



**EVTE de Usina de Reciclagem de RSUs
Plásticos no Estado do Rio de Janeiro**

Giovana Simões Pinho

Monografia em Engenharia Química

Orientadores

Profa. Ana Mehl, DSc.

Profa. Júlia Pancini de Oliveira, BSc.

Fevereiro de 2020

EVTE DE USINA DE RECICLAGEM DE RSUs PLÁSTICOS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Giovana Simões Pinho

Monografia em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de graduação em Engenharia Química.

Aprovado por:

Clarice Ferraz, D.Sc.

Flávio S. Francisco, D.Sc.

Orientado por:

Profa Ana Mehl, D.Sc.

Profa Júlia Pancini de Oliveira, B.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Fevereiro de 2020

Pinho, Giovana Simões.

EVTE de usina de reciclagem de RSUs plásticos no estado do Rio de Janeiro / Giovana Simões Pinho. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2020.

x, 70 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2020.

Orientadores: Ana Mehl e Júlia Pancini de Oliveira.

1. Plásticos. 2. RSUs. 3. Reciclagem 4. Monografia (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Ana Mehl e Júlia Pancini de Oliveira. I. EVTE de usina de reciclagem de RSUs plásticos no estado do Rio de Janeiro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus colegas de classe, que foram tantos no decorrer dos 6 anos de faculdade. Obrigada por me mostrarem diversas vezes que o conhecimento floresce muito mais facilmente em um ambiente de partilha, união e apoio mútuo.

Aos colegas de classe que acabaram se tornando grandes amigos, e aos amigos queridos de tempos de colégio, que compartilharam comigo momentos de alegria e diversão, e também me ajudaram nas dificuldades que surgiram no caminho. Obrigada por tornarem os dias mais leves, os tombos menos dolorosos, e as risadas mais verdadeiras.

Aos meus professores, em especial às minhas orientadoras, Ana Mehl e Júlia Pancini. Obrigada por dedicarem-se à tarefa tão especial de multiplicar o conhecimento, e fazerem de seu trabalho um instrumento para um futuro melhor para o Brasil.

Ao meu namorado, por sempre acreditar em minha capacidade, e me incentivar e encorajar a ir além. Obrigada por fazer meu pontinho de luz mais brilhante a cada dia.

À minha grande família, pela doçura e afeto com que sempre fui recebida. Obrigada por sempre cultivarem um ambiente de carinho e conforto, em que sempre me senti incentivada, acolhida e muito querida.

Às minhas irmãs, meus maiores orgulhos no mundo. Obrigada pelo amor compartilhado diariamente, por me ensinarem tantas lições dia após dia, e por serem meu principal estímulo a superar minhas limitações e me tornar uma pessoa melhor.

Aos meus pais, por terem incentivado a vida inteira os bons hábitos de leitura, estudo, esportes, e os valores de gentileza, persistência, dedicação. Obrigada pelo carinho e amor incondicionais. Vocês representam o maior exemplo do que eu almejo ser na vida.

Finalmente, agradeço em especial a meus avós, por me acompanharem de perto durante toda a graduação, me proporcionando o maior e melhor apoio que eu poderia desejar durante esses anos. Obrigada pela presença sempre doce, pelo incentivo em todas as etapas, pelas vibrações nas menores conquistas, e pelos conselhos nos vários desafios. Esses 6 anos não teriam sido os mesmos sem a participação fundamental de vocês.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para conclusão do curso de Engenharia Química.

EVTE DE USINA DE RECICLAGEM DE RSUs PLÁSTICOS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Giovana Simões Pinho

Fevereiro, 2020

Orientadoras: Prof. Ana Mehl, D.Sc.
Prof. Júlia Pancini de Oliveira, B.Sc.

O gerenciamento de resíduos sólidos é um tema que, atualmente, está no centro das discussões nos mais diversos fóruns da sociedade, demandando atenção e despertando senso de urgência e necessidade de ações práticas de parte dos governos, empresas e cidadãos do mundo inteiro. Nesse cenário de ameaça ambiental e de graves impactos, um caso particular são os resíduos plásticos pós-consumo: por apresentarem características interessantes a vários setores industriais (resistência, maleabilidade e impermeabilidade), possuem uma vasta gama de aplicações. Porém, isso implica em uma geração cada vez maior de resíduos plásticos, de degradabilidade praticamente nula, que se acumulam nos continentes e nos oceanos, causando prejuízos sociais, econômicos e ambientais aos mais diversos ecossistemas. Uma das alternativas para reverter esse cenário é a reciclagem mecânica dos plásticos, que apresenta gasto de água e energético menor do que a produção das resinas virgens, gera produto de valor agregado e que diminui consideravelmente o volume de materiais destinados a aterros sanitários. Para o Brasil, a reciclagem de plásticos ainda apresenta um grande potencial para desenvolvimento, e fatores como o aumento do número de empresas do setor e a elaboração de planos e políticas voltadas para o gerenciamento de resíduos sólidos mostram que o caminho para o avanço da reciclagem já está sendo aberto. Por isso, é realizado um estudo de viabilidade técnica e econômica para a implantação de uma usina de reciclagem de resíduos sólidos urbanos (RSUs) plásticos no estado do Rio de Janeiro. Foi estabelecido que, no Brasil, a planta seria localizada na região do Médio Paraíba, por conta da demanda de RSUs plásticos, e se avaliou os investimentos, os custos de operação e a receita do projeto. Como resultado, obteve-se que o projeto tal como o modelo estudado é viável economicamente, com base nos indicadores de viabilidade econômica obtidos: VPL de R\$2.581.519, e TIR de 6,43% para o cenário de capital próprio, e VPL de R\$33.332.616,92 e TIR de 9,87% considerando financiamento do BNDES.

