inúmeras caronas, conversas e suporte. À minha avó, Maria, pelas orações e boas vibrações. Ao meu irmão, Arthur, pelos papos sobre rochas e solos e pela amizade.

Meu profundo agradecimento a meus orientadores Elen e Thiago. Agradeço não só pela grande ajuda e dedicação na condução e realização desse trabalho, mas também pelo grande aprendizado que tive nos anos de IC e pela oportunidade de conviver com profissionais e pessoas exemplares, que marcaram minha graduação.

Aos meus amigos e colegas de turma, Patrícia e Vitor e todos os outros que de alguma forma fizeram parte dessa jornada. Agradeço ao antigo colega de curso, Eduardo, por todas as dicas e ajuda.

Aos coordenadores do curso Engenharia Ambiental, Iene, Heloisa e Afonso pela ajuda nas diferentes fases de minha graduação.

Às professoras Cláudia Morgado e Christine Rabello por terem disponibilizado seu tempo e aceitado participar da banca de avaliação.

Ao Laboratório NERDES e ao IMA, que cederam espaço para que esse trabalho fosse realizado.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DA RECICLAGEM DE PET GRAU GARRAFA

Camila Távora de Mello Soares

Setembro de 2017

Orientadores: Elen B. A. V. Pacheco; Thiago Santiago Gomes

Curso: Engenharia Ambiental

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é um instrumento que, dentre outras aplicações, permite avaliar o desempenho ambiental da economia circular do poli(tereftalato de etileno) (PET) ao identificar os impactos ambientais referentes a seus processos de reciclagem. No presente trabalho, foram avaliados os processos de reciclagem de PET pós-consumo realizada por dois métodos de recuperação: reciclagem mecânica convencional e por pós-condensação (processo *bottle-to-bottle*). Nesses processos, o produto final é PET grau garrafa, para isso deverá apresentar viscosidade intrínseca maior que 0,7dl/g. Foram obtidos dados referentes às tecnologias de reciclagem mecânica convencional (cenário 1) e de reciclagem mecânica com pós-condensação em estado sólido (cenário 2). Ainda, no primeiro cenário, o PET pós-consumo é misturado mecanicamente em proporções variáveis de 65, 80 e 95% (em massa) de PET virgem. A produção de PET virgem (cenário zero) também foi avaliada. A modelagem ocorreu com auxílio do *software* GaBi versão 6 e a Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida foi realizada segundo o modelo *ReCiPe endpoint (H)*. Categorias de impacto como consumo de recursos fósseis e mudanças climáticas foram analisadas. Na comparação entre os cenários, o cenário 2 apresentou os impactos ambientais menos significativos, na ordem de 60 vezes inferiores aos impactos do cenário 1A (65% PET virgem). Esses resultados demonstraram que a escolha do processo de reciclagem mecânica com SSP pode promover a melhoria do desempenho ambiental dos processos de reciclagem de PET grau garrafa ao apresentar impactos ambientais de menor expressividade.

Palavras-chave: Reciclagem de PET, Grau Garrafa, ACV, Desempenho Ambiental.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the degree of Environmental Engineer.

ENVIRONMENTAL PERFORMANCE EVALUATION OF PET BOTTLE-GRADE RECYCLING

Camila Távora de Mello Soares

Agosto de 2017

Advisors: Elen B. A. V. Pacheco; Thiago Santiago Gomes

Course: Environmental Engineering

Life Cycle Assessment (LCA) is a tool that, among other applications, can evaluate the environmental performance of polyethylene terephthalate (PET) and its circular economy by identifying the environmental impacts presents in its recycling processes. In this work, PET recycling processes were performed by two recovery methods: conventional mechanical recycling and solid state post-condensation (bottle-to-bottle process). In these processes, the final product is PET bottle grade, in a way that the intrinsic viscosity needs to be higher than 0.7 dl / g. Data concerning conventional mechanical recycling technologies (scenario 1) and mechanical recycling with SSP (scenario 2) were taken. Also, in the first scenario, the post-consumer PET is mechanically blended in varying proportions of 65, 80 and 95% (by mass) of virgin PET. A virgin PET production (scenario zero) was also analysed. GaBi software version 6 was used for modelling and Life Cycle Impact Assessment was performed by the ReCiPe endpoint (H) model. Categories of impact such as consumption of fossil resources and climate change were studied. Scenario 2 presented the least significant environmental impacts, nearly 60 times lower than the impacts of scenario 1A (65% of virgin PET). These results demonstrate that the choice of the mechanical recycling process with SSP can promote a better environmental performance of PET bottle recycling processes with less significant environmental impacts.

Keywords: PET Recycling, Bottle Grade, LCA, Environmental Performance.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS.....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1. O PET.....	12
3.2. A Reciclagem de PET.....	14
3.3. A Reciclagem Mecânica de PET.....	18
3.4. ACV na Reciclagem de PET.....	22
4. METODOLOGIA.....	26
4.1. Pesquisa Bibliográfica.....	28
4.2.ACV.....	12
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
5.1. Inventário de Ciclo de Vida.....	39
5.2. Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida.....	42
5.3. Interpretação.....	49
6. CONCLUSÕES.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evolução da reciclagem de PET no Brasil.....	16
Figura 2: Etapas gerais da reciclagem de PET pós-consumo.....	18
Figura 3: Esquema ilustrativo de reciclagem mecânica com mistura de PET virgem.	20
Figura 4: Esquema representativo de reciclagem mecânica com SSP.	21
Figura 5: Estrutura geral do método ReCipe 1.08.	25
Figura 6: Fluxograma geral do ciclo de vida do PET.....	27
Figura 7: Representação esquemática das atividades desenvolvidas.	28
Figura 8: Processos incluídos na ACV do berço ao portão referente ao cenário zero.	32
Figura 9: Fronteira e processos incluídos na ACV dos cenários 1A.	34
Figura 10: Fronteira e processos incluídos na ACV dos cenários 1B.	34
Figura 11: Fronteira e processos incluídos na ACV dos cenários 1C.	35
Figura 12: Fronteiras e processos incluídos na ACV do cenário 2.	36
Figura 13: Plano modelado no GaBi para o cenário 1A (65% PET virgem e 35% PET pós-consumo).	42
Figura 14: Plano modelado no GaBi para o cenário 1B (80% PET virgem e 20% PET pós-consumo).	42
Figura 15: Plano modelado no GaBi para o cenário 1C (95% PET virgem e 5% PET pós-consumo).	42
Figura 16: Plano modelado no GaBi para o cenário 2.....	43
Figura 17: Contribuições dos processos de entrada e saída para o cenário 1A de acordo com ReCiPe 2008(H).....	47
Figura 18: Impactos apresentados em cada cenário.	56
Figura 19: Impactos Ambientais de cada cenário (escala aproximada).	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Faixas de VI de PET e suas aplicações.....	14
Tabela 2: Taxas de Reciclagem de PET pós-consumo (2015) em relação ao total de PET comercializado no ano.....	15
Tabela 3: Dados primários do processo de reciclagem mecânica convencional para a reciclagem de flake para obtenção de 1t de pellets de PET.....	37
Tabela 4: Dados sobre o processo de reciclagem mecânica com SSP partindo de flake para produção de 1t de pellets de PET grau garrafa.	38
Tabela 5: Resumo dos dados dos processos utilizados para a elaboração do ICV do estudo em questão e suas referências.	40
Tabela 6: Dados de impacto potencial do cenário zero a partir do método “ReCiPe 2008(H), End-point Normalization, World” (Unidade: pontuação única equivalente por pessoa).....	44
Tabela 7: Dados gerais de impacto potencial do cenário 1A a partir do método “ReCiPe 2008(H), End-point Normalization, World”.....	45
Tabela 8: Dados gerais de impacto potencial do cenário 1B pelo método “ReCiPe 2008(H), End-point Normalization, World”.....	48
Tabela 9: Dados gerais de impacto potencial do cenário 1C pelo método “ReCiPe 2008(H), End-point Normalization, World”.....	49
Tabela 10: Dados gerais de impacto potencial do cenário 2 pelo método “ReCiPe 2008(H), End-point Normalization, World”.....	50
Tabela 11: Resultados dos cenários para a reciclagem de PET grau garrafa em ciclo fechado.....	52
Tabela 12: Categorias impacto método CML 2001 para os cenários 1A, 1B e 1C..	58

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABIPET – Associação Brasileira da Indústria do PET

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida

AICV – Avaliação do Inventário de Ciclo de Vida

EC – Economia Circular

BTB –Bottle-to-Bottle (processo de reciclagem)

ICV - Inventário do Ciclo de Vida

M_w - Molecular Weight (massa molar ponderal média)

NERDES - Núcleo de Reciclagem e Desenvolvimento Sustentável

PET – Poli(tereftalato de etileno)

SSP - Solid State Post-Condensation (pós-condensação em estado sólido)

VI – Viscosidade Intrínseca

1. Introdução

Globalmente, a evolução industrial tem sido baseada em um modelo linear de produção e consumo onde os bens são fabricados, utilizados e, em seguida, descartados como resíduos (WEF & EMF, 2014). A grande maioria dos produtos plásticos comercializados na atualidade possui matéria-prima oriunda de fontes naturais esgotáveis, como o petróleo. Em um planeta de recursos finitos, esse modelo econômico revela-se insustentável, tornando necessária a criação de novos padrões de produção para responder a desafios ambientais, como a escassez de recursos naturais (HC, 2014).

Nesse contexto, ao longo da última década, alternativas ao modelo econômico linear vêm recebendo atenção, como é o caso do conceito de desenvolvimento denominado Economia Circular (GHISELLINI *et al.*, 2016). Esse modelo tem como princípios a maximização do aproveitamento dos recursos e a minimização da geração de resíduos nas cadeias produtivas (RIBEIRO; KRUGLIANSKAS, 2015).

Recentemente, muitos estudos sobre o tema estão sendo publicados em todo o mundo (POMPONI; MONCASTER, 2017; EEA, 2016; SU *et al.*, 2013). O Japão e a Alemanha são países precursores de práticas compatíveis com atividades econômicas circulares (GEORGE *et al.*, 2015). Na União Europeia, as diretrizes “*Waste Framework Directive*” 2008/98/EC e “*Closing the loop action plan for the Circular Economy*” (CE, 2015) são exemplos de estratégias adotadas. Também a China vem sendo estimulada a promover a economia circular devido a grandes problemas ambientais decorrentes de seu intenso desenvolvimento econômico (GENG *et al.*, 2012).

Nesses estudos e iniciativas, a reciclagem é apontada como uma grande aliada da economia circular ao possibilitar que materiais sejam reinseridos em suas cadeias produtivas. Sob esta ótica, os materiais abandonam o fluxo linear que resultaria no fim de sua vida útil e passam a fazer parte de um ciclo, no qual diversos benefícios ambientais são obtidos, como a redução da extração de recursos naturais e a diminuição da geração de resíduos (GODECKE *et al.*, 2012).

Dentre os materiais com potencial de reciclagem, muitos acabam tendo destinações inadequadas, como lixões ou corpos hídricos. Este é, muitas vezes, o caso dos materiais plásticos, cujo curto tempo de vida útil e grande volume de produção tem gerado desafios para o seu gerenciamento, quando resíduos (HUYSMAN *et al.*, 2017).

Dos resíduos plásticos, destaca-se o poli(tereftalato de etileno) (PET). Com uma demanda mundial de 23,4 milhões de toneladas para o ano de 2020, o PET se popularizou rapidamente com a produção de embalagens e garrafas de bebidas (GBI RESEARCH, 2012; SINHA, PATEL, PATEL, 2010). Com isso, seu crescente descarte vem demandando novas soluções de gerenciamento de resíduos, principalmente em países que tem os aterros sanitários como principal forma de destinação final de resíduos sólidos urbanos (RSU), como o Brasil (ABRELPE, 2015). Essas embalagens ocupam um grande volume em relação à sua massa e, por consequência, um extenso espaço nos aterros sanitários, contribuindo para a redução da vida útil desses locais (COELHO *et al.*, 2011).

A reciclagem atua como importante mitigadora do problema, ao desviar parte do volume de PET que seria destinado aos aterros sanitários. No Brasil, as taxas de reciclagem de PET são consideradas elevadas para um país em desenvolvimento. No ano de 2015, um total de 51% do PET produzido foi reciclado. No país, o PET reciclado tem uma grande variedade de aplicações, sejam estas embalagens (para contato alimentar ou sem contato alimentar), aplicações têxteis, tintas ou resinas, entre outras (ABIPET, 2016).

As demandas ambientais e as crescentes taxas de reciclagem também vêm provocando o crescimento da busca científica por ferramentas e propostas que auxiliem no gerenciamento de resíduos e permitam avaliar a interação das relações de sua produção, tratamento e destinação (WILLIAMS, 2011). Dentre essas técnicas, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) tem apresentado resultados bastante promissores no sentido de promover um desenvolvimento mais próximo do sustentável, ao identificar em um sistema, processos que promovam menor impacto ambiental. Assim, a ACV fundamenta tomadas de decisão que visem a redução de impactos ambientais negativos (KRALISCH, OTT e GERICKE, 2015; TABONE *et al.*, 2010).

Sob estes aspectos, o presente estudo promove a aplicação de técnicas de ACV para avaliar o desempenho ambiental do PET reciclado capaz de moldar uma nova garrafa. Para isso, foi necessário obter PET grau garrafa, ou seja, PET com viscosidade intrínseca maior que 0,7 dl/g (AWAJA; PAVEL, 2005; KUCZENSKI; GEYER, 2010). As tecnologias de reciclagem analisadas compreenderam a reciclagem do material pós-consumo por meio da reciclagem mecânica com mistura de PET virgem e da reciclagem mecânica com pós-condensação em estado sólido (SSP – do inglês, *Solid State Post-condensation*).

O trabalho está estruturado da seguinte forma:

- ✓ O Capítulo 2 descreve o objetivo geral do trabalho.
- ✓ O Capítulo 3 apresenta a contextualização do estudo, descrevendo as terminologias relacionadas à reciclagem de PET, bem como os principais conceitos relacionados à ACV de PET.
- ✓ O Capítulo 4 apresenta a metodologia da pesquisa, especificando o método de coleta dos dados e da realização da ACV.
- ✓ O Capítulo 5 apresenta os cenários em estudo, assim como os resultados do inventário obtido na ACV, a comparação, a avaliação e a interpretação dos resultados.
- ✓ Por fim, o Capítulo 6 apresenta a conclusão e as considerações finais da pesquisa, assim como suas limitações e recomendações para futuros estudos.

2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho ambiental de processos de reciclagem de PET em ciclo fechado, ou seja, quando o PET pós-consumo é transformado novamente em novo PET grau garrafa. Impactos ambientais envolvidos nos processos de reciclagem mecânica com mistura de PET virgem (cenário 1) e de reciclagem mecânica com pós-condensação em estado sólido (cenário 2) foram analisados e comparados entre si. Verificou-se, também, o desempenho ambiental relativo à produção de PET virgem (cenário zero). Esse estudo busca auxiliar a tomada de decisão em sistemas de reciclagem de PET grau garrafa no sentido de minimizar os impactos ambientais associados a esses processos.

Objetivos Específicos:

- Avaliar o desempenho ambiental da produção de PET virgem;
- Comparar duas técnicas de reciclagem de PET grau garrafa a fim de investigar qual prática apresenta o melhor desempenho ambiental, de acordo com o método de impacto estudado;
- Verificar os pontos críticos de cada sistema analisado, identificando as etapas que conferem aos sistemas os maiores impactos ambientais e as suas respectivas causas;
- Analisar o desempenho ambiental do processo de reciclagem mecânica convencional em percentuais de 65, 80 e 95% (em massa) de PET virgem adicionado.

3. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo, será feita uma revisão bibliográfica do PET e de sua reciclagem. Também será abordada a temática de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e como esta pode auxiliar a avaliação de processos e sistemas de reciclagem.

3.1. O PET

O PET é um material que é proveniente, principalmente, de derivados do petróleo. Pertencente à família do poliéster, foi desenvolvido pelos químicos ingleses Whinfield e Dickson em 1941, inicialmente para a produção de fibras têxteis. Na década de 60, passou a ter aceitação para acondicionamento de alimentos. Já na década de 70, promoveu a transformação do mercado de embalagens, com sua aplicação em garrafas de bebidas. O PET chegou ao Brasil em 1988 e seguiu uma trajetória semelhante ao resto do mundo, sendo utilizado primeiramente na indústria têxtil (COELHO, 2010).

Esse polímero confere às embalagens propriedades que o diferenciam das alternativas anteriormente existentes no mercado de garrafas, como o metal e o vidro. A possibilidade de ser transparente ou opaco e ter estrutura rígida ou semirígida são algumas delas (SINHA; PATEL; PATEL, 2010). Ainda, suas propriedades de barreira, que dificultam a troca de gases e a absorção de odores externos, tornam essas embalagens ideais para o acondicionamento de alimentos e bebidas carbonatadas (“com gás”), preservando as características originais dos produtos envasados (EUGENIO; GONTIJO, 2011).