ÍNDICE

Capítulo I – Introdução.....	1
I.1 – Motivação	2
I.1.1 – Objetivo	3
Capítulo II – Plásticos: Produção, Mercado e a Problemática Ambiental	5
II.1 – Produção e Características	5
II.2 – O Mercado de Plásticos.....	9
II.2.1 – O Mercado de Plásticos no Mundo	9
II.2.2 – O Mercado de Plásticos no Brasil	10
II.3 – A Questão Ambiental	13
II.3.1 – Estratégias para Redução de Impactos na Indústria dos Plásticos	18
II.4 – Gestão de RSU: Panorama Global e Nacional	22
Capítulo III – Reciclagem de Plásticos	26
III.1 – Panorama Global e Nacional	26
III.1.1 – Estudo de Caso: Panorama Atual do Estado do Rio de Janeiro.....	30
III.2 – Os Processos de Reciclagem de Plástico	33
III.2.1 – Tratamento Secundário: Reciclagem Mecânica de RSUs Plásticos	34
III.2.2 – Tratamento Terciário: Reciclagem Química de RSUs Plásticos.....	37
III.2.3 – Reciclagem Mecânica e Reciclagem Química: Resumo Comparativo.....	42
III.3 – Projetos de Reciclagem de RSUs Plásticos	43
III.3.1 – Caso Modelo: Reino Unido.....	43
III.3.1.1 – Estudo WRAP	45
III.3.1.2 – Complexo de Aproveitamento de RSUs – Viridor.....	45
III.3.1.3 – Comparativo entre Referências	46
III.3.2 – Caso Nacional: O Estado do Rio de Janeiro	47
Capítulo IV – Unidade de Reciclagem de Plásticos no Rio de Janeiro: EVTE.....	49
IV.1 – Estudo e Projeção da Demanda	50
IV.2 – Estudo e Projeção do Preço de Venda	54
IV.3 – Estudo dos Investimentos	55
IV.4 – Estudo dos Custos de Operação.....	57
IV.4.1 – Estimativa do Custo de Mão-de-Obra (CMDO).....	59
IV.4.2 – Estimativa do Custo de Matéria-Prima	60

IV.4.3 – Estimativa do Custo de Utilidades.....	60
IV.4.4 – Estimativa do Custo de Tratamento de Efluentes.....	61
IV.4.5 – Cálculo dos Custos para o Horizonte de Planejamento do Projeto.....	62
IV.5 – Fluxo de Caixa e Indicadores de Viabilidade.....	62
IV.6 – Análise do Financiamento.....	64
IV.7 – Análise de Sensibilidade.....	67
Capítulo V – Resultados e Conclusões.....	69
Capítulo VI – Sugestões para Trabalhos Futuros.....	71
Referências Bibliográficas.....	72
Anexo A – Tabelas com Projeções para os Custos de Operação do Projeto.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemática da Indústria Petroquímica.....	5
Figura 2 - Evolução da produção mundial de plásticos.....	8
Figura 3 - Destinos da produção mundial de plásticos, por setor, em 2015.....	10
Figura 4 - Principais destinos para o plástico no Brasil, por ciclo de vida do produto final... 11	
Figura 5 - Evolução da produção nacional de transformados de plástico, em milhões de toneladas.	11
Figura 6 - Evolução de Importações (linha azul) e Exportações (linha verde) em milhares de toneladas.	12
Figura 7 - Pirâmide de hierarquia de gerenciamento	18
Figura 8 - Percentual da geração mundial de resíduos por tipo de resíduo.....	23
Figura 9 - Destinação global de resíduos, em termos percentuais.	24
Figura 10 - Evolução dos RSU plásticos destinados à recuperação energética, à reciclagem e a aterros sanitários na Europa.....	27
Figura 11 - Evolução dos índices de reciclagem dos principais RSUs recicláveis nos EUA. 28	
Figura 12 - Evolução do número de empresas do setor de reciclagem de plásticos no Brasil.	28
Figura 13 - Evolução do número de empregos no setor de reciclagem de plásticos no Brasil.	29
Figura 14 - Composição gravimétrica média (em massa) dos RSU do estado do Rio de Janeiro, para o ano de 2018.	31
Figura 15 - Percentual de recuperação dos RSU recicláveis no estado do Rio de Janeiro.....	31
Figura 16 - Esquema de processo de pré-reciclagem mecânica da fração plásticos do RSUs 37	
Figura 17 - Esquema do processo de reciclagem mecânica de resíduos plásticos.	37
Figura 18 - Esquema do processo Texaco de gaseificação.	39
Figura 19 - Esquema dos processos de reciclagem química.	41
Figura 20 - Esquema completo do processo de reciclagem mecânica de plásticos.....	43
Figura 21 - Fluxograma modelo do projeto de usina de reciclagem de RSU plásticos.....	50
Figura 22 - Projeção da geração de resíduos plásticos na região Metropolitana do estado do Rio de Janeiro.	52
Figura 23 - Projeção da geração de resíduos plásticos nas demais sub-regiões do estado do Rio de Janeiro.	53