Apesar das diversas vantagens que embalagens plásticas, como o PET, apresentam durante seu uso, sua utilização vem sendo questionada por ser um material de rápido descarte e de elevado tempo para decomposição no meio ambiente. (EMF, 2016). Além disso, ocupam grande volume em relação a seu peso, contribuindo para os custos de coleta, transporte e descarte final dos resíduos urbanos (FORMIGONI; CAMPOS, 2005). Assim, rotas alternativas para o encaminhamento de PET pós-consumo, como a reciclagem, vem sendo estudadas (COELHO; *et al.*, 2011; FONTES; MORAES, 2015; SAUD *et al.*, 2017).

No processo de reciclagem de PET, uma possível limitação técnica, é o decaimento de sua viscosidade intrínseca (VI). Esta é uma propriedade técnica medida em decilitros por grama (dl/g), que aumenta de acordo com o aumento do comprimento das cadeias do polímero (BORNAK, 2013). Estudos indicam que o reprocessamento do PET pode levar à degradação do polímero e reduzir sua viscosidade intrínseca e, conseqüentemente, sua massa molar, limitando sua utilidade para muitas aplicações (BADIA *et al.*, 2012; CRUZ *et al.*, 2017; DUARTE *et al.*, 2016).

O PET com massa molar ponderal média (M_w – sigla em inglês, *molecular weight*) de 35.000-40.000 e viscosidade intrínseca a partir de 0,45 dl/g é utilizado em filmes e fibras têxteis. Essa faixa de massa molar não é adequada para moldagem por injeção, pois resulta em peças quebradiças. Para se ter peças com maior resistência ao impacto é necessário utilizar um polímero com maior M_w , isto é, em torno de 80.000 e viscosidade intrínseca superior a 0,70 dl/g, que podem ser processados por injeção (JADHAY; KANTOR, 1988). Assim, o PET grau garrafa deve apresentar $VI > 0,70$ dl/g para ser injetado e soprado para sua moldagem em garrafas. De acordo com a literatura (AWAJA; PAVEL, 2005; KUCZENSKI; GEYER, 2010), há faixas específicas de VI que restringem certas aplicações, mostradas na Tabela 1 .

Tabela 1: Faixas de VI de PET e suas aplicações.

VI PET	Aplicação
0,45 > VI > 0,70	Fibras Têxteis
VI > 0,70	Garrafas em geral
0,70 > VI > 0,78	Garrafas de água
0,78 > VI > 0,85	Garrafas de bebidas carbonatadas

Fonte: (AWAJA; PAVEL, 2005; KUCZENSKI; GEYER, 2010)

Para a produção de novas garrafas para bebidas carbonatadas, por exemplo, demanda-se uma VI entre 0,78 e 0,85 dl/g, enquanto para garrafas de água, a VI pode estar entre 0,70 e 0,78 dl/g (GAURINA-MEDJIMUREC, 2015). A análise dessa propriedade é fundamental para a cadeia de reciclagem do PET, uma vez que indica as possibilidades de transformação do material (MANCINI *et al.*, 2004).

3.2. A Reciclagem de PET

Segundo a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (2010), a reciclagem é o “processo de transformação dos resíduos sólidos que envolvem a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos” (BRASIL, 2010). Sendo assim, considerada um dos pilares da Economia Circular, pois cria a oportunidade de reinserção de um produto em sua cadeia produtiva, gerando um maior aproveitamento do material que não teria mais utilidade (GENG et al., 2012; HAUPT *et al.*, 2016).

O PET é um dos plásticos mais comumente reciclados na atualidade, pois é um resíduo dotado de valor econômico. Sendo uma resina termoplástica, pode ser novamente moldado e processado outras vezes pelo mesmo ou outro processo de transformação (EUGENIO; GONTIJO, 2011). Ainda, o fato das garrafas de refrigerantes e água serem, em sua maioria, exclusivamente de PET, facilita o fluxo de reciclagem frente a outras aplicações plásticas (FADALLA, 2010). A Tabela 2 mostra, em ordem decrescente, recentes taxas de reciclagem de PET pós-consumo divulgadas por alguns países e pela Europa.

Tabela 2: Taxas de Reciclagem de PET pós-consumo (2015) em relação ao total de PET comercializado no ano.

Local	% de reciclagem
Japão	86,9
Austrália	74,8
Europa	59,0
Brasil	51,0
EUA	30,1

Fontes: *The Council for PET Bottle Recycling* (Japão), APC (Australia), PETCORE (Europa), ABIPET (Brasil) e NAPCOR (EUA).

No Brasil, de 1994 a 2015, segundo a ABIPET, o percentual de reciclagem de PET pós-consumo evoluiu de aproximadamente 19% para 51% do total de PET comercializado, o que correspondeu a um volume de 274 mil toneladas desse material (Figura 1). Em 2015, a reciclagem mecânica para produção de embalagens para contato alimentar e não alimentar representou em torno de 26% do uso final de PET reciclado no Brasil, mesmo percentual da reciclagem com finalidade de produção de fibras têxteis de poliéster. A reciclagem química, com a produção de

tintas e resinas, representou em torno de 28% da distribuição do mercado (ABIPET, 2016).

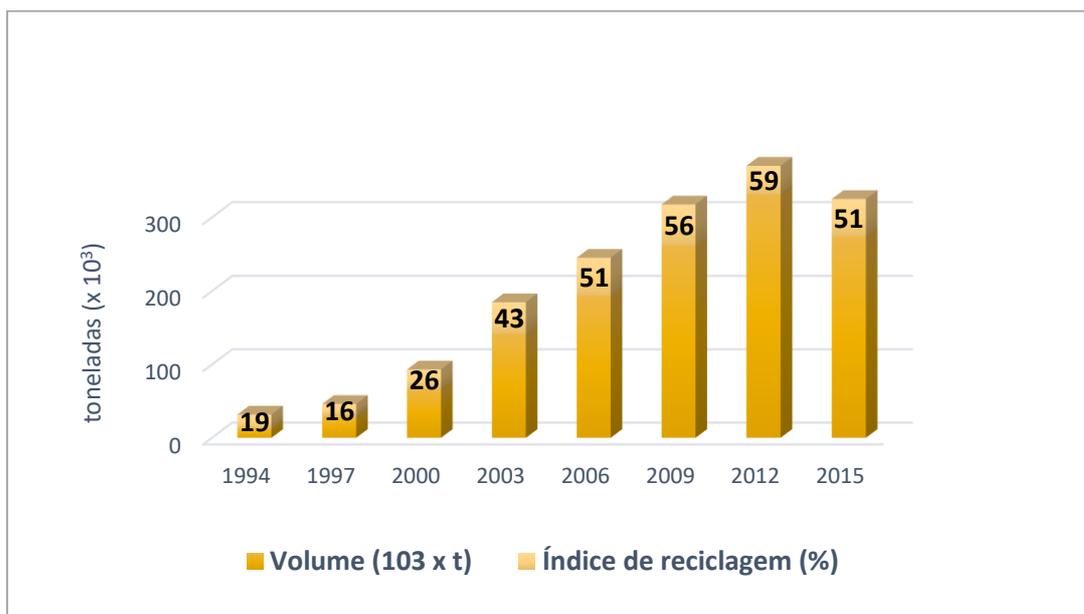


Figura 1: Evolução da reciclagem de PET no Brasil.

(Fonte: elaboração própria com base em ABIPET, 2016).

Apesar do destino do PET reciclado à produção de PET grau garrafa ainda não ser maioria das aplicações no Brasil, há forte tendência de evolução desse mercado, com o desenvolvimento das tecnologias de reciclagem (ABIPET, 2016) e também visto que a regulamentação para o uso de embalagens recicladas com esta finalidade só obteve aprovação no país recentemente, no ano de 2008 (ANVISA, RDC nº 20). Este processo em que o PET reciclado volta ao mesmo ciclo produtivo pode apresentar maiores benefícios ambientais do que os outros tipos de reciclagem, pois seu produto final também poderá ser novamente reciclado, maximizando a vida útil do material (WELLE, 2011). A literatura indica que, conforme o número de ciclos de reciclagem aumenta, os benefícios ambientais são maiores, até o limite ótimo de quatro ciclos fechados, quando seriam atingidos os benefícios ambientais mais significativos para a reciclagem de PET (SHEN *et al.*, 2011).

Neste caso em que o PET retorna ao mesmo ciclo produtivo com grau garrafa, pode ser produzido para contato direto com alimentos. Para isso, há a necessidade de remoção de potenciais contaminantes presentes através da aplicação de processos de descontaminação por tecnologias de reciclagem física e/ou química validadas, a fim de que seu uso não implique em risco sanitário para o consumidor, nem modifique a qualidade sensorial dos alimentos (CRUZ *et al.*, 2011).

Nesse contexto, duas terminologias frequentemente utilizadas para caracterizar a reciclagem de materiais estão relacionadas à forma como o mesmo é transformado. A reciclagem em ciclo fechado se dá quando o reciclado pode substituir tecnicamente o material virgem ao ser utilizado para fabricar o mesmo produto de antes de seu descarte. Neste processo, as propriedades do material reciclado não são consideravelmente diferentes das do material virgem (HUYSMAN *et al.*, 2015). A reciclagem em ciclo aberto acontece quando um produto é utilizado para a fabricação de novos itens distintos do produto inicialmente descartado. Neste caso, as propriedades inerentes ao material reciclado diferem daquelas do material virgem de forma que este se torna, em geral, utilizável apenas para outras aplicações (WILLIAMS *et al.*, 2010). A literatura também cita amplamente os termos “*upcycling*”, como um aprimoramento da qualidade do material que entra no processo reciclagem frente ao produto final, em oposição ao “*downcycling*”, que consiste no reaproveitamento do material descartado de forma a gerar um produto de menor valor agregado (SAUD *et al.*, 2017; SUNG, 2015).

Os tipos de processos de reciclagem também podem distinguir-se quanto aos seus processos. A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) caracteriza os processos em reciclagem primária, secundária, terciária e quaternária (ASTM D5033, 2000). A reciclagem primária e a secundária são processos de reciclagem mecânica, que, por meio de processos operacionais tais como lavagem, moagem e secagem os materiais passam novamente pela extrusão e são transformados em *pellets* para geração de novos produtos, sendo a primária a partir de resíduos pós-industriais e a secundária a partir de resíduos pós-consumo. A reciclagem terciária é uma reciclagem química, que promove a quebra das cadeias poliméricas e permite obter os monômeros de partida, que poderão ser novamente polimerizados. Por fim, há a reciclagem quaternária, ou reciclagem energética, que se baseia na recuperação de energia a partir da termoxidação de resíduos plásticos e é muito utilizada pela indústria da Europa e do Japão (HOPEWELL; DVORAK; KOSIOR, 2009). No Brasil, pratica-se, principalmente, a reciclagem mecânica. O presente trabalho estudará apenas o processo de reciclagem secundária.

3.3. A Reciclagem Mecânica de PET

O processo da reciclagem mecânica do PET pode ser viabilizado através do reprocessamento por extrusão (CONCEIÇÃO *et al.*, 2016). Antes do reprocessamento, é necessário que sejam realizadas as etapas de beneficiamento, que consiste em conjunto de operações que agregam valor ao material. Estas incluem:

- 1) separação e triagem do PET;
- 2) moagem e fragmentação em pequenas partes;
- 3) lavagem para retirada de sujeiras e contaminantes;
- 4) secagem.

Na Figura 2, o fluxograma mostra as principais etapas para produção de produtos de PET reciclado.

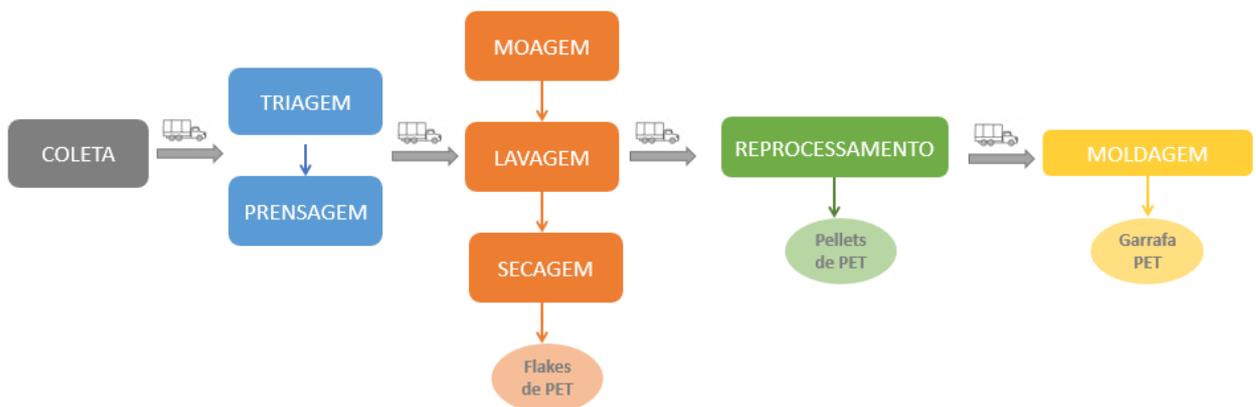


Figura 2: Etapas gerais da reciclagem de PET pós-consumo.

(Fonte: elaboração própria).

Durante esses procedimentos, o PET pós-consumo é moído, tendo como produto os flocos ou *flakes* (termo em inglês), que são, em seguida, lavados e secos.

A secagem é uma etapa extremamente importante na reciclagem de PET. Quanto mais eficiente é a secagem (tempo, temperatura e equipamento de secagem), menor será a degradação do PET em seu reprocessamento (AWAJA; PAVEL, 2005; MANCINI *et al.*; 2004; WELLE, 2011). Assim sendo, caso o reprocessamento seja realizado em unidade fabril distinta da qual é realizado o beneficiamento, outra etapa de secagem deverá ser adicionada antes deste processo.

Os processos de reciclagem mecânica de PET promovem a lavagem convencional do PET pós-consumo para reduzir a contaminação da superfície e para lavar a sujeira, etiquetas e cola. A eficiência de limpeza destes processos dependerá do tempo de residência dos flocos de PET, da temperatura da água e dos aditivos adicionados. Como aditivo de lavagem convencional usa-se soda cáustica em concentrações de 2 a 3% ou detergentes. Este tipo de lavagem é capaz de remover contaminantes da superfície dos polímeros, porém, pode não ser suficiente para remover substâncias orgânicas que porventura tenham sido absorvidas na primeira vida polímero, como solventes, combustíveis ou óleo mineral (WELLE, 2011). Por conseguinte, a pureza dos flocos de PET lavados convencionalmente pode não ser adequada para a aplicação dos produtos reciclados em contato direto com os alimentos. A qualidade do PET que entra no fluxo de reciclagem influenciará a eficiência de limpeza mínima necessária (GUTBERLET, 2015).

Eficiências mais altas na limpeza são obtidas através dos processos “*super-clean*” (geralmente traduzidos como processos de superlimpeza). Os processos *super-clean* aprovados pela agência reguladora norte-americana (FDA) e recomendados pelo comitê de especialistas da Organização Mundial de Saúde (*Joint Expert Committee on Food Additives*) envolvem o uso de etapas que visam eliminar contaminantes que eventualmente ainda ocorram no PET pós-consumo após os processos de limpeza convencionais (FORMIGONI; CAMPOS, 2005). O uso de agentes químicos na lavagem, como a soda cáustica, aumenta a eficiência na retirada de contaminantes. Através de aquecimento a temperaturas superiores a 200° C, alguns contaminantes, como no caso de solventes, podem ser removidos da superfície dos flocos de PET por tratamento a vácuo ou de gás inerte (WELLE, 2011).

O *flake* então pode seguir para reprocessamento através da extrusão, misturado ou não com o PET virgem. A Figura 3 ilustra como o reprocessamento pode ser feito a partir de reciclagem mecânica com mistura de PET virgem. A mistura é realizada fisicamente, na entrada da extrusora, a fim de que o produto final adquira VI grau garrafa superior a 0,7 dl/g.

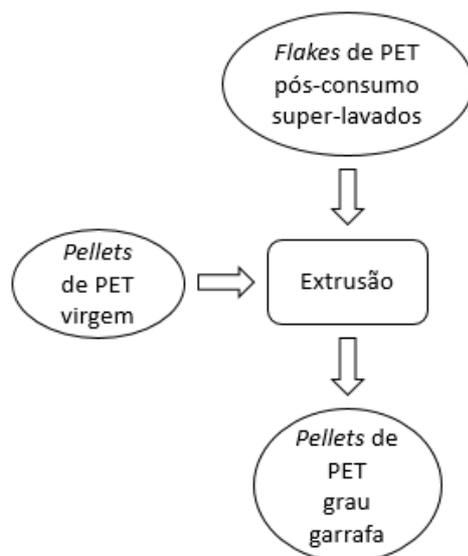


Figura 3: Esquema ilustrativo de reciclagem mecânica com mistura de PET virgem.
(Fonte: elaboração própria).