Figura 24 - Dados históricos do preço de venda de resinas plásticas recicladas.....	55
Figura 25 - Estimativa dos preços de plástico reciclável com base na inflação média brasileira.	55
Figura 26 - Custos de operação para uma usina de reciclagem de plásticos.....	62
Figura 27 - Fluxo de Caixa para o projeto de instalação de usina de reciclagem de plásticos no estado do Rio de Janeiro.....	63
Figura 28 - Fluxo de Caixa para o projeto de instalação de usina de reciclagem de plásticos no estado do Rio de Janeiro, considerando financiamento do BNDES.....	66
Figura 29 - Análise de sensibilidade para o projeto de usina de reciclagem de plásticos , com financiamento.	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de plásticos, suas características e aplicações.	7
Tabela 2 - Estimativas de impactos ambientais inerentes à produção de petróleo e LNG.	14
Tabela 3 - Ranking dos países com maiores índices de resíduos sem destinação adequada... 16	
Tabela 4 - Instalações de incineração e quantidade de resíduos totais incinerados em diversos países europeus. Valores de 2009.....	21
Tabela 5 - Classificação dos resíduos quanto à sua periculosidade.....	23
Tabela 6 - Análise da recuperação de resíduos recicláveis a partir de embalagens gerados no Brasil em 2017.....	25
Tabela 7 - Composição gravimétrica média (em massa) dos RSU do estado do Rio de Janeiro, em percentuais, por porte de município.....	30
Tabela 8 - Geração de resíduos plásticos no estado do Rio de Janeiro, por região.	32
Tabela 9 - Comparativo entre reciclagem mecânica e química.....	42
Tabela 10 - Dados base para a projeção de geração de RSUs plásticos no estado do Rio de Janeiro.....	51
Tabela 11 - Equipamentos necessários para o processo de reciclagem de RSUs plásticos.....	56
Tabela 12 - Síntese do investimento necessário para o projeto de usina de reciclagem de resíduos plásticos no estado do Rio de Janeiro.	57
Tabela 13 - Detalhamento dos tipos de custo de operação relacionados a um processo químico.	58
Tabela 14 - Consumo de utilidades para o processo.	60
Tabela 15 - Custos de utilidades para o estado do Rio de Janeiro.....	60
Tabela 16 - Custo anual com utilidades estimado para o projeto em estudo.....	61
Tabela 17 - Indicadores de viabilidade econômica calculados para o projeto de estudo.	64
Tabela 18 - Simulação do financiamento do projeto, pelo Programa Fundo Clima do BNDES.	65
Tabela 19 - Indicadores de viabilidade econômica do projeto para o cenário de financiamento.	66
Tabela 20 - Resumo dos indicadores de rentabilidade para o projeto com capital próprio e financiado.	69
Tabela 21 - Projeção dos custos de mão-de-obra.	80
Tabela 22 - Projeção dos custos de Matéria-prima.....	80

Tabela 23 - Projeção dos custos de utilidades. 81

Tabela 24 - Projeção dos custos do tratamento de efluentes.....81

Capítulo I – Introdução

Desenvolvimento tecnológico e econômico e conservação ambiental foram, durante um longo período, tópicos antagônicos e divergentes: recursos naturais abriram espaço para os avanços da ciência, sem que houvesse discussões sobre consumo de recursos, impactos ambientais ou gerenciamento de resíduos. No entanto, os impactos ambientais decorrentes dos hábitos de produção e consumo predatórios - como mudanças climáticas a nível global; esgotamento de reservas de recursos naturais, ameaça de extinção a diversas espécies de fauna e flora e efeitos naturais agravados e devastadores - são, hoje, um tópico recorrente nos mais variados âmbitos de debate, motivando o desenvolvimento de alternativas de produção e hábitos de consumo que se adequem à necessidade de sustentabilidade: boa gestão de recursos presentes, para que seu uso não seja comprometido no futuro (ONU, 2017).

Na busca por um modelo de produção mais sustentável, a gestão dos resíduos sólidos apresenta um papel fundamental. O aumento na geração de resíduos sólidos, consequência natural de fatores como urbanização, desenvolvimento econômico e crescimento populacional, faz necessário que o gerenciamento e descarte desses resíduos sejam acompanhados e controlados de perto pelos governos, pelas leis e pelas populações, pois afeta ecossistemas terrestres e marinhos; acarreta riscos à saúde humana e compromete atividades vitais e turísticas dos seres que habitam ou visitam os ambientes contaminados por esses resíduos (IUCN, 2019).

Nesse contexto, surgiram diversos estudos que buscam expor a gravidade do problema do acúmulo de resíduos sólidos, como o relatório “*What a Waste*”, divulgado em parceria pela ONG World Wide Fund for Nature (WWF) e o World Bank (2019), e o Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), de 2017, e que visam ao desenvolvimento de análises e processos que contribuam para um cenário de melhor gestão dos resíduos sólidos, como os estudos de WRAP (2009), RAGAERT *et al.* (2017), e OLIVEIRA (2019).

O presente trabalho está inserido na linha de pesquisa do Grupo de Integração de Processos (GIPQ) da Escola de Química – UFRJ, que busca, por meio da engenharia de processos, desenvolver metodologias e processos que busquem a minimização do consumo de recursos, como água e energia, e da geração de resíduos nos processos de produção. A seguir, nas Seções I.1 e I.2, serão apresentados a motivação e os objetivos deste estudo.

I.1 – Motivação

O presente estudo visa à avaliação de meios alternativos para o melhor aproveitamento da fração plástica dos resíduos sólidos urbanos (RSUs). Nesse âmbito, um dos processos mais discutidos é a recuperação energética dos resíduos sólidos. Ela consiste na submissão dos resíduos pós-consumo à processos térmicos (que podem ser de diversas naturezas), produzindo energia elétrica e reduzindo consideravelmente o volume de resíduos destinados a aterro sanitários. Embora ainda não explorada no Brasil, esse processo é bastante difundido no continente europeu: 41,6% dos resíduos plásticos são destinados à recuperação energética na Europa (PLASTICS EUROPE, 2018). As críticas e questionamentos que esse processo sofre se devem às emissões geradas durante a degradação térmica dos materiais, e o alto consumo energético.

Dentre os resíduos sólidos, os plásticos merecem atenção especial: por possuírem características atraentes para diversos segmentos industriais – alta resistência física e mecânica, durabilidade, maleabilidade e, além de tudo, custo de produção é considerado baixo (D’AMBRIÈRES, 2019), sua produção global teve um aumento de quase 200% no período de 65 anos, entre 1950 – o início da produção de plásticos em escala industrial – até 2015 (GEYER, 2017). Apesar das diversas vantagens que apresentam, a difícil degradabilidade dos plásticos, aliada à grande utilização em produtos de uso único, faz com que milhões de toneladas de resíduos plásticos se acumulem na terra e nos oceanos ano após ano (JAMBECK *et al.*, 2015), comprometendo o equilíbrio dos ecossistemas e seus habitantes, e sem perspectiva de serem degradados em um horizonte menor do que centenas de anos (ONU, 2014; D’AMBRIÈRES, 2019).