O processo de extrusão consiste em alimentar o funil de um equipamento amplamente utilizado na indústria do plástico, a extrusora, com o material moído (*flake*). Através da gravidade, este cai sobre uma rosca que o transporta dentro de um cilindro aquecido. Então, o material passa por zonas que o transportam, misturam, compactam e ao final do cilindro, este é forçado de encontro a telas de aço (filtro) que retém impurezas como metais (resíduos), passando então à matriz onde tomará a forma do produto final, podendo ser grânulo, fita ou fio (ABIPLAST, 2014).

Assim, ocorre a transformação dos descartes de PET pós-consumo em grânulos ou *pellets*, que é a matéria-prima para a produção de outros produtos, como embalagens grau garrafa, a depender do processo de reciclagem empregado (CHILTON *et al*; 2010).

A reciclagem mecânica possibilita a obtenção de produtos compostos por um único tipo de plástico, ou de misturas de plásticos. O produto deve apresentar propriedades mais próximas possíveis do polímero virgem para que possa ser utilizado na confecção de materiais com aplicações de maior valor agregado, como embalagens para contato alimentar (ROMÃO *et al*, 2009).

Outra variação do reprocessamento é denominada reciclagem mecânica “*bottle-to-bottle*”. Esta, além da obrigatoriedade das etapas de descontaminação *super-clean*, também inclui uma fase denominada pós-condensação em estado sólido ou polimerização no estado sólido (SSP, sigla em inglês - *Solid State Post-condensation*). Este processo é recomendado quando se deseja um produto com elevada viscosidade intrínseca para fabricação de novas garrafas PET (BORNAK, 2013). A Figura 4 esquematiza as etapas gerais de uma reciclagem mecânica com SSP.

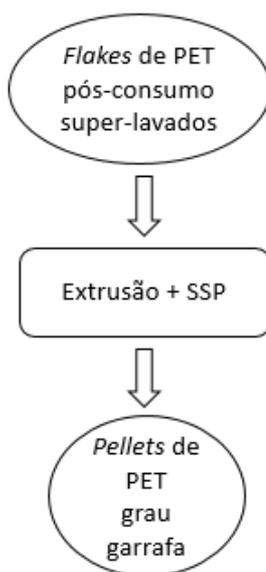


Figura 4: Esquema representativo de reciclagem mecânica com SSP.

(Fonte: elaboração própria).

A SSP promove, a partir de temperaturas que podem variar de 180 a 230 °C, o aumento da massa molar ponderal média (M_w) das moléculas de PET e, assim, o aumento da sua viscosidade intrínseca. O tempo de residência irá depender do aumento de VI que se deseja, variando de 4 a 20 horas (WELLE, 2011). O produto do processo SSP pode apresentar VI comparável ao material virgem (0.80 - 0.85 dℓ/g), possibilitando o seu posterior processamento por injeção-estiramento-sopro (CRUZ et al., 2017) e aplicação em embalagens para contato direto com alimentos (FABRIS et al., 2010). Dois tipos de pós-condensação são utilizados: contínuo ou em batelada. Envolvem a aplicação de vácuo ou gás inerte (nitrogênio). Em geral, no processo contínuo, os grãos de PET cristalizados são alimentados no topo de um silo, aquecido na temperatura da SSP, que por gravidade, descem de forma controlada. O gás inerte aquecido é adicionado na parte inferior, criando um fluxo

gasoso que aquece a massa de polímero que se desloca em sentido contrário, removendo água e etilenoglicol e fazendo com que o M_w aumente progressivamente. No processo em batelada, os grãos cristalizados alimentam um reator que gira em torno de um eixo (para evitar a formação de grumos), enquanto vácuo é aplicado para remoção de água da reação. Este processo promove o aumento da massa molar do polímero e pode durar até 20 horas devido ao tempo de aquecimento e resfriamento do sistema (WELLE, 2011).

Após a extrusão e a pós-condensação, o material passa por um filtro de alto desempenho que remove metais e outros eventuais contaminantes, que constituem resíduos sólidos deste processo e devem ser destinados a um aterro sanitário. Existem variações de procedimentos para uma reciclagem mecânica com pós-condensação em estado sólido que podem ser alteradas de acordo com a qualidade do material pós-consumo que entra no processo, com a qualidade técnica necessária do produto final e também com os diferentes investimentos e equipamentos aplicados nas plantas de reciclagem (FADALLA, 2010; ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009).

3.4. ACV na Reciclagem de PET

A ferramenta ACV

Na busca pela melhoria contínua, é necessário que sejam estabelecidos métodos de avaliação consistentes e que permitam a comparabilidade e a interpretação de resultados e suas possíveis variações.

Nesse sentido, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) tem se tornado uma ferramenta utilizada com frequência para a análise de fluxos direcionais de processos ou produtos. É uma das técnicas de gestão ambiental que promove a avaliação de desempenho ambiental e a avaliação de impacto ambiental (ISO 14044: 2006). Seu funcionamento é baseado em um inventário de entradas e saídas de recursos ao longo do ciclo de vida do objeto de estudo. Após a interpretação dos resultados, é possível a identificação de pontos críticos que necessitem de melhorias ao longo do fluxo analisado, bem como a comparação dos impactos de diferentes tecnologias ou produtos. A técnica permite a avaliação e implantação de estratégias, como a substituição e recuperação de materiais e reformulação ou substituição de processos,

visando mitigar impactos ambientais (LAURENT *et al.*, 2014; FANTIN *et al.*, 2014).

O impacto do produto no meio ambiente pode ser examinado em todas as etapas do seu ciclo de vida, desde a extração e processamento de matérias-primas para fabricação, transporte, distribuição, até sua reutilização, manutenção, reciclagem e disposição final (COELHO *et al.*, 2011).

Os estudos de ACV seguem os princípios gerais observados nas normas ISO 14040:2006, “Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e Estrutura” e ISO 14044:2006 “Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações”. De acordo com essas Normas, um estudo de Avaliação do Ciclo de Vida compreende quatro fases, sendo estas: definição do objetivo e escopo, análise de inventário de ciclo de vida (ICV), avaliação do impacto do ciclo de vida (AICV) e interpretação dos resultados.

Na primeira etapa, definem-se os objetivos, as fronteiras do sistema e as limitações do estudo. Na etapa de ICV, ocorre a fase de caracterização do processo, que inclui a descrição dos processos e fluxos que compõem o ciclo de vida do produto. Nesta fase, são adicionados dados de entradas, como matéria-prima, água e energia e de saídas, como resíduos, emissões, subprodutos e produto. Na terceira fase ou etapa de AICV, de acordo com Hauschild *et al.* (2013), o impacto potencial de cada emissão de inventário e/ou fluxo de recursos para o meio ambiente é modelado quantitativamente de acordo com o mecanismo ambiental relevante, utilizando um modelo de caracterização. Fatores de caracterização são calculados e expressam o impacto potencial de cada fluxo elementar em termos da unidade comum do indicador de categoria. Deste modo, a emissão relacionada àquela categoria de impacto é multiplicada por um fator de ajuste, sendo o resultado final expresso em uma unidade comum a todas as contribuições daquele processo ou produto (HAUSCHILD *et al.*, 2012; BUENO *et al.*, 2015). Um exemplo que facilita este entendimento é o caso dos gases causadores de efeito estufa, que são todos relacionados ao potencial de aquecimento global (GWP – *Global Warming Potential*) do dióxido de carbono (CO₂) para a categoria de impacto de mudanças climáticas (PEGORARO, 2008). O GWP do metano para uma escala de 100 anos é 21 vezes maior que o do CO₂, assim seu fator de caracterização é 21 kg_{eq}CO₂ (IPCC,

2007). A partir dessas relações e cálculos, o significado ambiental dos fluxos de inventário pode ser estimado.

Ainda assim, o resultado do inventário geralmente trata-se de uma lista muito longa de emissões de poluentes e de recursos consumidos. A interpretação desta lista é de grande complexidade e, por isso, métodos de categorias de impacto realizam a conversão da longa lista do inventário em um número limitado de categorias de impacto ambiental por meio de modelos e normalizações (GOEDKOOOP et al., 2013a).

Os resultados desse método são comumente referidos a partir de normalização “*midpoint*” (ponto intermediário) ou “*endpoint*” (ponto final), que convertem as substâncias das entradas e saídas em indicadores de categoria de impacto. A caracterização “*midpoint*” usa indicadores localizados ao longo dos mecanismos ambientais avaliados (processos físicos, químicos e biológicos), como, por exemplo, acidificação, mudanças climáticas e ecotoxicidade. Já a abordagem “*endpoint*” considera em sua caracterização todo o mecanismo ambiental até seu ponto final, ou seja, refere-se a um dano específico à uma área mais ampla; sendo esta o impacto à saúde humana, aos ecossistemas ou aos recursos naturais (MENDES et al., 2015).

Os métodos para a AICV mais utilizados são em sua maioria desenvolvidos em países da Europa, embora sejam aplicados em diferentes partes do mundo, incluindo o Brasil (EC-JRC, 2010a). O ReCiPe é um exemplo de método referenciado no *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook* (EC-JRC, 2010a, 2010b, 2010c, 2011) e que integra as abordagens *midpoint* e *endpoint*. Na Figura 5, pode ser vista a estrutura geral do método e como é feita a relação dos parâmetros de impacto com os indicadores. Uma de suas aplicações é o cálculo de uma única pontuação que pode ser usada de maneira simplificada para a tomada de decisão, além de seu uso como um método de avaliação de impacto geral na ACV (EC-JRC, 2010a).

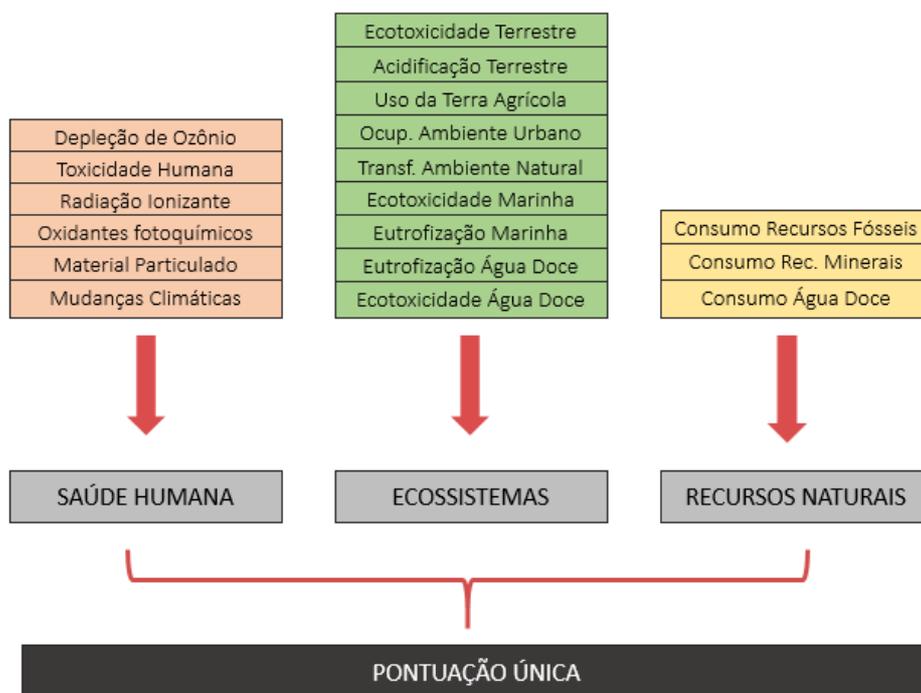


Figura 5: Estrutura geral do método *ReCipe 1.08*.

(Fonte: GOEDKOOOP *et al.*, 2013b).

Como ilustrado na Figura 5, as 18 categorias de impacto *midpoint* avaliadas pelo método são: depleção de ozônio, toxicidade humana, radiação ionizante, formação de oxidantes fotoquímicos, formação de material particulado, mudanças climáticas, acidificação terrestre, eutrofização aquática (água doce), eutrofização aquática (marinha), ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade aquática (água doce), ecotoxicidade aquática (marinha), uso da terra agrícola, ocupação do ambiente urbano, transformação do ambiente natural, consumo de recursos fósseis, consumo de recursos minerais e consumo de recursos de água doce.

Goedkoop e Spriensma (2001) consideram a ponderação a etapa mais crítica da AICV e indicam que o número de itens a serem ponderados deve ser o menor possível. Assim, são abordadas três categorias de impacto *endpoint*, estas são: saúde humana, ecossistemas e recursos naturais (EC-JRC, 2010a; GOEDKOOOP *et al.*, 2009). Detalhes sobre os fatores de caracterização e normalização desse método podem ser vistos no Anexo A.

Com relação ao escopo, às fronteiras e ao nível de detalhamento de um estudo de ACV, estas irão depender do assunto e do seu uso pretendido. A cobertura de dados, tanto do inventário quanto das metodologias de impacto é um desafio, uma vez que

influencia diretamente para que as respostas dos estudos apresentem fidelidade frente à complexidade dos sistemas de produção, consumo e descarte (FINKBEINER et al., 2014).

A aquisição de dados locais é uma limitação da técnica, pois dificilmente todos os atores da cadeia são conhecidos. Sendo assim, quando não há disponibilidade de dados locais para uma ACV, estudos têm utilizado valores de outras regiões do planeta (YANG, 2015; NITSCHHELM *et al.* 2015).

Aplicação ao PET

Desde o primeiro trabalho de ACV, em 1969 (KLÖPFFER, 2006), até hoje, estudos relacionando o PET e seu ciclo de vida vem sendo elaborados. No entanto, grande parte desses estudos foi conduzida de modo a apoiar a tomada de decisões sobre o gerenciamento de resíduos, ao comparar a reciclagem com o aterro ou outra destinação (ROMERO-HERNÁNDEZ *et al.*, 2009) e aqueles que caracterizam as tecnologias utilizadas na etapa de reciclagem ainda apresentam uma abordagem genérica desses processos (CHILTON; BURNLEY; NESARATNAM, 2010; SHEN; WORRELL; PATEL, 2010). A validação de dados locais é de grande complexidade, principalmente por conta dos bancos de dados e processos produtivos que podem não apresentar características semelhantes (YANG, 2015; NITSCHHELM *et al.* 2015).

Apesar das limitações e de seu desenvolvimento em progresso, a metodologia de ACV é considerada uma ferramenta importante para gerar informações que possibilitem a avaliação e a comparação do desempenho ambiental do ciclo de vida do PET (DOGAN, 2008). Ao considerar o ambiente como um todo, permite que as questões ambientais sejam avaliadas estrategicamente, durante todo o ciclo de vida do sistema ou em fronteiras definidas.

A Figura 6 exemplifica o ciclo de vida do PET e mostra os possíveis caminhos comuns à realidade brasileira. A vida útil da garrafa PET pode ser avaliada desde a produção da resina de PET virgem a partir de derivados do petróleo, passando pela fabricação da garrafa (geralmente ocorre dentro das indústrias de bebidas), seguindo para o consumidor, quando são utilizadas (na maior parte das vezes de forma rápida, para consumo da água ou refrigerante) e logo em seguida, tornam-se resíduos pós-

consumo e então devem ser destinadas a aterros sanitários ou ainda podem ser inadequadamente dispostas em lixões ou no meio ambiente. Uma outra rota possível é a coleta desse material pós-consumo por catadores de materiais recicláveis ou por coleta seletiva que direciona o PET para a reciclagem.

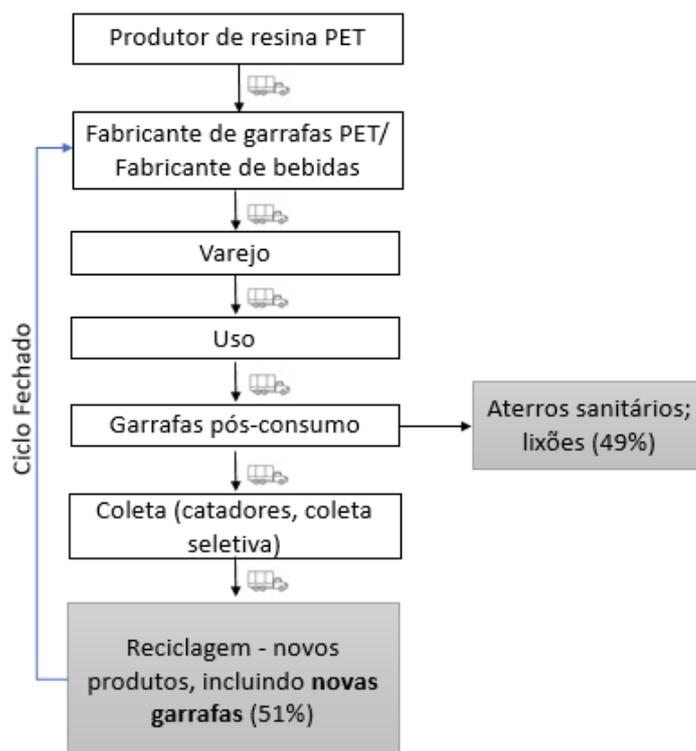


Figura 6: Fluxograma geral do ciclo de vida do PET.

(Fonte: elaboração própria com base em CONCEIÇÃO *et al.*, 2016).

Os aterros sanitários representam o fim da vida útil do PET. Já a reciclagem permite o aumento da vida útil desse material, uma vez que o transforma em novos produtos (HOPEWELL; DVORAK; KOSIOR, 2009). Entre esses novos produtos, a produção de novas garrafas representa o ciclo fechado e a maximização da vida útil do PET, uma vez que essas garrafas também podem ser novamente recicladas.

4. Metodologia

Neste capítulo, foram descritos os procedimentos utilizados para a elaboração do trabalho. Foram definidas as metodologias utilizadas para a pesquisa bibliográfica, coleta de dados, modelagem e para a avaliação do desempenho ambiental realizada. Para isso, foram detalhadas as etapas da ACV, as categorias de impacto avaliadas e os processos e fronteiras de cada cenário estudado. A Figura 7 ilustra, de forma geral, as atividades desenvolvidas.

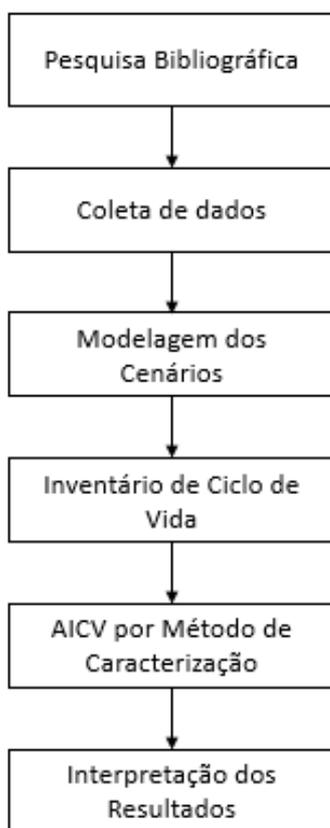


Figura 7: Representação esquemática das atividades desenvolvidas.

(Fonte: elaboração própria).

4.1. Pesquisa Bibliográfica

Na pesquisa bibliográfica, foram revisados artigos técnicos e trabalhos acadêmicos a fim de fornecer os elementos necessários ao entendimento do PET e de suas características, da reciclagem de PET no Brasil e no mundo, da reciclagem mecânica de PET e da metodologia ACV na reciclagem de PET.

Foram acessadas, via internet, as seguintes bases de informações e publicações científicas:

- 1) Portal Capes, disponível em: <http://www.periodicos.capes.gov.br/>;
- 2) ScienceDirect, disponível em: <http://www.sciencedirect.com/>;
- 3) SciELO, disponível em: <http://www.scielo.org/>;
- 4) Elsevier, disponível em: <http://www.elsevier.com/>.

Portais de divulgação de dissertações e teses de diversas instituições acadêmicas brasileiras e também estrangeiras foram utilizados.

Ainda, informações foram obtidas a partir dos endereços eletrônicos de algumas das principais associações e unidades produtivas relacionadas à reciclagem de PET no Brasil:

- 1) ABIPET (Associação Brasileira da Indústria do PET), disponível em: <http://www.abipet.org.br/index.html>;
- 2) CPR, disponível em: <http://www.cprpet.com.br/>;
- 3) EREMA, disponível em: <https://www.erema.com/>.

As principais indústrias fabricantes de sistemas SSP são a EREMA (Áustria); OHL (Alemanha), Kronos (Alemanha) e PET Processors (Estados Unidos). Apenas a tecnologia EREMA foi avaliada, pois seus dados estão disponibilizados (<https://www.erema.com>) para consulta e estudo.

A pesquisa foi realizada, no período entre março e junho de 2017, em computadores em rede da UFRJ com acesso permitido aos portais periódicos.

4.2. ACV

4.2.1. Fase 1 – Definição do Objetivo e Escopo

Objetivo e Unidade Funcional

O estudo teve por objetivo avaliar o desempenho ambiental da produção de PET reciclado grau garrafa a partir de garrafas PET pós-consumo. Esta avaliação compreendeu as tecnologias de reciclagem mecânica com mistura de PET virgem e de reciclagem mecânica com SSP. Também fez parte do escopo de trabalho, a identificação dos pontos críticos de geração de impactos ambientais em cada um dos processos. A unidade funcional definida foi uma tonelada (1t) de *pellets* de PET grau garrafa ao final do processo.

Fronteiras do Sistema

A ISO 14.040 (2006) declara que o sistema de produtos é fundamental para a condução da ACV, pois o mesmo irá apresentar quais os limites serão analisados. A definição da fronteira do sistema consiste no estabelecimento das unidades de processo que foram incluídas para serem modeladas, delimitando, assim, as dimensões do estudo de ACV.

Alguns aspectos do sistema não foram considerados devido à indisponibilidade de dados ou por não terem relevância para o escopo do estudo. As fases de coleta do PET pós-consumo, beneficiamento, lavagem convencional e superlavagem foram consideradas as mesmas para as tecnologias de reciclagem estudadas, de forma que as entradas e saídas destes processos contribuem da mesma forma em cada cenário, quando a quantidade de PET pós-consumo é a mesma em ambos os cenários. Como no cenário em que há reciclagem mecânica com mistura de PET virgem ocorrem variações percentuais de PET pós-consumo que entra no processo, foi considerado que as entradas de água e soda cáustica (principais entradas consideradas causadoras de impacto no beneficiamento e descontaminação *super-clean*) também sofreram distinção de acordo com o percentual de entrada de *flakes* de PET superlavados no reprocessamento.

As etapas de transporte podem ser muito importantes em um estudo de ACV, uma vez que é possível que contribuam consideravelmente para as emissões de gases e poluentes (SILVA; MOITA NETO, 2015). Todavia, nesse estudo, o foco foi a fase de reprocessamento do material, de modo que o transporte entre as etapas da cadeia de reciclagem foi suprimido, pois foi considerado comum aos cenários de reciclagem.

Assim, estabeleceu-se que as fronteiras desse estudo foram delimitadas a partir da entrada de *flake* de PET pós-consumo na empresa recicladora até a produção de *pellet*, material PET granulado, produto da extrusão, com características de grau garrafa ($VI > 0,7 \text{ dl/g}$). Foram avaliadas, essencialmente, as diferenças de desempenho ambiental entre os processos de reciclagem mecânica com mistura de PET virgem e de reciclagem mecânica com pós-condensação em estado sólido, de acordo com os dados obtidos.

A alocação consiste na divisão dos fluxos de entrada ou de saída de uma unidade de processo no sistema sob estudo (ISO 14040, 2006). Não há uma metodologia única acordada para alocar impactos no material reciclado. O presente trabalho seguiu o princípio do "corte" ou "*cut-off*" que distingue a primeira vida (produto virgem) e a segunda vida (produto reciclado) como sistemas separados. Dessa forma, o PET pós-consumo resultante da primeira vida não possui carga ambiental associada a ele quando é utilizado como matéria-prima na segunda vida. Esta regra tem sido aplicada para produtos reciclados (SHEN *et al.*, 2010). No caso desse estudo, os impactos da produção de PET virgem foram atribuídos à sua primeira vida e avaliados em um cenário. Já o PET pós-consumo, ao fazer parte dos cenários de reciclagem, não apresenta carga ambiental associada, sendo uma entrada livre de impactos.

Programa de Avaliação do Ciclo de Vida

Foi utilizado o *software* alemão GaBi versão 6, que é um programa utilizado para modelagem de produtos e sistemas a partir de uma perspectiva de ciclo de vida. O programa foi alimentado com os dados dos processos produtivos de cada uma das opções de reciclagem. Assim, os fluxos de entrada e saída foram contabilizados e geraram o Inventário do Ciclo e Vida. O programa auxiliou a Avaliação do Impacto

do Ciclo de Vida e a interpretação dos resultados a partir de método de caracterização de impacto.

O *software* é uma ferramenta de modelagem para sistemas produtivos, desenvolvida pela organização *PE International* e utilizado globalmente para avaliação de desempenho ambiental de produtos e processos através da ACV (GABI, 2016). O programa foi adquirido pelo Núcleo de Reciclagem e Desenvolvimento Sustentável (NERDES).

Modelagem dos Cenários

A fronteira de cada um dos cenários foi descrita a seguir.

Cenário Zero

Neste cenário, ilustrado na Figura 8, o processo “PET virgem” engloba todas as etapas necessárias à produção do grânulo de resina virgem, referentes à extração e refino do petróleo, ao transporte de matérias-primas, consumo de combustíveis, entre outros processos. Sendo assim, todas as entradas e saídas estimadas para cada uma dessas etapas são contabilizadas neste único processo, incluindo as emissões e o consumo de recursos de todas as etapas. A fonte dessas informações foi a base de dados presente no programa GaBi, disponibilizada pela *PE International* (Tabela 5). Neste cenário, a ACV será realizada do “berço” (extração da matéria-prima) até o “portão” (grânulos de PET prontos para fabricação de garrafa).

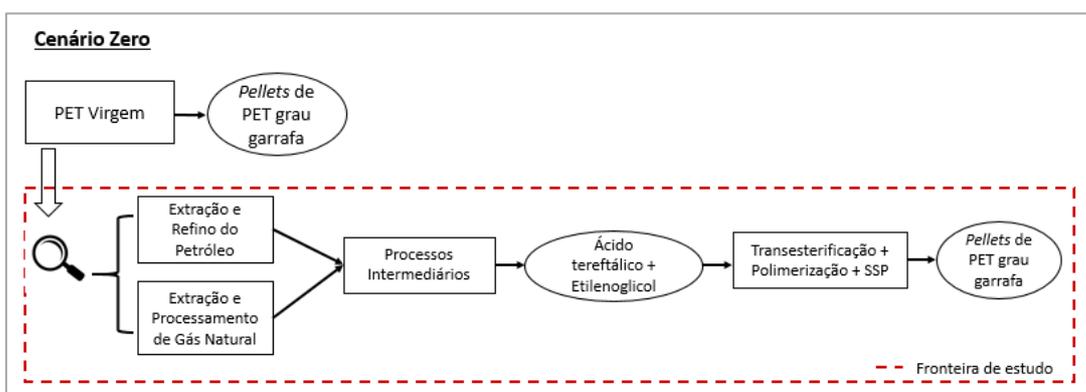


Figura 8: Processos incluídos na ACV do berço ao portão referente ao cenário zero. (Fonte: elaboração própria com base em ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009).

Cenário 1

As Figuras 9, 10 e 11 mostram o processo de reciclagem mecânica com mistura de PET virgem até a produção de *pellets* de PET reciclado. Segundo a literatura (BADIA *et al.*, 2012; DUARTE *et al.*, 2016, LÓPEZ *et al.*, 2014) a viscosidade intrínseca é frequentemente reduzida durante o reprocessamento mecânico, indicando que algum processo, como a adição de PET virgem, é necessário para aumentar o comprimento da cadeia do polímero. Assim, os percentuais de PET virgem de 65 e 80 e 95% (em massa) para mistura ao PET pós-consumo foram propostos e modelados na estimativa de manter o $VI > 0,7 \text{ d}\ell/\text{g}$.

Foram consideradas variações do percentual de PET virgem que é misturado ao PET pós-consumo reciclado no Cenário 1, a fim de que os impactos fossem avaliados. Tais proporções foram utilizadas a título de exemplo e com base na literatura (SHEN *et al.*, 2011) para avaliação do desempenho ambiental do cenário, de modo que estudos técnicos e ensaios laboratoriais devem ser realizados para comprovar o grau garrafa ($VI > 0,7 \text{ d}\ell/\text{g}$) do produto final. Tal comprovação técnica esteve fora do escopo deste trabalho e seu desenvolvimento será proposto em um futuro trabalho do Laboratório NERDES. Os seguintes cenários foram analisados:

- Cenário 1A: Adição de 65% de PET virgem (em massa) ao PET pós-consumo;
- Cenário 1B: Adição de 80% de PET virgem (em massa) ao PET pós-consumo;
- Cenário 1C: Adição de 95% de PET virgem (em massa) ao PET pós-consumo.

Estas escolhas tiveram por base o percentual praticado de, no mínimo 65% de resina de PET virgem no processo de reciclagem mecânica convencional. O limite de 35% de massa de PET pós-consumo na mistura dos grânulos da resina virgem busca o atendimento aos requisitos técnicos, como VI e cor, para que o produto final obtido seja PET grau garrafa (SHEN *et al.*, 2011).

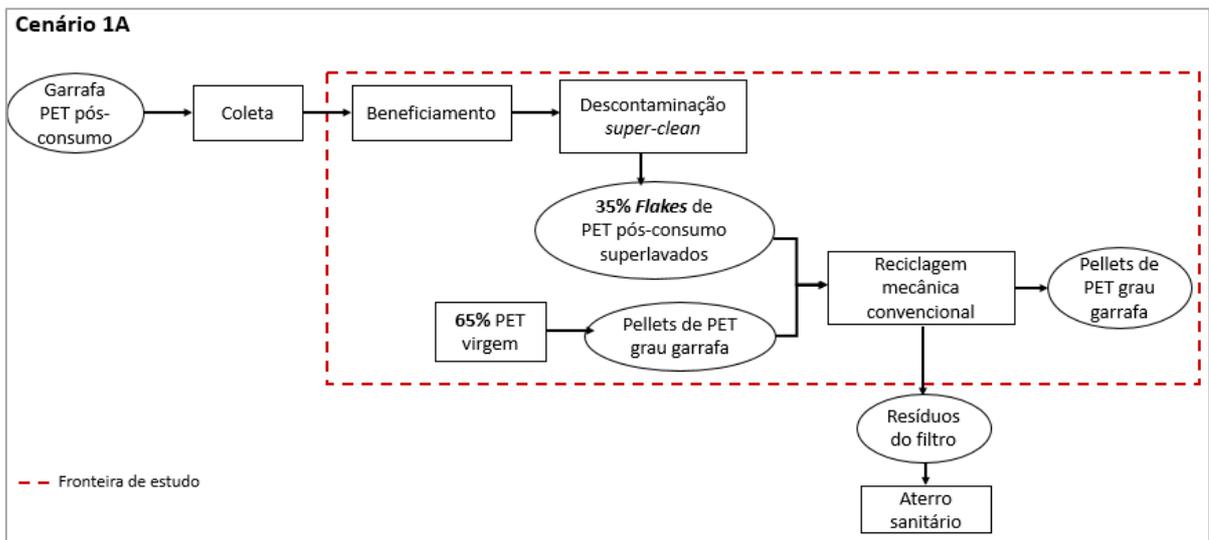


Figura 9: Fronteira e processos incluídos na ACV dos cenários 1A.

(Fonte: elaboração própria).

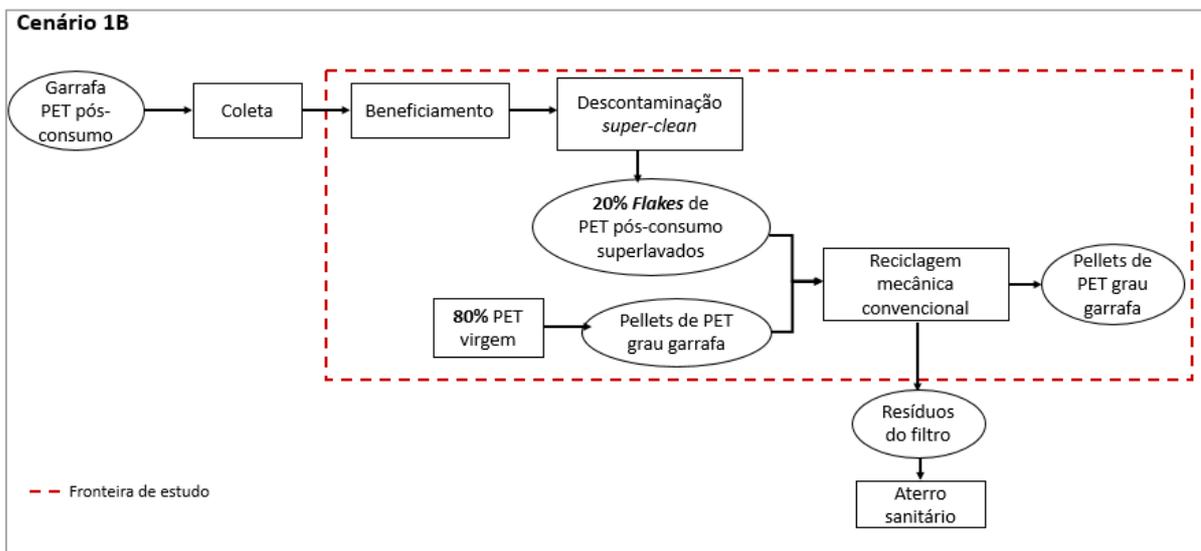


Figura 10: Fronteira e processos incluídos na ACV dos cenários 1B.

(Fonte: elaboração própria).