O trabalho de OLIVEIRA (2019) propôs a aplicação da tecnologia de recuperação energética dos RSUs do estado do Rio de Janeiro. A partir desse estudo, surgiu a proposta de avaliar se poderia haver um outro processo que permitisse um melhor aproveitamento dos resíduos plásticos – que apresentam alta aplicabilidade industrial e possuem valor de mercado. Como alternativa, o presente estudo traz a reciclagem como processo chave para a gestão de RSUs plásticos, e sua reinserção na cadeia produtiva.

Os processos de reciclagem promovem diversas contribuições econômicas, sociais e ambientais: permitem redução do consumo energético e de recursos hídricos no processo de produção de plásticos; geram produtos com valor agregado para o mercado; evitam disposição de resíduos plásticos em aterros sanitários; e contribuem para a geração de milhares de empregos em todas as esferas participantes da cadeia de reciclagem (BRASKEM, 2019; ABIPLAST, 2018). Por esses motivos, a reciclagem da fração plástica do RSU será o foco do presente trabalho, a fim de se analisar sua viabilidade econômica no estado do Rio de Janeiro.

I.2 – Objetivo

Neste estudo, será realizada um Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE) de um projeto de usina de reciclagem de plásticos no estado do Rio de Janeiro, como alternativa para o melhor aproveitamento, do ponto de vista técnico e econômico, da fração plástica dos RSUs do estado.

Para alcançar tal objetivo, será realizado um estudo das condições de geração e gerenciamento de resíduos no estado do Rio de Janeiro, além das projeções dos seguintes aspectos necessários ao projeto:

- a) projeção da geração de RSU plásticos;
- b) projeção do preço de venda de plásticos reciclados;
- c) estudos dos investimentos;
- d) estudo dos custos de produção;
- e) elaboração do Fluxo de Caixa e avaliação dos indicadores.

A fim de contextualizar a problemática mundial da gestão de RSUs plásticos e discorrer sobre os aspectos pertinentes à avaliação da viabilidade do projeto no território nacional, o presente trabalho está dividido em quatro capítulos, além da presente Introdução.

O Capítulo 2 apresenta as características dos materiais plásticos, seu nível de produção e mercado em escalas global e nacional, e a problemática ambiental inerente a esses materiais, que representa o plano de fundo motivacional para a análise do projeto.

O Capítulo 3 aborda a reciclagem de plásticos: primeiro, introduz os panoramas global e nacional para a reciclagem dos resíduos plásticos. Em seguida, apresenta os dois principais processos de reciclagem em operação no mundo: reciclagem mecânica (tratamento

secundário) e reciclagem química (tratamento terciário), traçando também um panorama comparativo entre as duas tecnologias. São apresentadas, ainda, políticas internacionais e nacionais, voltadas especificamente para o estímulo à reciclagem de plásticos. Finalmente, é realizado um estudo de caso acerca do gerenciamento de resíduos pós-consumo no estado do Rio de Janeiro, voltado para o levantamento de oportunidades em relação à reciclagem.

O Capítulo 4 apresenta o estudo de viabilidade técnica e econômica (EVTE), trazendo o fluxograma da usina modelo, as projeções listadas nessa seção, e a análise do projeto em relação ao Fluxo de Caixa e indicadores obtidos.

Finalmente, no Capítulo 5 são listadas as conclusões do trabalho, e, no sexto e último Capítulo, são apresentadas as sugestões de trabalhos futuros.

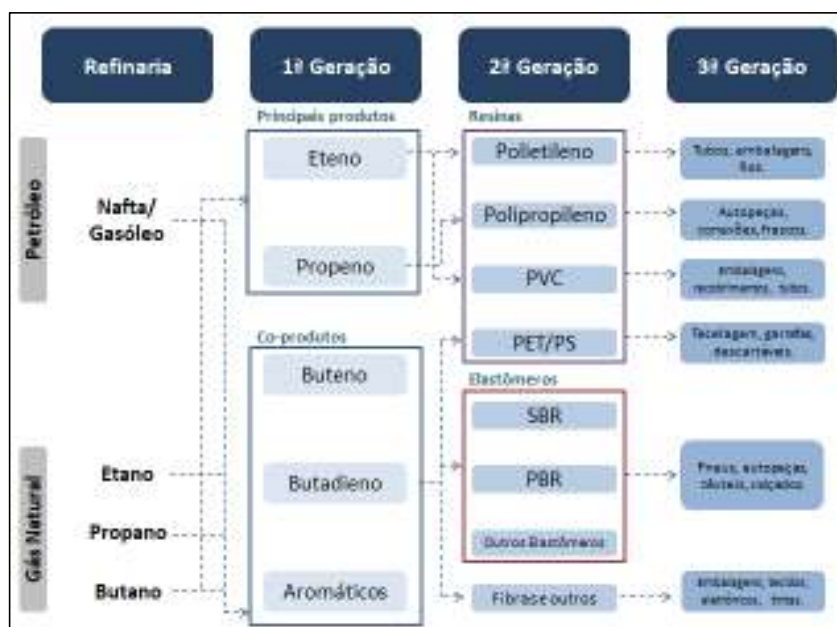
Capítulo II – Plásticos: Produção, Mercado e a Problemática Ambiental

II.1 – Produção e Características

Plásticos são materiais poliméricos, produzidos de forma sintética a partir de hidrocarbonetos orgânicos, podendo ser originários da destilação fracionada do petróleo – mais especificamente, da fração correspondente à nafta (PIATTI, 2005), ou de matéria-prima orgânica de origem renovável, ou seja, de produtos como milho, cana-de-açúcar ou beterraba. Estes últimos são conhecidos como bioplásticos, e podem ou não ser biodegradáveis (ABIPLAST, 2017). Os primeiros, plásticos convencionais, são um dos produtos gerados pela Indústria Petroquímica, setor que faz uso dos insumos gerados na indústria petrolífera para fabricação de produtos com valor agregado – e devido à sua versatilidade, são utilizados para diversas aplicações, nos mais variados setores industriais (PLASTICS EUROPE, 2018).