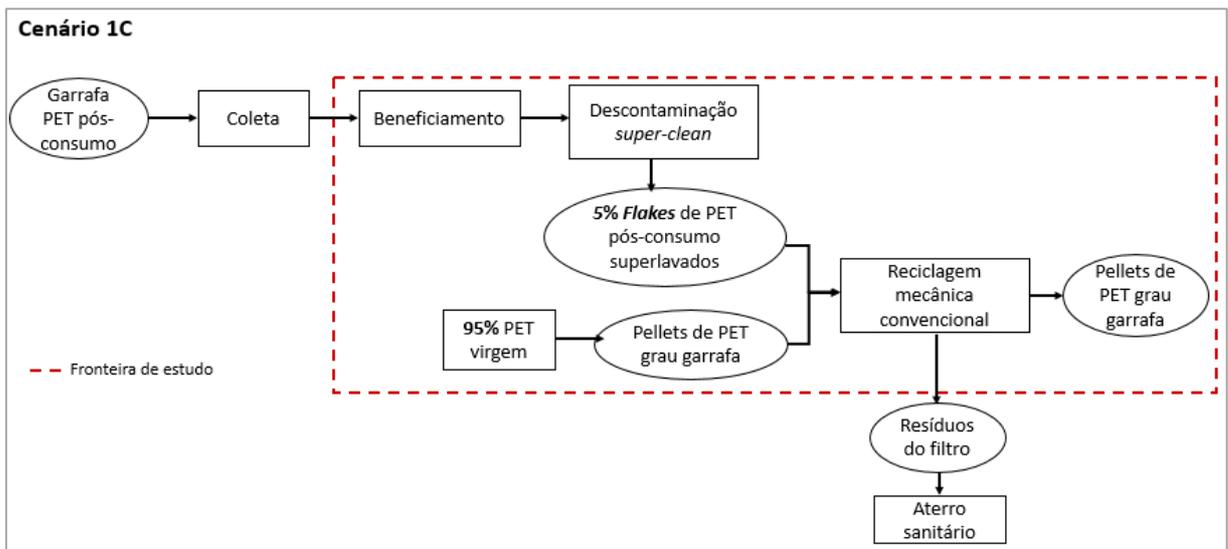


Figura 11: Fronteira e processos incluídos na ACV dos cenários 1C.

(Fonte: elaboração própria).

Foi considerado que o PET virgem do primeiro ciclo de vida, ou seja, aquele que dá origem ao PET pós-consumo utilizado, não está englobado nas fronteiras do sistema, tratando-se de uma abordagem “*cut-off*”. Dessa forma, o PET pós-consumo é livre de carga ambiental.

Neste cenário, ao processo “PET virgem” estão associadas etapas anteriores de seu ciclo de vida, necessárias a produção da resina virgem a partir do petróleo (como descrito no cenário zero).

Cenário 2

No cenário 1, foi considerado que o PET pós-consumo não apresenta impactos de sua primeira vida associados a ele, por ter sido adotada uma abordagem “*cut-off*” (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016)

A Figura 12 ilustra os processos envolvidos no cenário 2 até seu produto final, *pellets* de PET reciclado grau garrafa.

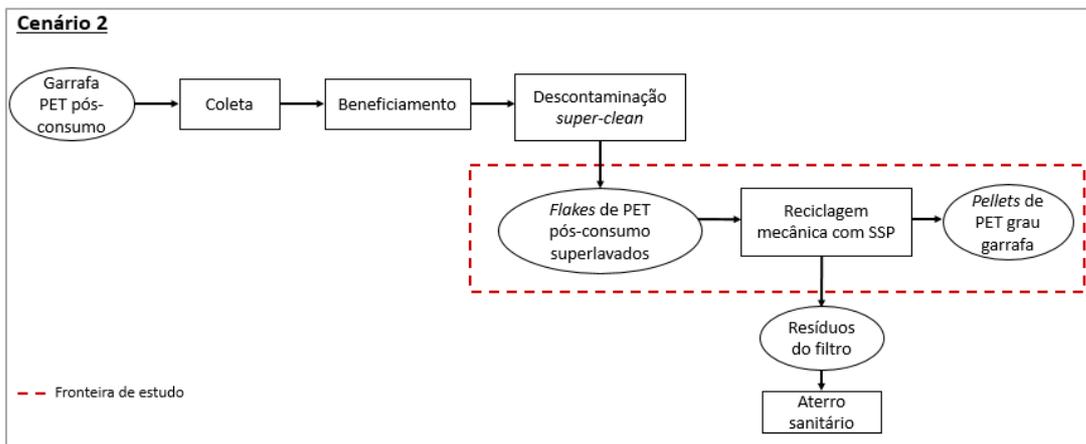


Figura 12: Fronteiras e processos incluídos na ACV do cenário 2.

(Fonte: elaboração própria)

Nesse processo, foram utilizados os dados disponibilizados pela fabricante EREMA, conforme descrito na seção 4.1 deste trabalho.

4.2.2. Fase 2 – ICV

Coleta de Dados

Para a obtenção de dados relativos ao processo de reciclagem mecânica com mistura de PET (cenário 1A, 1B e 1C), dados da literatura foram utilizados para o consumo de água de lavagem e soda cáustica 30% (PERUGINI; MASTELLONE; ARENA, 2003). Para os dados de eficiência energética, foi realizada uma pesquisa junto a uma unidade produtiva que realiza esse processo no Brasil. Através de visita de campo e preenchimento de questionário por funcionários da empresa, obtiveram-se os dados apresentados na Tabela 3. Mais detalhes não foram fornecidos a fim de manter a confidencialidade exigida.

Tabela 3: Dados primários do processo de reciclagem mecânica convencional para a reciclagem de flake para obtenção de 1t de *pellets* de PET.

RECICLAGEM MECÂNICA CONVENCIONAL			
	Cenários		
INPUTS	1A	1B	1C
<i>Pellet</i> de PET virgem (t)	0,65	0,80	0,95
<i>Flake</i> de PET (t)	0,35	0,20	0,05
Eletricidade (MJ/t PET)	1546	1546	1546
NaOH 30% (kg)	3,5	2,0	0,5
Água de lavagem (m ³)	1036	592	148
OUTPUTS			
<i>Pellet</i> de PET reciclado Grau Garrafa(t)	1	1	1

Fonte: Dados primários obtidos através de contato com unidade produtiva.

A fim de validar o dado de consumo energético apresentado para o processo de reciclagem mecânica convencional, foi feita uma pesquisa bibliográfica para verificar se os dados fornecidos pela empresa visitada estavam compatíveis com os dados da literatura. Verificou-se que a ordem de grandeza do gasto de energia encontra-se em conformidade com a apresentada na literatura (KENT, 2008) para reciclagem mecânica de 1 tonelada de PET (447 kWh/t *pellet*).

Em relação à obtenção dos dados associados ao processo de reciclagem mecânica com SSP (cenário 2), foi feita uma consulta (através da internet) com algumas das principais fabricantes dessa tecnologia (EREMA, OHL, Krones). Os dados da fabricante EREMA foram utilizados, pois foram aqueles divulgados pela empresa. A fabricante EREMA divulga que sua tecnologia é uma das aprovadas e utilizadas para reciclagem *bottle-to-bottle* no Brasil em unidade produtiva, como exemplo da Empresa CPR Rio (fonte: encarte técnico CPR). As informações de entradas e saídas sobre o processo EREMA que foram utilizados neste trabalho estão mostradas na Tabela 4.

Tabela 4: Dados sobre o processo de reciclagem mecânica com SSP partindo de *flake* para produção de 1t de *pellets* de PET grau garrafa.

Reciclagem Mecânica com SSP – EREMA (VACUREMA ®)	
INPUTS	
<i>Flake</i> de PET pós-consumo (t)	1,00
Eletricidade (MJ/t PET)	1080
NaOH 30% (kg)	10
Água de lavagem (m ³)	2960
OUTPUTS	
<i>Pellet</i> de PET reciclado Grau Garrafa(t)	1

Fonte: “VACUREMA” - tecnologia *bottle-to-bottle* da fabricante austríaca EREMA

(Dados secundários disponíveis em:

https://www.ereama.com/en/vacurema_bottle_to_bottle/)

A tecnologia denominada “VACUREMA” é um processo de reciclagem mecânica com pós-condensação em estado sólido (SSP) patenteado pela fabricante EREMA.

Em ambos os processos, nota-se um percentual de aproximadamente 3% de perda de PET nos processos de extrusão. Este dado foi obtido através de entrevista com profissional que trabalhou em uma das unidades produtivas e também através de dados da literatura (SHEN *et al.*, 2011). Esse valor considera as limpezas de filtro que devem ser realizadas periodicamente, quando este está saturado. Todavia, para efeito de comparação dos cenários, o valor contabilizado em ambos os sistemas seria o mesmo, de forma que foi considerado fora da fronteira de estudo, como visto nas Figuras 9, 10, 11 e 12.

Nota-se que o consumo da energia elétrica é atribuído aos equipamentos utilizados essencialmente no processo de reprocessamento por extrusão. Outros equipamentos possivelmente em uso como ar condicionado, ventiladores e computadores não foram contabilizados para ambos os cenários. Para o estudo, foram utilizados os dados secundários dos Inventários do Ciclo de Vida de energia elétrica do Brasil disponibilizados pela *PE International* no banco de dados do GaBi (GABI, 2012).

Neste estudo, a funcionalidade dos produtos virgem e reciclado é considerada idêntica. Para cumprir os regulamentos em matéria de segurança alimentar, a resina

de garrafa de PET reciclada é produzida através de processos de reciclagem que utilizam a superlimpeza (VAN DER VELDEN, 2010).

Essas informações foram inseridas no *software* GaBi versão 6 e possibilitaram a modelagem dos cenários de reciclagem de PET, a realização do ICV, a Análise do Inventário de Ciclo de Vida e a interpretação dos resultados.

4.2.3. Fase 3 - AICV

Método de Caracterização

A fim de auxiliar a interpretação da longa lista do ICV, empregou-se um procedimento de Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) disponível no GaBi e que apresenta aplicação de abrangência global para as categorias de impacto mudança climática, destruição da camada de ozônio e consumo de recursos (EC-JRC, 2010a; MENDES *et al.*, 2015).

A categorização de impactos utilizada no presente estudo foi realizada a partir do método *ReCiPe 2008(H)* normalização “*endpoint*”, disponível no programa GaBi versão 6. A ponderação de aplicação global foi a avaliada. Neste caso, todas as entradas estão ligadas entre si de acordo com o método ReCiPe (Figura 5).

Essa escolha baseou-se no fato do método de AICV ReCiPe “*endpoint*” oferecer resultados que harmonizam as abordagens “*midpoint*” e “*endpoint*” em uma estrutura combinada, onde as três categorias de danos e as contribuições dos diversos indicadores intermediários contribuem para uma pontuação única global. O resultado final do método é dado em uma pontuação única adimensional equivalente por pessoa.

A perspectiva “hierárquica” ou (H) é uma das opções de ponderação do método ReCiPe e foi selecionada, pois busca um consenso entre as perspectivas de longo e de curto prazo, onde o prazo de 100 anos é o utilizado. É uma perspectiva comumente utilizada e referenciada em princípios políticos e normas como a ISO 14044 (GOEDKOOOP *et al.*, 2013a). A seleção do prazo é uma escolha que depende do escopo do estudo e que afeta os fatores de caracterização (Anexo A).

Também foram avaliadas as categorias *midpoint* de maior relevância para os sistemas. As 18 categorias de impacto do método ReCiPe foram avaliadas. Essas categorias de impacto intermediário são importantes para indicar os pontos críticos e para mostrar os impactos mais significativos de um sistema no meio ambiente.

Além disso, uma análise de sensibilidade foi conduzida a partir da aplicação de método de avaliação de impacto distinto para investigar a eventual existência de elementos diferentes no inventário de dados e para verificar o efeito das escolhas metodológicas. Para isso, utilizou-se o método CML 2001.

4.2.3. Fase 4 - Interpretação

A partir dos seis cenários propostos, cenário zero, cenário 1A, 1B, 1C e cenário 2 foi feita uma comparação qualitativa e quantitativa dos resultados.

Na Tabela 4 a seguir, foram resumidos os dados utilizados e as informações relacionadas aos mesmos.

Tabela 5: Resumo dos dados dos processos utilizados para a elaboração do ICV do estudo em questão e suas referências.

<i>Processo</i>	<i>Valor</i>	<i>Dados do Processo</i>	<i>Referência</i>	<i>Cenário Utilizado</i>
Eletricidade - Rec. Mecânica com PET virgem	1546 MJ/t	PE International (2002) / Brasil (BR)	Dado primário; Kent (2008)	1
Eletricidade - Rec. Mecânica com SSP	1080 MJ/t	PE International (2002) / Brasil (BR)	EREMA (VACUREMA)	2
NaOH 30%	10 kg/t flake PET	-	Arena et. al. (2003)	1 e 2
Água de lavagem	2960 m ³	-	Arena et. al. (2003)	1 e 2
PET Virgem	65/80/95% em massa	PE International (2012) / Alemanha (DE)	Shen et. al. (2011) (mínimo de 65% PET virgem)	0 e 1

Fonte: Elaboração própria com base nas referências.

5. Resultados e Discussões

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos e suas análises por meio das metodologias e ferramentas definidas no Capítulo 4. Os resultados serão apresentados na forma de tópicos de acordo com a sequência estabelecida para os cenários na metodologia do trabalho.

5.1. Inventário de Ciclo de Vida

A partir da coleta dos dados primários e secundários referentes ao estudo e utilizando a unidade funcional estudada, foi realizado o ICV.

5.1.1. Cenário Zero

Como detalhado na metodologia (seção 4.2.1), este cenário foi elaborado através da base de dados *PE international* disponível no *software* GaBi para a produção de resina de PET virgem (PE INTERNATIONAL, 2012). Esta modelagem incluiu o processo de produção de *pellets* de PET virgem (1t) disponível na base de dados.

Este cenário foi utilizado para avaliar qualitativamente e quantitativamente os impactos associados à produção de grânulos de PET a partir do petróleo e compará-los aos cenários em que o produto final provém de material reciclado.

5.1.2. Cenário 1 (variações 1A, 1B, 1C)

Os cenários foram modelados no GaBi segundo a variação percentual na entrada de PET pós-consumo proposta. Cenários com entrada de 70, 90 e 95% (em massa) de grânulo de resina virgem e, portanto, 30, 10 e 5% de PET pós-consumo, respectivamente, estão detalhados nas Figuras 12, 13 e 14.

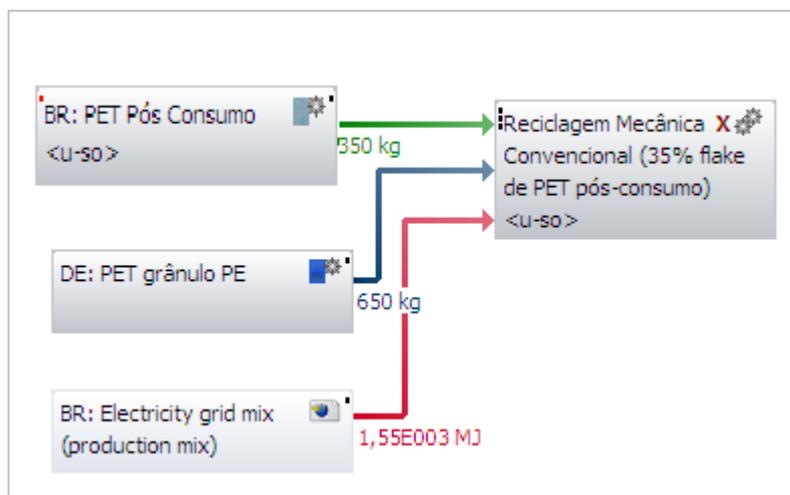


Figura 13: Plano modelado no GaBi para o cenário 1A (65% PET virgem e 35% PET pós-consumo).

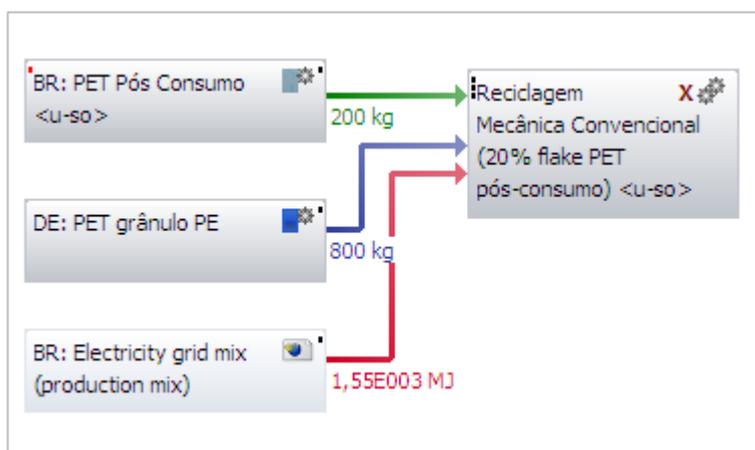


Figura 14: Plano modelado no GaBi para o cenário 1B (80% PET virgem e 20% PET pós-consumo).