A Indústria Petroquímica pode ser dividida em 1ª, 2ª e 3ª geração. A Figura 1 ilustra, de forma esquematizada, a estrutura da indústria petroquímica:

Figura 1 - Esquemática da Indústria Petroquímica



Fonte: Formulação própria a partir de Braskem (2016).

As empresas de 1ª geração constituem o bloco que recebe os produtos da indústria de petróleo – nafta, gás natural, gás de refinaria - e os transformam, por meio de diversas etapas, nos produtos petroquímicos de 1ª geração: olefinas e aromáticos (ANDRADE *et al.*, 2005). Visando o processo para a produção de plásticos, destaca-se o craqueamento da nafta, produzindo olefinas: eteno, propeno, buteno (TEIXEIRA, 2015).

No nível seguinte da estrutura da indústria petroquímica, estão as empresas de 2ª geração, que promovem a produção de resinas plásticas e outros intermediários petroquímicos (óxidos, acetatos). Nesta etapa, as olefinas produzidas pelas empresas de 1ª geração sofrem reações de polimerização, dando origem aos plásticos, como o policloreto de vinila (PVC), o poliestireno (PS), e o polietileno (PE) (TEIXEIRA, 2015). Também são gerados, por meio de diversos processos, outros intermediários petroquímicos que serão direcionados a empresas de diversos segmentos mais adiante na cadeia, como poliuretanas, bases para detergentes sintéticos e tintas, e elastômeros (ANDRADE *et al.*, 2005).

Finalmente, os produtos de 2ª geração podem ser direcionados à sua função final, ou encaminhados para indústrias de 3ª geração, que os transformarão de acordo com a demanda específica de cada setor cliente – empresas do ramo de construção civil, têxtil, automotivo, de alimentos, dentre diversos outros (ANDRADE *et al.*, 2005). Devido à versatilidade e facilidade de manipulação, os plásticos podem ser submetidos a variados processos visando obtenção de diferentes transformados, que podem apresentar as mais diversas características e propriedades dependendo da função final do produto.

Nesse contexto, os transformados de plástico podem ser classificados em materiais de ciclo longo de vida, ciclo médio de vida e ciclo curto de vida. O primeiro, com ciclo de vida do produto maior que 5 anos, abrange os materiais destinados à construção civil, ao setor automobilístico, à produção de máquinas e equipamentos e de móveis. No ciclo médio, que abrange produtos com ciclo de vida entre 1 e 5 anos, estão enquadradas empresas de artigos de comércio de atacado e varejo, setor agrícola, empresas têxteis e de papel, celulose e impressão. Por fim, em relação ao ciclo curto, de até 1 ano, encontram-se as empresas do ramo alimentício, de cosméticos, higiene, farmacêutico e químico. (ABIPLAST, 2017). Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), os plásticos podem ser identificados em seis tipos principais, cujas características e aplicações são descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de plásticos, suas características e aplicações.

Tipo de Plástico	Características	Aplicações
Polietileno tereftalato (PET)	Material rígido e transparente. Possui alta resistência a impactos, baixa permeabilidade a gases, e ponto de fusão em cerca de 256°C.	Filamentos para tecelagem, garrafas para bebidas carbonatadas, frascos e embalagens para alimentos, cosméticos e produtos de limpeza, filmes para radiografia, entre outras.
Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	Material rígido e opaco devido à alta densidade. Elevadas propriedades mecânicas, resistência a baixas temperaturas, resistência química, é leve e impermeável.	Embalagens de produtos de limpeza e produtos químicos, peças automotivas.
Policloreto de Vinila (PVC)	Material de alta versatilidade, que apresenta facilidade na formação de “grades” – substâncias derivadas (formadas a partir da mistura do PVC com aditivos) com propriedades diferentes, que atendem a diversas aplicações.	Embalagens de alimentos, cosméticos e medicamentos; fabricação de mangueiras, tubos e conexões para construção civil; acessórios médico-hospitalares; recobrimentos de fios e revestimento de pisos, esquadrias e janelas.
Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)	Material com baixa condutividade térmica e elétrica. Apresenta alta resistência química. É flexível, leve e transparente.	Embalagens flexíveis de alimentos e produtos de higiene pessoal; tubos para isolamento de fios; mangueiras de irrigação.
Polipropileno (PP)	Pode ser classificado em homopolímero e copolímero. O primeiro apresenta boa resistência térmica e química, elevada dureza superficial e rigidez. Em comparação, o segundo apresenta maior flexibilidade e resistência (exceto química) do que o homopolímero.	Homopolímero: fabricação de autopeças; peças com dobradiças; fibras e monofilamentos. Copolímero: frascos e embalagens em geral.
Poliestireno (PS)	Material rígido, leve, transparente e brilhante. Apresenta baixa resistência química, térmica e mecânica. Pode ter um agente de expansão incorporado, originando o PS Expandido, conferindo excelentes propriedades acústicas e térmicas.	Copos, pratos e talheres descartáveis; brinquedos. Na versão Expandida, utilizado para embalagens de alimentos e isolamentos acústico e térmico para construção civil.
Outros	Demais resinas plásticas que não se enquadram nas classificações apresentadas.	

Fonte: Formulação própria com base em ABNT *apud* SINDIPLAST (2019).

Devido ao fato de poder ser moldado nos mais diversos formatos; de poder apresentar as mais variadas propriedades físicas e mecânicas; e de possuir um custo de produção baixo, a produção industrial do plástico aumentou com velocidade significativa desde seu início, na década de 50, e seu leque de aplicações se consolidou no mercado e no dia-a-dia da população global, em utilizações novas e até mesmo substituindo materiais em suas funções (d'AMBRIÈRES, 2019). A Figura 2 ilustra a evolução na produção mundial de plásticos, desde 1950 até 2015.

Figura 2 - Evolução da produção mundial de plásticos.



Fonte: Elaboração própria com dados de Geyer (2017).

Esse consumo acelerado e cada vez mais enraizado na cultura mundial acarreta também preocupações e debates, em relação às emissões e impactos ambientais inerentes à produção de plástico a partir de matéria-prima fóssil, e à gestão dos resíduos provenientes desse mercado em constante expansão. Esse tema será abordado na Seção II.3.

II.2 – O Mercado de Plásticos

II.2.1 – O Mercado de Plásticos no Mundo

A indústria de plásticos e transformados é uma das mais relevantes a nível mundial. O setor apresenta alta competitividade devido aos diversos *players* presentes no mercado, sendo a maior parcela deste compreendido por pequenas e médias empresas do ramo de transformados (GRAND VIEW RESEARCH, 2019).

Nos EUA, o setor industrial de produção de plásticos e transformados foi considerado como a oitava maior indústria do país em 2016, e em 2017 foi estimado em 432 bilhões de dólares, com 989.000 empregos no setor (PLASTICS INDUSTRY ASSOCIATION, 2019). Já na Europa, dados de 2018 apontam para mais de 1,6 milhões de empregos gerados pelo setor, com estimativas de movimentação de mercado de 360 bilhões de euros, e este setor é o sétimo de maior valor agregado no continente europeu (PLASTICS EUROPE, 2019).

Com o passar dos anos, a China vem mantendo sua posição de grande produtora mundial: em 2011, detinha 23% da produção global, equiparando-se à NAFTA – bloco econômico formado por México, Estados Unidos e Canadá, responsável por 20% da produção mundial – e à Europa, que responde por 22% da produção. Seis anos depois, passa a ser responsável por 30% da produção de plástico mundial, contra 17% da Europa e 18% da América do Norte (PLASTICS EUROPE, 2019).

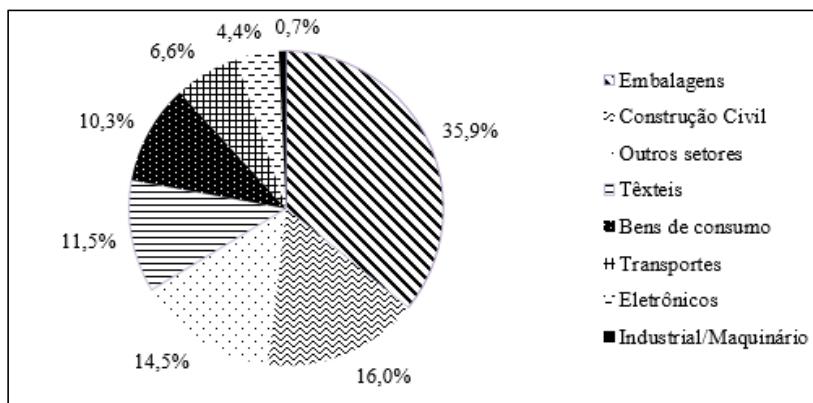
Em relação à produção exclusiva de PET, a China foi responsável por 31% da produção global, seguida pela América do Norte, responsável por 16,9% da produção, e pela União Europeia, que abrange 14,7% da produção mundial de PET. Além de maior produtor, a China representa também o maior exportador global de plásticos, responsável por 37% das importações de plástico europeias, 35,2% das importações brasileiras e 25,7% das importações dos Estados Unidos, em 2017 (WITS, 2019; ABIPLAST, 2018; PLASTICS INSIGHT, 2019).

A

Figura 33 mostra a alocação das resinas plásticas pelos principais setores de mercado, em que o dominante é o de embalagens, responsável por cerca de 36% do mercado mundial (GEYER, 2017). As propriedades de resistência, leveza e impermeabilidade dos plásticos,

aliadas ao fato de que as resinas podem ser moldadas nas mais diversas formas, fazem com que esse material esteja tão presente na manufatura de embalagens, focando na conservação, proteção e maior durabilidade de produtos dos mais diversos segmentos industriais: alimentício, farmacêutico, higiene, cosméticos (ABRE, 2019).

Figura 3 - Destinos da produção mundial de plásticos, por setor, em 2015.



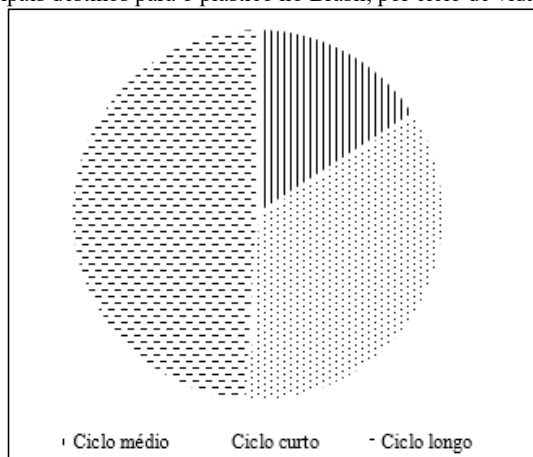
Fonte: Formulação própria com dados de GEYER (2017).

II.2.2 – O Mercado de Plásticos no Brasil

No Brasil, o setor de transformação de materiais plásticos abrange, segundo dados levantados pela Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST) em 2018, 11.127 empresas e 312.934 empregados, com faturamento de R\$ 78,3 bilhões. Pode-se destacar a região sudeste, com 6.276 empresas no ramo em 2017 e geração de 173.969 empregos no setor.