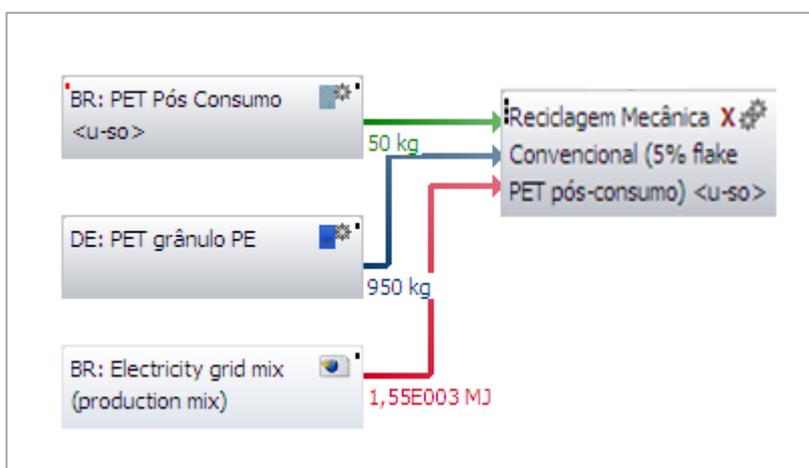


Figura 15: Plano modelado no GaBi para o cenário 1C (95% PET virgem e 5% PET pós-consumo).

5.1.3. Cenário 2

Os dados apresentados pela fabricante EREMA para seu processo de reciclagem mecânica com SSP denominado “VACUREMA” foram modelados no GaBi. Para o consumo energético, a fonte relatou que o valor apresentado foi medido sem a consideração do transporte de material, o que está de acordo com as fronteiras definidas para este trabalho.

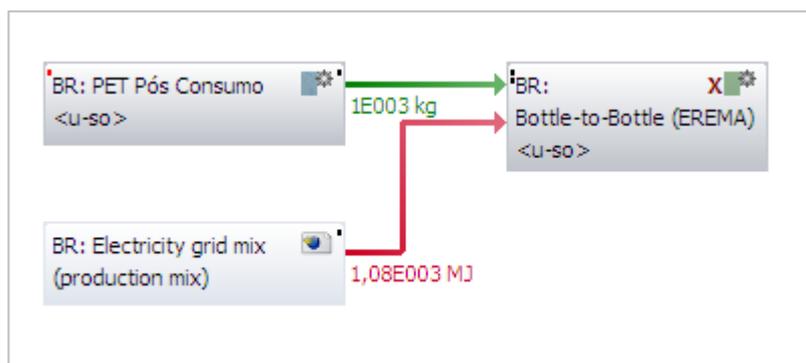


Figura 16: Plano modelado no GaBi para o cenário 2.

5.2. Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida

A partir da definição do ICV, foi possível proceder com a obtenção dos resultados da AICV. Para isso, foi realizada a classificação dos impactos e avaliação através de modelo de caracterização, com auxílio do *software* GaBi.

Para cada cenário, foram demonstrados os principais impactos e categorias afetadas segundo o método de caracterização *ReCiPe 2008(H)*.

5.2.1. Cenário Zero

Tabela 6: Dados de impacto potencial do cenário zero a partir do método “*ReCiPe 2008(H), End-point Normalization, World*” (Unidade: pontuação única equivalente por pessoa).

Categoria de Impacto	Pontuação Única Equivalente por Pessoa	Impacto (%)
Consumo de Recursos Fósseis	370	75
Mudanças Climáticas (Saúde Humana)	92	19
Toxicidade Humana	15	3
Mudanças Climáticas (Ecossistemas)	10	2
Formação de Material Particulado	8	1
Consumo de Recursos Minerais	1	-
Total ReCiPe 2008(H)	496	100

Fonte: Elaboração própria com base no resultado da modelagem.

A partir dos resultados apresentados com auxílio do GaBi, utilizando-se a base de dados disponível e o método de caracterização referenciado, verificou-se que o processo de produção de PET virgem apresenta seu principal impacto no consumo de recursos fósseis (75%), como visto na Figura 17. Isto se dá, pois, os grânulos de PET são produzidos a partir da extração e refino do petróleo, um composto de origem fóssil, que leva milhões de anos para se formar sob temperatura e pressão, composto por uma mistura de hidrocarbonetos e compostos diversos (PRADO, 2007).

Além disso, há consideráveis impactos associados à categoria mudanças climáticas, que irão contribuir para prejuízos à saúde humana (19%) e também para os ecossistemas (2%). Esta categoria é avaliada em termos de emissão de CO₂ equivalente. Para isso, há a conversão dos diversos gases causadores do efeito estufa, como o CH₄ (metano) e o N₂O (óxido nitroso), em termos equivalentes de CO₂. No cenário em questão, a extração e refino do petróleo para obtenção de derivados que possibilitam a fabricação de resina PET incluem etapas que emitem gases causadores do efeito estufa, como o craqueamento. Assim, estas emissões de

CO₂ equivalente ao longo das etapas de produção de grânulos de PET contribuem para a emissão de poluentes na atmosfera e para a categoria de mudanças climáticas.

A categoria toxicidade humana (avaliada em termos de 1,4 diclorobenzeno) e formação de material particulado (calculada a partir de contribuições de PM₁₀) também foram categorias de impacto que apresentaram números significativos. Suas contribuições também são provenientes, principalmente, do processo de extração e refino do petróleo.

Para as demais categorias de impacto não foram verificados significativos impactos neste cenário. O processo de produção de 1t de *pellets* de PET virgem totalizou um impacto de aproximadamente 496 unidades equivalentes por pessoa, de acordo com a base de dados e segundo o modelo ReCiPe 2008(H).

5.2.2. Cenário 1A

A partir da modelagem definida na seção 5.1.2 para o cenário 1A em que foi estimada a entrada de 35% de *flake* de PET pós-consumo no sistema e 65% de PET virgem, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Dados gerais de impacto potencial do cenário 1A a partir do método “ReCiPe 2008(H), End-point Normalization, World”.

CATEGORIA DE IMPACTO	Pontuação Única Equivalente Por Pessoa			Impacto (%)
	PET virgem	Reciclagem (Eletricidade)	Total	
Consumo de Recursos Fósseis	243,4	2,9	246,3	74
Mudanças Climáticas (Saúde Humana)	63,6	3,5	67,1	19
Toxicidade Humana	9,9	-	9,9	3
Mudanças Climáticas (Ecossistemas)	7,1	0,4	7,5	2
Formação de Material Particulado	6,0	0,9	6,9	2
Consumo de Recursos Minerais	0,7	0,1	0,8	-
Demais Categorias	0,4	0,3	0,7	-
Contribuição para ReCiPe 2008(H)	331,1	8,1	339,2	100

Fonte: Elaboração própria com base no resultado da modelagem.

O processo citado “PET virgem” diz respeito à entrada de grânulos produzidos a partir de matéria-prima virgem. O processo “Eletricidade” refere-se à demanda de consumo energético que constitui entrada do processo de reciclagem mecânica convencional. Estes processos se repetirão nos demais cenários 1B, 1C, que apenas se distinguem do 1A em relação ao percentual de PET virgem adicionado.

Sob a ótica de ciclo de vida, verifica-se que a entrada do consumo da água de lavagem e também do aditivo químico da superlavagem (NaOH 30%) não apresentam grandes contribuições para as categorias de impacto do modelo de avaliação (ReCiPe 2008) frente ao potencial poluidor do processo completo de produção de resina de PET virgem.

A partir desses resultados, foi determinado que o consumo de recursos fósseis foi a principal categoria de impacto encontrada no cenário 1A, os percentuais relativos à cada categoria em relação do resultado geral podem ser visualizados na última coluna da Tabela 7.

Apresentando a contribuição de aproximadamente 74% do impacto relativo ao cenário 1A, a categoria de consumo de recursos fósseis é avaliada em termos de consumo de petróleo. Como este cenário apresenta 70% (em massa) de sua matéria-prima composta por PET virgem, tem todos os impactos relacionados à produção desse polímero atrelados, desde a extração do óleo cru. Assim, como no cenário zero, os resultados da avaliação de desempenho ambiental do sistema de produto estão relacionados, principalmente, ao processo de produção de PET virgem. Deste modo, a contribuição para a categoria mudanças climáticas também está primordialmente ligada ao processo de produção da resina virgem. A demanda de eletricidade relativa ao processo de reciclagem mecânica convencional também contribui para a emissão de CO₂ equivalentes (categoria mudança climática) e para o consumo de recursos fósseis, no entanto, como é possível visualizar pela Figura 17, essa contribuição é muito pequena se comparada à contribuição relativa ao PET virgem.

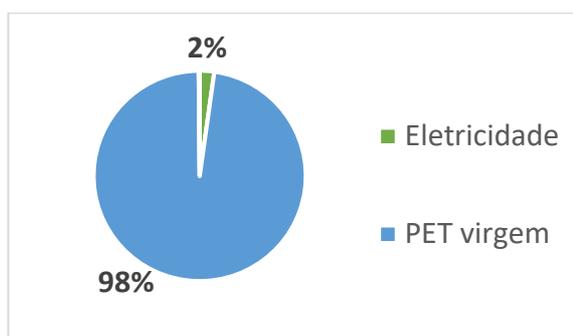


Figura 17: Contribuições dos processos de entrada e saída para o cenário 1A de acordo com ReCiPe 2008(H).

Fonte: Elaboração própria com base no resultado da modelagem.

Para as demais categorias de impacto não foram apresentados impactos significativos no cenário 1A. O processo de produção de 1t de *pellets* de PET a partir da reciclagem mecânica convencional com mistura de 50% em massa de PET pós-consumo totalizou um impacto de aproximadamente 340 unidades equivalentes por pessoa, de acordo com a base de dados e segundo o modelo ReCiPe 2008(H).

5.2.3. Cenário 1B

A Tabela 7 apresenta os valores obtidos com a modelagem do cenário 1B em que foi estimada a entrada de 20% de *flake* de PET pós-consumo e, portanto, 80% em massa de grânulos de PET virgem.

Tabela 8: Dados gerais de impacto potencial do cenário 1B pelo método “*ReCiPe 2008(H), End-point Normalization, World*”.

CATEGORIA DE IMPACTO	Pontuação Única Equivalente Por Pessoa			Impacto (%)
	PET virgem	Reciclagem (Eletricidade)	Total	
Consumo de Recursos Fósseis	279,9	2,9	282,8	74
Mudanças Climáticas (Saúde Humana)	73,1	3,5	76,6	19
Toxicidade Humana	11,4	-	11,4	3
Mudanças Climáticas (Ecossistemas)	8,2	0,4	8,6	2
Formação de Material Particulado	6,9	0,9	7,8	2
Consumo de Recursos Minerais	0,8	0,1	0,9	-
Demais Categorias	0,5	0,3	0,8	-
Contribuição para ReCiPe 2008(H)	380,8	8,1	388,9	100

Fonte: Elaboração própria com base no resultado da modelagem.

A partir desses resultados, foi verificado que o consumo de recursos fósseis foi a principal categoria de impacto no cenário 1B.

Para as demais categorias de impacto não foram apresentados impactos significativos no cenário 1B. O processo de produção de 1t de *pellets* de PET a partir da reciclagem mecânica convencional com mistura de 10% em massa de PET pós-consumo totalizou um impacto de em torno de 390 unidades equivalentes por pessoa, de acordo com a base de dados e segundo o modelo ReCiPe 2008(H).

Verificou-se que os percentuais de contribuição para cada categoria de impacto permanecem os mesmos que os do cenário 1A, conforme a Figura 16, de modo que, apesar de contribuir para o impacto global do sistema, a demanda de eletricidade continua representando apenas 2% do total. O processo de fabricação da resina de PET virgem permanece refletindo os impactos ambientais mais significativos.

5.2.4. Cenário 1C

A Tabela 9 apresenta os valores obtidos com a modelagem do cenário 1C em que foi estimada a entrada de 5% de *flake* de PET pós-consumo e, portanto, 95% em massa de grânulos de PET virgem.

Tabela 9: Dados gerais de impacto potencial do cenário 1C pelo método “*ReCiPe 2008(H), End-point Normalization, World*”.

CATEGORIA DE IMPACTO	Pontuação Única Equivalente Por Pessoa			Impacto (%)
	PET virgem	Reciclagem (Eletricidade)	Total	
Consumo de Recursos Fósseis	351,6	2,9	354,5	74
Mudanças Climáticas (Saúde Humana)	87,7	3,5	91,2	19
Toxicidade Humana	14,3	-	14,3	3
Mudanças Climáticas (Ecossistemas)	9,8	0,4	10,2	2
Formação de Material Particulado	7,5	0,9	8,4	2
Consumo de Recursos Minerais	0,9	0,1	1	-
Demais Categorias	0,2	0,3	0,5	-
Contribuição para ReCiPe 2008(H)	472	8,1	480,1	100

Fonte: Elaboração própria com base no resultado da modelagem.

A partir desses resultados, foi verificado que o consumo de recursos fósseis foi a principal categoria de impacto encontrada no cenário 1C.

Para as demais categorias de impacto não foram apresentados impactos significativos no cenário 1C. O processo de produção de 1t de *pellets* de PET a partir da reciclagem mecânica convencional com mistura de 5% em massa de PET pós-consumo totalizou um impacto de 480 unidades equivalentes por pessoa de acordo com a base de dados e segundo o modelo ReCiPe 2008(H).

Nota-se que a principal fonte de impacto do sistema continua sendo derivada do percentual de PET virgem utilizado, sendo este superior ao do cenário 1B.

Dessa forma, ao ser responsável por 95% da constituição do produto, o PET virgem contribui para 98% do impacto total do sistema, enquanto a demanda de energia do processo de reciclagem mecânica representa apenas 2% dos impactos totais.

5.2.5. Cenário 2

A Tabela 10 apresenta os valores obtidos com a modelagem do cenário 2 em que foi realizada a reciclagem de *flakes* de PET pós-consumo através do processo de reciclagem mecânica com SSP conforme descrito na metodologia, na seção [4.2.1](#) deste trabalho.

Tabela 10: Dados gerais de impacto potencial do cenário 2 pelo método “*ReCiPe 2008(H), End-point Normalization, World*”.

CATEGORIA DE IMPACTO	Pontuação Única Equivalente Por Pessoa	Impacto (%)
	Reciclagem (Eletricidade)	
Mudanças Climáticas (Saúde Humana)	2,5	44
Consumo de Recursos Fósseis	2,0	36
Formação de Material Particulado	0,6	11
Mudanças Climáticas (Ecossistemas)	0,3	5
Uso Terra Agrícola	0,2	3
Consumo de Recursos Minerais	0,1	1
Demais Categorias	-	-
Contribuição para ReCiPe 2008(H)	5,7	100

Fonte: Elaboração própria com base no resultado da modelagem.

Neste cenário, o sistema de reciclagem com pós-condensação em estado sólido não necessita de aporte de PET virgem para que a viscosidade intrínseca dos grânulos de PET (gerados ao final do processo) adquira o valor necessário para a moldagem de garrafa, então os impactos provocados em cada categoria são consideravelmente inferiores se comparados ao cenário de reciclagem mecânica convencional com aporte de PET virgem. Isso se dá, pois, a produção de PET virgem ocorre a partir da extração e exploração do petróleo, atividade de significativo impacto ambiental.

No cenário 2, os grânulos de PET grau garrafa são produzidos apenas a partir de PET pós-consumo, uma vez que o processo de pós-condensação provê o aumento da VI dos *pellets* de PET ao grau garrafa sem que haja a necessidade de mistura com PET virgem. Assim, a matéria-prima do processo é considerada livre de impactos, pois estes foram atribuídos ao primeiro ciclo de vida da garrafa PET (abordagem *cut-off*).

Na Tabela 10, percebe-se que a contribuição do sistema do cenário 2 é maior para a categoria de impacto mudanças climáticas (saúde humana), com 42% dos impactos do cenário. Isto se dá, pois, as atividades citadas apresentam emissões de gases causadores do efeito estufa, que contribuem para o quantitativo de CO₂ equivalente da categoria.

A matriz de eletricidade utilizada foi a brasileira, de acordo com a base de dados. Esta considera um cálculo das diversas fontes utilizadas no país, que é predominantemente de origem hidroelétrica, mas também possui origens termoelétricas e nucleares. Portanto, a emissão de gases causadores do efeito estufa (em termos de CO₂eq) do processo são pequenas e estão atreladas à parcela de indústrias termoelétricas utilizadas no país em caso de necessidade, o que também provoca alguma contribuição para a categoria de consumo de recursos fósseis. Ainda, dentre as categorias que apresentaram impacto significativo, aparece uma categoria distinta dos cenários anteriores, a chamada “Uso da Terra Agrícola”. Calculada em termos de m² de terras agrícolas utilizados por ano (Anexo A), este impacto está relacionado às grandes áreas alagadas em muitas das centrais hidroelétricas brasileiras que poderiam ser agricultáveis.

5.3. Interpretação

Devido ao restrito acesso à dados de consumo e eficiência de empresas de reciclagem, o presente trabalho avaliou o desempenho ambiental basicamente através de dados de consumo energético e da estimativa de necessidade de mistura ao PET virgem, no caso da reciclagem mecânica com mistura de PET virgem. Dados de consumo de água de lavagem e de adição de NaOH 30% (aditivo químico da superlavagem) também foram adquiridos via pesquisa bibliográfica e adicionados ao sistema, de acordo com o percentual de entrada de *flake* nos cenários 1A, 1B e

1C e para 1t de entrada de *flake* de PET pós-consumo no cenário 2. No entanto, estas entradas não representaram fonte de impacto significativo a título de comparação entre cenários, uma vez que o cenário 1 e suas variações têm grande parte de seus impactos associados à entrada de PET virgem e seu potencial poluidor desde o “berço”, com a extração do petróleo.

O estabelecimento de estimativas de incerteza em fatores de normalização foi considerado fora do escopo deste estudo. A incerteza nos resultados da normalização é causada por uma combinação de incerteza nos dados de emissão e incerteza nos fatores de caracterização (SLEESWIJK *et al.*, 2008).

Os resultados, de forma geral, podem ser observados na Tabela 11 junto às principais categorias impactadas em cada um dos cenários.

Tabela 11: Resultados dos cenários para a reciclagem de PET grau garrafa em ciclo fechado.

CATEGORIA DE IMPACTO	CENÁRIOS (Pontuação Única Equivalente Por Pessoa)			
	1A	1B	1C	2
Consumo de Recursos Fósseis	246,3	282,8	354,5	2,0
Mudanças Climáticas (Saúde Humana)	67,1	76,6	91,2	2,5
Toxicidade Humana	9,9	11,4	14,3	-
Mudanças Climáticas (Ecossistemas)	7,5	8,6	10,2	0,3
Formação de Material Particulado	6,9	7,8	8,4	0,6
Total ReCiPe 2008(H)	339,2	388,9	480,1	5,7

Fonte: Elaboração própria com base no resultado da modelagem.

Em relação às 18 categorias de impacto *midpoint* citadas pelo método, as 4 citadas na tabela 11 foram aquelas que apresentaram os valores mais significativos para o presente estudo.

Portanto, nos cenários apresentados para a produção de 1t de *pellets* de PET grau garrafa, os impactos foram mais significativos para as categorias: consumo de recursos fósseis; mudanças climáticas; toxicidade humana e formação de material

particulado. Essas categorias de impacto intermediário antes de apresentarem normalização *endpoint* dada pelo método são calculadas em termos de consumo de kg de óleo cru eq, emissão de kg de CO₂ eq, emissão de 1,4 – DCB eq e emissão de PM₁₀, respectivamente e conforme descrito no Anexo A.

Entre todos os cenários, aquele que apresentou os impactos menos significativos para o presente trabalho, em todas as categorias, foi o cenário 2, no qual foi modelado o processo de reciclagem mecânica com pós-condensação em estado sólido. O resultado final do desempenho ambiental deste cenário é aproximadamente 60 vezes menor que o desempenho ambiental do cenário 1 de impacto menos significativo, ou seja, o cenário 1A (com menor percentual de PET virgem). O principal fator determinante para o resultado em questão, foi a ausência de qualquer quantitativo de resina de PET virgem dentro das fronteiras do sistema de produto deste cenário.

A presença do processo de produção de resina virgem em uma ACV pode estar alocada de tal forma que as entradas e saídas desde o “berço”, de onde se extrai a matéria-prima para a produção de PET virgem, ou seja, o petróleo, estejam sendo consideradas. Assim, todos os processos relativos à extração, ao transporte, refino e produção dos grânulos de PET virgem estarão sendo contabilizados a partir de informações abastecidas na base de dados do *software* de trabalho e referenciadas neste trabalho. Desse modo, qualquer cenário de reciclagem mecânica convencional que necessite de aporte de quantitativo de PET virgem para que a viscosidade intrínseca do produto final seja adequada ao grau garrafa (superior a 0,7 dl/g), apresentará significativos impactos provenientes do processo produtivo da resina de matéria-prima virgem. Já o processo de reciclagem mecânica com pós-condensação em estado sólido, apesar de demandar maior investimento inicial, possibilita que o grau garrafa seja obtido sem a necessidade de mistura de resina virgem. Desta forma, toda a matéria-prima polimérica presente no cenário 2 é proveniente de resíduos de garrafa PET pós-consumo, material descartado cujo ciclo de vida terminaria em aterros ou lixões, provocando impactos ambientais. Então, a partir da abordagem de alocação “*cut-off*”, na qual os impactos de um produto reciclado ficam limitados a seu primeiro ciclo de vida, toda a matéria-prima da reciclagem com SSP é livre de impactos. Por esses motivos, os valores dos impactos do cenário 2 são significativamente distintos e inferiores em relação a todos os cenários de

reciclagem mecânica com mistura de PET virgem, mesmo àquele que apresenta o menor percentual de PET virgem (65%, em massa).

A partir dos valores apresentados na Tabela 11, pode-se perceber que o cenário zero apresentou uma pontuação única de aproximadamente 496 pontos equivalentes por pessoa, valor referente ao somatório dos impactos das categorias segundo o método ReCiPe 2008(H) normalização *endpoint*. Esse valor está ligado à produção de *pellets* de PET virgem a partir de subprodutos do refino do petróleo. A extração desse recurso fóssil impacta diretamente a categoria “consumo de recursos fósseis”, pois esta, quando categoria *midpoint*, é calculada de acordo com o consumo de kg de óleo cru equivalentes. Esta unidade normalizada é, por convenção, equivalente à quantidade aproximada de energia que pode ser extraída de um quilograma de petróleo bruto (42 MJ/kg) e pode ser usada para comparar a energia de diferentes fontes (GOEDKOOPE *et al.*, 2013a). Assim, estão incluídos no valor de 356 pontos ou aproximadamente 74% de todos os impactos do processo de produção de grânulos de PET virgem, a utilização de recursos fósseis necessária prevista pela base de dados para a fabricação de 1t do material virgem (seja como matéria-prima, combustível para transporte, entre outras). A segunda categoria mais impactada foi a categoria “mudanças climáticas” com impactos à saúde humana, com aproximadamente 19% dos impactos do sistema e com impactos ao ecossistema com 2% do total do cenário. Esta categoria *midpoint* é avaliada em kg de CO₂ equivalentes e suas contribuições também são principalmente provenientes das etapas de obtenção das matérias-primas do PET. Essa categoria de impacto indica que as mudanças climáticas podem causar uma série de mecanismos ambientais que afetam tanto a saúde humana como a saúde do ecossistema (HISCHIER *et al.*, 2010). Menos expressivas, as categorias de “toxicidade humana” e “formação de material particulado” também compuseram a lista dos principais impactos do cenário zero. A primeira inventaria a contaminação humana por exposição a substâncias tóxicas liberadas em atividades antrópicas, nas quais os fatores de equivalência são calculados através da razão entre as doses diárias aceitáveis e a ingestão diária prevista, e são expressos em kg de 1,4-diclorobenzeno equivalente (DCB eq) (PEGORARO, 2008). Como o nome diz, a categoria formação de material particulado inventaria atividades que tem material particulado em seus resíduos, sendo este na forma de PM₁₀ (PM, *particulate matter* - sigla em inglês). As partículas de PM₁₀ possuem tamanho entre 2,5 e 10 micrômetros e podem ser

formadas por diversos materiais como compostos químicos orgânicos, ácidos, sulfatos e nitratos, metais, entre outros componentes (BRAUN *et al.*, 2004). As maiores fontes de particulados no cenário apresentado são possivelmente provenientes das indústrias de extração e refino de petróleo, da queima de combustíveis fósseis em motores de combustão de veículos (transporte) e de termoelétricas eventualmente utilizadas para a produção de energia.

O cenário 1 representou o sistema de reciclagem convencional com adição de PET virgem, cujos dados de consumo energético foram obtidos através de dados primário, conforme descrito na metodologia. Suas variações foram efetuadas em termos da variação do percentual de PET virgem, de acordo com valores que priorizassem a obtenção do grau garrafa do produto final. No entanto, essas variações percentuais foram estimativas e podem se alterar conforme a viscosidade intrínseca do material pós-consumo que entra no processo de reciclagem. A VI diminui durante o processo de extrusão devido à quebra das cadeias do polímero (WELLE, 2011), portanto, deve ser adicionado PET virgem para que o grau garrafa seja novamente atingido. Foram escolhidos os valores de entrada de PET pós-consumo de 35%, 20% e 5% em massa, logo, 65%, 80% e 95% de entrada de PET virgem, respectivamente. Essa variação percentual de entrada de matéria-prima virgem possibilitou que os efeitos do seu desempenho ambiental pudessem ser avaliados. Ainda, a quantidade de energia demandada e de resíduos gerados foi a mesma em todos os cenários de reciclagem mecânica convencional pois está relacionada à quantidade de produto gerado, ou seja, 1t de *pellet* de PET grau garrafa ao final do reprocessamento.

O cenário 1A então apresentou uma variação percentual de 35% (em massa) de PET pós-consumo frente a 65% de PET virgem. Como é possível ver na Figura 19, a configuração das categorias impactadas seguiu o padrão anteriormente visto no cenário zero, influenciada, principalmente, pela entrada do processo de PET virgem e todos os impactos relacionados à sua produção. A categoria de impacto de consumo de recursos fósseis foi aquela que apresentou os impactos mais significativos. A segunda categoria mais impactada nesse cenário foi a de mudanças climáticas sobre a saúde humana. O total deste cenário totalizou aproximadamente 340 pontos equivalentes por pessoa.

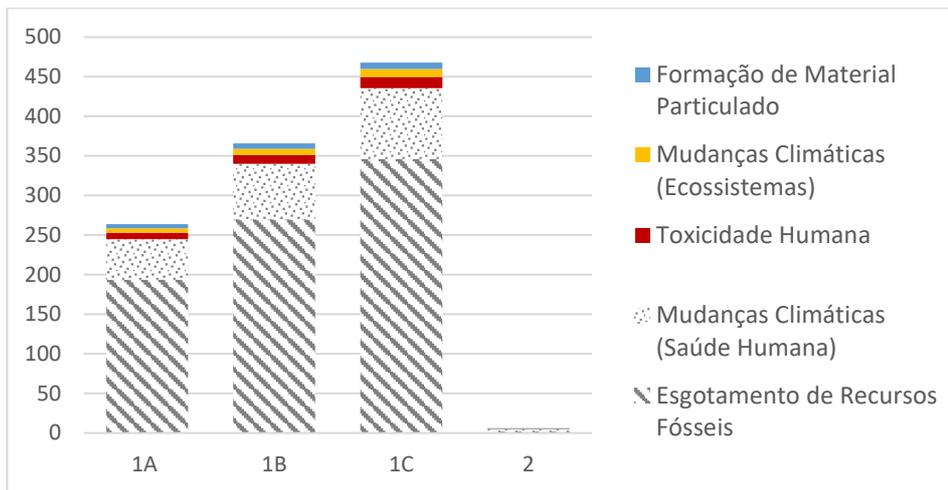


Figura 18: Impactos apresentados em cada cenário.

Fonte: Elaboração própria com base no resultado da modelagem.

No cenário 1B foi feita a modelagem de um cenário de reciclagem mecânica convencional com entrada de 20% (em massa) de PET pós-consumo, ou seja, 80% de PET virgem ou 15% a mais que o cenário 1A. Dessa forma, seguiu a ordem de magnitude de impacto apresentada no cenário 1A, o cenário 1B totalizou aproximadamente 390 pontos equivalentes por pessoa no total de impactos das categorias, segundo o método ReCiPe 2008(H) *endpoint*. O acréscimo de 15% de PET virgem (em massa) em relação ao cenário 1A provocou um aumento proporcional nos impactos gerais do sistema.

O cenário 1C simulou um cenário de reciclagem mecânica convencional com entrada de 5% (em massa) de PET pós-consumo e 95% de PET virgem. Foram contabilizados aproximadamente 480 pontos equivalentes por pessoa no total de impactos das categorias, segundo o método ReCiPe 2008(H) *endpoint*. O acréscimo de 15% de PET virgem em relação ao cenário 1B provocou um aumento também proporcional nos impactos gerais do sistema.

A análise comparativa por meio da variação do percentual de PET virgem adicionado ao processo de reciclagem mecânica convencional foi realizada para uma avaliação da tendência dos resultados do desempenho ambiental desses cenários. A tendência de evolução dos impactos de acordo com os percentuais de PET virgem apresentados demonstrou-se proporcional ao percentual de entrada de PET virgem. Enfatiza-se que os percentuais de mistura de PET virgem são estimativas baseadas na literatura (MANCINI *et al.*, 2004; KENT, 2008) e que

visam, primordialmente, a obtenção do PET grau garrafa. Pelos valores apresentados, observa-se que a evolução dos impactos totais calculados a partir do método escolhido e dos percentuais de PET virgem praticados apresenta linearidade, sendo linear com o aumento de PET virgem utilizado.

A Figura 19 apresenta em linha os impactos ambientais totais de cada cenário em escala de proporcionalidade aproximada. Verifica-se que quão maior o percentual de PET virgem presente no sistema, mais o resultado dos impactos gerados são próximos do cenário zero. Também, que o cenário 2 é aquele que apresenta o sistema de melhor desempenho ambiental para o processo de reciclagem mecânica de PET grau garrafa.

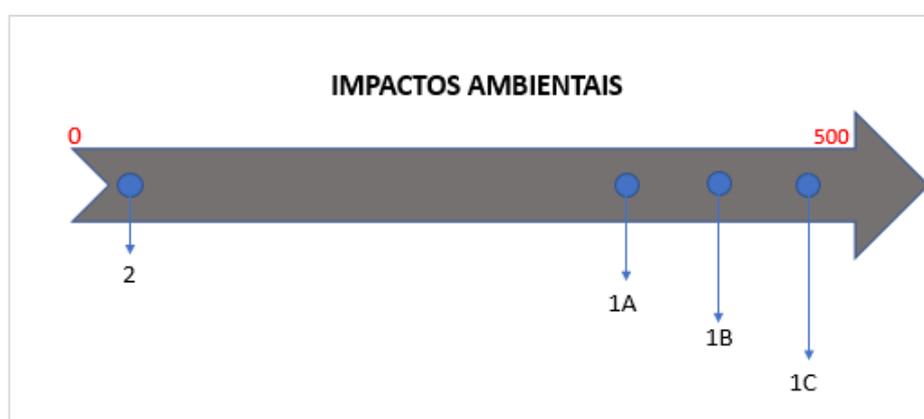


Figura 19: Impactos Ambientais de cada cenário (escala aproximada).

Fonte: Elaboração própria com base no resultado da modelagem.

Na análise de sensibilidade realizada para verificação da consistência dos resultados do método ReCiPe, foi utilizado o método CML 2001 normalização *endpoint* para os cenários 1 e suas variações percentuais de PET virgem. Verificou-se, a partir deste método, que novas denominações são dadas às categorias de impacto intermediário, cujo detalhamento e discussão não fez parte do escopo desse trabalho. Assim, apenas para efeito de verificação de resultados do método ReCiPe 2008, as categorias mais impactadas pelo modelo CML 2001 foram as apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12: Categorias impacto método CML 2001 para os cenários 1A, 1B e 1C.

CML 2001 (Abril de 2013)	Ordem de Impacto das categorias
Potencial de Ecotoxicidade Marinha	1
Depleção de Compostos Abióticos	2
Potencial de Aquecimento Global (100 anos)	3
Potencial de Ecotoxicidade Terrestre	4
Potencial de Oxidação Fotoquímica	5

Uma vez que a discussão completa do método de forma profunda não foi objetivo deste trabalho, os números apresentados pela modelagem no *software* GaBi não foram detalhados, uma vez que apresentam forma de cálculo distinta do método principal utilizado neste trabalho, o método ReCiPe. Portanto, ordem de grandezas diferentes. Assim, as categorias foram citadas de acordo com a sua ordem crescente de magnitude de impacto.

Estes resultaram seguiram a linearidade já apresentada para o método ReCiPe para os cenários 1A, 1B e 1C, de forma que os valores de magnitude de impacto aumentaram proporcionalmente à quantidade de PET virgem adicionada a cada cenário.

Estes resultados do modelo CML 2001 apresentam consistência em relação aos principais impactos apresentados do modelo de caracterização ReCipe 2008, para a normalização *endpoint* em ambos. Isto se dá, pois, as principais categorias de impacto apresentadas nos dois métodos estão relacionadas. Todavia, o modelo de caracterização CML 2001 apresenta diferentes denominações para determinar categorias de impacto semelhantes. Pode-se perceber, a partir da Tabela 12, que categorias de impacto que relacionam os sistemas analisados ao consumo de recursos fósseis (aqui chamado de “depleção de compostos abióticos”), à emissão de gases causadores do efeito estufa (“potencial de aquecimento global”) e ao potencial de toxicidade (“potencial de ecotoxicidade marinha” e “potencial de ecotoxicidade terrestre”) continuam refletindo os principais impactos relacionados aos sistemas modelados nos cenários 1A, 1B e 1C de reciclagem de PET grau garrafa. Estes resultados são similares aos apresentados pelo método ReCiPe, no entanto, o método CML confere maior magnitude de impacto ao potencial de toxicidade dos sistemas analisados, quando o método ReCiPe confere maior magnitude ao consumo de recursos fósseis dos mesmos.