Em termos de produção, foram produzidas nacionalmente 6,2 milhões de toneladas em 2017, enquanto o consumo aparente foi de 6,6 milhões de toneladas (ABIPLAST, 2018). O consumo aparente é o total da produção nacional somado às importações e subtraído das exportações. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.**4 ilustra os principais destinos da produção nacional de plásticos em 2018, em relação à duração do ciclo de vida dos materiais produzidos.

Figura 4 - Principais destinos para o plástico no Brasil, por ciclo de vida do produto final.

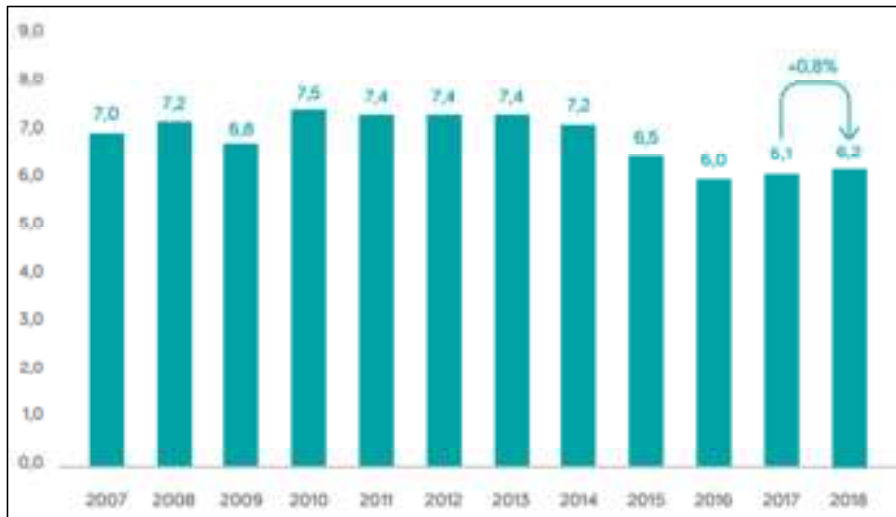


Fonte: ABIPLAST, 2018.

No Brasil, o setor de construção civil é o que atualmente contribui mais para a demanda de transformados plásticos, o que pode ser explicado pela retomada do crescimento do setor: de 2017 a 2019, houve um aumento de 52% no número de lançamentos de imóveis em todo o país, segundo levantamento da Câmara Brasileira da Indústria de Construção (CBIC) (2019).

A Figura 5 ilustra a evolução da produção de transformados de plástico no Brasil, no período de 2007 a 2018.

Figura 5 - Evolução da produção nacional de transformados de plástico, em milhões de toneladas.

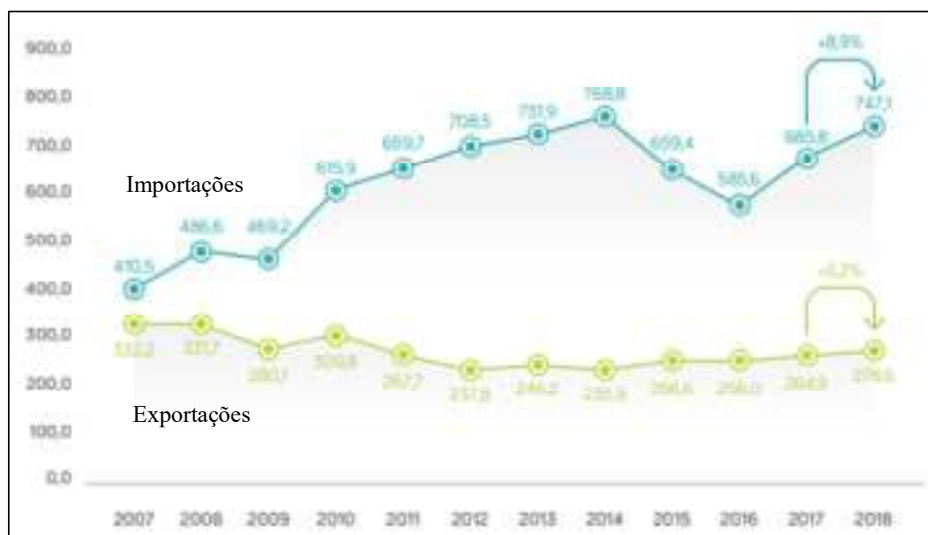


Fonte: ABIPLAST, (2018, p. 63).

Os resultados do relatório elaborado pela ABIPLAST (2018) mostram, ainda, que as importações de transformados plásticos tiveram um aumento significativo em relação às exportações no ano de 2017 – respectivamente, 8,9% e 5,2% maiores que 2016. A tendência de aumento observada na importação das resinas evidencia crescente demanda interna por esses materiais, que a indústria nacional não está sendo capaz de atender: a produção nacional teve um crescimento de cerca de 3,5% no período de 2016 a 2019, enquanto as importações aumentaram em 82% nos anos considerados.

A evolução anual das importações e exportações de transformados, em milhares de toneladas, está ilustrada na Figura 6.

Figura 6 - Evolução de Importações (linha azul) e Exportações (linha verde) em milhares de toneladas.



Fonte: ABIPLAST, (2018, p. 67).

Os principais destinos das exportações brasileiras são Argentina, Estados Unidos e Paraguai, com 16,9%, 13,6% e 9,8%, respectivamente, das toneladas exportadas em 2017. Já em relação às importações, os principais fornecedores de transformados plásticos para o Brasil são China, Uruguai e Estados Unidos, responsáveis por 35,6%, 8,0% e 6,5% das importações, respectivamente (ABIPLAST, 2018).