Esta foi uma análise breve e superficial cujo objetivo apenas visou a verificação da sensibilidade do sistema ao método, de forma a refletir qualitativamente se ocorreriam resultados de distinção significativa, o que não ocorreu. Mais tempo de estudo seria necessário para que essa análise pudesse ser aprofundada, sendo esta uma oportunidade de continuação desse estudo. A comparação com outros modelos e formas de normalização, como o estudo conjunto da normalização *midpoint e endpoint* poderá ser feita a fim de agregar mais consistência e possibilidades de discussão a cerca dos resultados obtidos. A normalização *endpoint* apresenta resultados concisos, mas cuja aplicação é melhor apreciada pela literatura quando acompanhada de análises *midpoint*.

6. Conclusões

A crescente produção de garrafas PET demanda soluções sustentáveis para a gestão desse produto, quando resíduo. Nesse contexto, o presente trabalho foi realizou um estudo comparativo do desempenho ambiental de tecnologias de reciclagem de PET que tem como produto final *pellets* de PET grau garrafa.

Por meio dos resultados obtidos nesta pesquisa, verificou-se que o processo de produção dos grânulos de PET a partir de matéria-prima virgem apresenta diversos e significativos impactos ambientais, principalmente relacionados ao consumo de recursos fósseis e à emissão de CO₂ equivalente, contribuindo para os efeitos das mudanças climáticas sobre a saúde humana e os ecossistemas.

A partir do método ReCiPe (normalização *endpoint*) verificou-se que, em um cenário de reciclagem mecânica com mistura de PET virgem (cenário 1), o aumento do percentual dessa matéria-prima influenciará de forma negativa e direta o aumento dos impactos ambientais desse sistema.

Ao ser feito um estudo comparativo entre todos os cenários, verificou-se que o cenário 2, no qual é realizada uma reciclagem mecânica com pós-condensação em estado sólido, é aquele que apresenta o processo de desempenho ambiental de impactos ambientais menos significativos entre os cenários apresentados. Além disso, a magnitude dos valores das principais categorias de impacto avaliadas, como o consumo de recursos fósseis e mudanças climáticas, é muito distante do processo de reciclagem convencional, aproximadamente 60 vezes inferior ao impacto total do cenário 1A (variação do cenário 1 de menor impacto). Essa grande diferença é explicada pela ausência da necessidade de entrada de PET virgem, o que é possível em virtude da tecnologia de pós-condensação em estado sólido, que promove o aumento da viscosidade intrínseca do PET pós-consumo durante a reciclagem.

Através da avaliação de desempenho ambiental realizada, verificou-se que os impactos ambientais estão principalmente relacionados à adição de PET virgem no cenário 1 e suas variações. No cenário 2, percebeu-se que os potenciais impactos ambientais estão atrelados ao consumo energético do processo.

Esse estudo demonstra a pertinência de uma avaliação do ciclo de vida para estudar processos de reciclagem de PET. Ao buscar reduzir a produção de resíduos e fomentar a economia circular, a reciclagem deve ter seus sistemas avaliados, a fim que seu desempenho ambiental. Estudos como esse podem fornecer apoio à tomada de decisões no campo da gestão de resíduos de embalagens. Assim, o uso da ACV mostra-se importante na busca por tecnologias que apresentem melhor desempenho ambiental para o processo de reciclagem de PET, no sentido de gerar impactos menos significativos para o meio ambiente, como um consumo de recursos naturais e emitir menos poluentes.

Ademais, foi constatado, que a literatura científica ainda carece de estudos que relacionem a reciclagem de PET à suas especificações técnicas de produto final, como o grau garrafa. A escassez de estudos científicos que aprofundem essa temática representou uma dificuldade na obtenção de dados para a elaboração desse estudo. É importante enfatizar que a especificação grau garrafa segundo a exigência técnica dos processos de injeção e moldagem ($VI > 0,7 \text{ dl/g}$) é fundamental para que os resultados dos estudos de reciclagem de PET grau garrafa apresentem resultados consistentes e coerentes com a realidade. Portanto, esse estudo reflete grandes oportunidades de aprofundamento do tema, de forma que dados mais precisos possam ser obtidos a fim de agregar ainda mais valor aos resultados.

Referências Bibliográficas

ABIPET - Associação Brasileira da Indústria do PET. **Censo da Reciclagem de PET no Brasil** - 10ª Edição. 2016.

ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Processos de transformação para materiais plásticos**. Disponível em: <http://file.abiplast.org.br/download/links/links2014/apresentacao_sobre_transformacao_vf.pdf>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. 2015. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015**. São Paulo. ABRELPE, 92p. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>>

AWAJA, F.; PAVEL, D. Recycling of PET. **European Polymer Journal**, v. 41, n. 7, p. 1453–1477, 2005.

BADIA, J. D. et al. The role of crystalline, mobile amorphous and rigid amorphous fractions in the performance of recycled poly (ethylene terephthalate) (PET). **Polymer Degradation and Stability**, v. 97, n. 1, p. 98–107, 2012.

BRAUN, S.; APPEL, L. G.; SCHMAL, M. A poluição gerada por máquinas de combustão interna movidas à diesel - A questão dos particulados. Estratégias atuais para a redução e controle das emissões e tendências futuras. **Química Nova**, v. 27, n. 3, p. 472–482, 2004.

BORNAK, R. Different Methods of PET Production and Its Economy Different Methods of PET Production and Its Economy. **European Journal of Scientific Research**. Vol 107 No 1 July 2013, p. 2–3, 2013.

CHILTON, T.; BURNLEY, S.; NESARATNAM, S. A life cycle assessment of the closed-loop recycling and thermal recovery of post-consumer PET. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1241–1249, 2010.

COELHO, T. M. [UNESP]. **Logística reversa no Brasil: proposta de um sistema de retorno de embalagens PET**. Dissertação (Mestrado) –Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, 2010

COELHO, T. M.; CASTRO, R.; GOBBO, J. A. PET containers in Brazil: Opportunities and challenges of a logistics model for post-consumer waste recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 3, p. 291–299, 2011.

CONCEIÇÃO, R. D. P. DA et al. A cadeia de reciclagem de pet pós-consumo e as definições de suas etapas: um estudo de caso no Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n. 39, p. 80–96, 2016.

CRUZ, S. A. et al. Polímeros reciclados para contato com alimentos. **Polímeros**, v. 21, n. 4, p. 340–345, 2011.

CRUZ, S. A. et al. The use of melt rheology and solution viscometry for degradation study of post-consumer poly(ethylene terephthalate): The effects of the contaminants, reprocessing and solid state polymerization. **Polymer Testing**, v. 60, p. 236–241, 2017.

DOGAN, S. K. **Life Cycle Assesment of Pet Bottle**. Tese (Mestrado). Dokuz Eylul University. Programa de Engenharia Ambiental. Izmir, Turquia. 2008.

DUARTE, I. S. et al. Chain extension of virgin and recycled poly(ethylene terephthalate): Effect of processing conditions and reprocessing. **Polymer Degradation and Stability**, v. 124, p. 26–34, 2016.

EEA – European Environmental Agency. **Circular economy in Europe Developing the knowledge base**, v. 2. p. 37 2016

EMF- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics**. Ellen MacArthur Foundation, p. 120, 2016.

EUGENIO, F.; GONTIJO, K. Logística Reversa de Ciclo Fechado Para o PET. 31º Encontro Nacional de Engenharia de Producao (ENEGEP). Belo Horizonte, MG, Brasil. 2011.

FABRIS, S. et al. A method to determine volatile contaminants in polyethylene terephthalate (PET) packages by HDC-GC-FID and its application to post-consumer materials. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas. 2010 v. 30, n. 4, p. 1046–1055, 2010.

FADALLA, N. B. I. Management of PET Plastic Bottles Waste Through Recycling In Khartoum State. **Sudan Academy of Science**, p. 90, 2010.

FONTES, A. T. M.; MORAES, L. R. S. Desvendando a logística reversa de embalagens PET no Brasil: Uma análise da legislação e da percepção de especialistas. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 3, n. 1, p. 27–38, 2015.

FORMIGONI, A.; CAMPOS, I. P. D. A. **Reciclagem de PET no Brasil**. Universidade Estadual Paulista – UNESP. 2005.

GBI RESEARCH – GLOBAL BUSINESS INTELLIGENCE. **Polyethylene Terephthalate (PET) Global Market to 2020**. Disponível em: <<http://www.chemie.de/marktstudien>>.

GENG, Y. et al. Towards a national circular economy indicator system in China: An evaluation and critical analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 23, n. 1, p. 216–224, 2012.

GEORGE, D. A. R.; LIN, B. C.; CHEN, Y. Environmental Modelling & Software Short communication A circular economy model of economic growth. **Environmental Modelling and Software**, v. 73, p. 60–63, 2015.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 11–32, 2016.

GODECKE, M. V.; NAIME, R. H.; FIGUEIREDO, J. A. S. O consumismo e a geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil. **Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1700–1712, 2012. Disponível em: <<http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/reget>>

GOEDKOOOP, M. et al. **ReCiPe 2008. A LCIA method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Characterisation. A life cycle impact**. p. 133, 2013b. Disponível em: <http://www.pre-sustainability.com/download/misc/ReCiPe_main_report_final_27-02-2009_web.pdf>

GUTBERLET, J. Cooperative urban mining in Brazil: Collective practices in selective household waste collection and recycling. **Waste Management**, v. 45, p. 22–31, 2015.

HOUSE OF COMMONS. **Growing a circular economy: Ending the throwaway society**. HC-2014. Londres: House of Commons/ Environmental Audit Committee, 2014.

HISCHIER, R. et al. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods Data v2.2 (2010). **ecoinvent Report No. 3**, n. 3, p. 176, 2010.

HUYSMAN, S. et al. The recyclability benefit rate of closed-loop and open-loop systems: A case study on plastic recycling in Flanders. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 101, p. 53–60, 2015.

ISO 14.040. **Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework**. 2006.

ISO 14.044. **Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines**. 2006.

J.Y.Jadhav & S.W.Kantor (1988); “Polyesters, thermoplastic” em: H.F.Mark, N.M.Bikales, C.G.Overberger & G.Menges, “**Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**”, ed. John Wiley & Sons, USA, 12, 217-56.

JUNIOR, H. R. A. DE S. **DEFINIÇÃO DE MÉTODOS DE ALOCAÇÃO PARA Florianópolis (SC)**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Engenharia Ambiental. Florianópolis, SC, p. 119, 2015.

KENT, D. R. Energy Management in Plastics Processing A framework for measurement, assessment and prediction. **Polymer Process Engineering Conference**, v. 37, n. 2–4, p. 96–104, 2008.

KUCZENSKI, B.; GEYER, R. Material flow analysis of polyethylene terephthalate in the US, 1996-2007. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1161–1169, 2010.

LÓPEZ, M. DEL M. C. et al. Assessing changes on poly(ethylene terephthalate) properties after recycling: Mechanical recycling in laboratory versus postconsumer recycled material. **Materials Chemistry and Physics**, v. 147, n. 3, p. 884–894, 2014.

MANCINI, S.; MATOS, I.; ALMEIDA, R. Determinação da variação da viscosidade intrínseca do poli (tereftalato de etileno) de embalagens. **Polimeros Ciencia E**. v. 14, p. 69–73, 2004.

MENDES, N. C.; **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para a aplicação no Brasil**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Produção.

PEGORARO, L. A. **Desenvolvimento de fatores de caracterização para toxicidade humana em avaliação do impacto do ciclo de vida no Brasil**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica. E De Materiais – PPGEM. Curitiba. p. 103, 2008.

PERUGINI, F.; MASTELLONE, M. L.; ARENA, U. A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastic packaging wastes. **Environmental Progress**, v. 24, n. 2, p. 137–154, 2003.

POMPONI, F.; MONCASTER, A. Circular economy for the built environment: A research framework. **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 710–718, 2017.

Política Nacional de Resíduos Sólidos, **LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010**. Disponível em: < http://www.mncr.org.br/box_2/instrumentos-juridicos/leis-e-decretos-federais/decreto-no-7-404-regulamentacao-da-pnrs/view >

PRADO, M. R. **Análise do inventário do ciclo de vida de embalagens de vidro, alumínio e PET utilizados em uma indústria de refrigerantes no Brasil**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná - UFPR. Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Alimentos. p. 161. 2007

RIBEIRO, F. DE M.; KRUGLIANSKAS, I. A Economia Circular no contexto europeu: Conceito e potenciais de contribuição na modernização das políticas de

resíduos sólidos de contribuição na modernização das políticas de resíduos sólidos. **Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente**, 2015.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M.-A. DE. Poli(tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem. **Polímeros**, v. 19, n. 2, p. 121–132, 2009.

SAUD, F. D. et al. Análise dos processos de recuperação das embalagens PET - Uma Contribuição da Logística Reversa. **Revista Espacius**. v. 37, n. No 18, p. 1–16, 2017.

SHEN, L. et al. Life cycle energy and GHG emissions of PET recycling: Change-oriented effects. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 16, n. 6, p. 522–536, 2011.

SHEN, L.; WORRELL, E.; PATEL, M. K. Open-loop recycling: A LCA case study of PET bottle-to-fibre recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 1, p. 34–52, 2010.

SINHA, V.; PATEL, M. R.; PATEL, J. V. Pet waste management by chemical recycling: A review. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 18, n. 1, p. 8–25, 2010.

SLEESWIJK, A. W. et al. Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000. **Science of the Total Environment**, v. 390, n. 1, p. 227–240, 2008.

SUNG, K. A Review on Upcycling: Current Body of Literature, Knowledge Gaps and a Way Forward. **International Conference on Environmental, Cultural, Economic and Social Sustainability**, v. 17, n. 4, p. 28–40, 2015.

WELLE, F. Twenty years of PET bottle to bottle recycling - An overview. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 11, p. 865–875, 2011

World Economic Forum & Ellen MacArthur Foundation. (2014). Towards the Circular Economy: **Accelerating the scale-up across global supply chains**. Disponível em:

<http://www3.weforum.org/docs/WEF_ENV_TowardsCircularEconomy_Report_2014.pdf>

Anexos

Anexo A

Visão geral das categorias de impacto “*midpoint*” e suas unidades de caracterização.

<i>Categoria de Impacto</i>	<i>Unidade</i>
Mudanças climáticas	kg CO ₂ eq
Depleção de ozônio	kg CFC-11* eq
Acidificação terrestre	kg SO ₂ eq
Eutrofização aquática (água doce)	kg P eq
Eutrofização aquática (marinha)	kg N eq
Toxicidade humana	kg 14-DCB eq **
Formação de oxidantes fotoquímicos	kg NMVOC***
Formação de material particulado	Kg PM ₁₀
Ecotoxicidade terrestre	kg 14-DCB eq
Ecotoxicidade aquática (água doce)	kg 14-DCB eq
Ecotoxicidade aquática (marinha)	kg 14-DCB eq
Radiação ionizante	kg U ²³⁵ eq
Uso da terra agrícola	m ² x ano (terras agrícolas)
Ocupação do espaço urbano	m ² x ano (espaço urbano)
Transformação do ambiente natural	m ² x ano (terras naturais)
Consumo recursos de água doce	m ³ (água)
Consumo recursos minerais	kg Fe eq
Consumo de recursos fósseis	kg óleo cru****

(Fonte: GOEDKOOOP *et al.*, 2013a)

* CFC-11: Clorofluorcarbono

** 14-DCB: 1,4 diclorobenzeno

*** NMVOC: *Non Methane Volatile Organic Carbon compound* (compostos orgânicos voláteis com exceção do metano)

**** A referência diz: “oil, crude, feedstock, 42 MJ per kg, in ground”

Visão geral das categorias de impacto “*endpoint*” e sua normalização.

<i>Categoria de Impacto</i>	<i>Unidade</i>	<i>Descrição</i>
Saúde Humana	Anos	Quantidade e duração das doenças e a perda de anos de vida pela morte prematura devido aos impactos ambientais (DALY – <i>Disability Adjusted Life Years</i>). Inclui mudanças climáticas, depleção de ozônio, radiação ionizante, efeitos respiratórios e efeitos carcinogênicos
Ecosistemas	Anos	% de espécies que desapareceram (PAF – <i>Potentially affected fraction</i>): efeito na diversidade de espécies, especialmente para plantas e organismos menores. Inclui ecotoxicidade, acidificação, eutrofização e uso da terra
Consumo de Recursos Naturais	<i>Custo (\$)</i>	Em muitos casos, a exploração e o consumo de recursos e materiais tem um impacto nos preços de mercado. Inclui consumo de recursos de água doce, consumo de recursos minerais e consumo de recursos fósseis

(Fonte: GOEDKOOOP *et al.*, 2013a)

Fatores de caracterização ReCiPe *endpoint* e os diversos aspectos considerados na AICV do método podem ser encontrados em planilhas no endereço: www.lcia-recipe.net.