II.3 – A Questão Ambiental

O refino do óleo cru, processo que dá origem à matéria-prima mais utilizada na produção dos plásticos, já acarreta impactos bastante onerosos ao meio ambiente, com emissões significativas de gases de efeito estufa (GEE), óxidos de nitrogênio e enxofre, material particulado (MP), além do elevado consumo de água e energia, descarte de efluentes e eventuais vazamentos de óleo cru (PETROBRAS, 2019). A Tabela 2 compila os principais impactos ambientais relacionados à produção de petróleo, equivalente ao volume de 2 milhões de barris por dia (bpd) de óleo, líquido de gás natural (LGN) e condensado, correspondente à produção da Petrobras no ano de 2018.

Tabela 2 - Estimativas de impactos ambientais inerentes à produção de petróleo e LGN.

Impacto ambiental	Quantidade anual
Vazamento de óleo e derivados (m ³)	18,5
Consumo de energia (terajoule - TJ)	852.600
Emissões de GEE (milhões de toneladas de CO ₂ equivalente)	61,7
Emissões de CO ₂ (milhões de toneladas)	57,9
Emissões de metano (milhões de toneladas)	131,7
Emissões de N ₂ O (milhões de toneladas)	1.621,6
Emissões de NO _x (milhões de toneladas)	240,0
Emissões de SO _x (milhões de toneladas)	138,7
MP (mil toneladas)	13,9
Consumo de água doce (milhões de m ³)	182,3
Descarte de efluentes hídricos (milhões de m ³)	289,1

*Valores para o ano de 2018.

Fonte: Relatório de sustentabilidade, Petrobras, 2019 (p. 5).

Considerando que 4% do petróleo global é direcionado para a produção de plásticos (ONU, 2014), é possível estimar, a partir dos dados da Tabela 2, que cerca de 1,6 milhões de TJ e 341,5 milhões de m³ de água doce são consumidos anualmente para o processamento de óleo que dará origem a resinas plásticas. Esse processo também implica na emissão de 247 milhões de toneladas de metano e 260 milhões de toneladas de SO_x, valores significativos de emissões, gasto energético e recursos hídricos empregados no processo, que traduzem-se em impactos ambientais, como contribuição para o fenômeno do aquecimento global, chuvas ácidas, comprometimento de ecossistemas hídricos, riscos à saúde humana e animal por inalação de particulados.

Conforme apresentado na seção II.2, uma parcela bastante significativa da produção de plástico mundial é destinada a produtos de ciclo de vida curto: 124.932 milhões de toneladas foram utilizadas apenas para o setor de embalagens no ano de 2015 (ABIPLAST, 2018). Isso gera uma grande necessidade de que os programas de gerenciamento de resíduos dos países estejam aptos a absorver os resíduos gerados e poder destiná-los adequadamente, de maneira a minimizar os potenciais impactos socioambientais.

Ainda, dado que os plásticos são majoritariamente obtidos a partir de combustíveis fósseis, a boa gestão dos resíduos abre possibilidades para a redução de emissões danosas ao ambiente, por meio de medidas facilitadoras à reciclagem e recuperação dos materiais pós-consumo, trazendo potencial ganho econômico, reduzindo o consumo do recurso natural ou até fornecendo energia. No entanto, não é essa a realidade observada ao redor do mundo.

Desde 1950, época em se iniciou a produção de plásticos em larga escala, até o ano de 2015, estima-se que 8,3 bilhões de toneladas de plástico foram produzidas, e que 79% dos resíduos plásticos gerados nesse intervalo de tempo foram destinados a aterros ou descartados a céu aberto. Se o ritmo de produção futuro seguir a tendência de crescimento apontada pelo histórico, em 2050 terão sido produzidas 26 bilhões de toneladas de plásticos, das quais 12 bilhões terão sido descartadas em aterros ou dispostas no meio ambiente, se acumulando nos ecossistemas terrestres e aquáticos por todo o planeta (GEYER, 2017).

É válido ressaltar que esses materiais não são biodegradáveis, e que as próprias características que os fazem interessantes e vantajosos do ponto de vista industrial, durabilidade, impermeabilidade, e resistência, fazem com que sejam tão difíceis de serem assimilados pela natureza – tornando ainda mais necessária o bom gerenciamento e recuperação desses materiais para redução dos efeitos no meio ambiente (GEYER, 2017). A Tabela 3 traz um ranking formulado por Jambeck *et al.* (2015) com os países com os maiores índices de resíduos plásticos sem destinação adequada, ou seja, resíduos que não receberam gerenciamento formal pelas instituições responsáveis.

Tabela 3 - Ranking dos países com maiores índices de resíduos sem destinação adequada.

País	População costeira (milhões)	Taxa de geração de resíduos (kg/habdia)	Resíduos plásticos (%)	Resíduos sem destinação adequada (%)	Resíduos plásticos sem destinação adequada (milhões de t/ano)	Resíduos plásticos nos oceanos (milhões de t/ano)
China	262,9	1,1	11	76	8,82	1,32 - 3,53
Indonésia	187,2	0,52	11	83	3,22	0,48 - 1,29
Filipinas	83,4	0,5	15	83	1,88	0,28 - 0,75
Vietnã	55,9	0,79	13	88	1,83	0,28 - 0,73
Siri Lanka	14,6	5,1	7	84	1,59	0,24 - 0,64
Tailândia	26	1,2	12	75	1,03	0,15 - 0,41
Egito	21,8	1,37	13	69	0,97	0,15 - 0,39
Malásia	22,9	1,52	13	57	0,94	0,14 - 0,37
Nigéria	27,5	0,79	13	83	0,85	0,13 - 0,34
Bangladesh	70,9	0,43	8	89	0,79	0,12 - 0,31
África do Sul	12,9	2	12	56	0,63	0,09 - 0,25
Índia	187,5	0,34	3	87	0,6	0,09 - 0,24
Argélia	16,6	1,2	12	60	0,52	0,08 - 0,21
Turquia	34	1,77	12	18	0,49	0,07 - 0,19
Paquistão	14,6	0,79	13	88	0,48	0,07 - 0,19
Brasil	74,7	1,03	16	11	0,47	0,07 - 0,19
Burma	19	0,44	17	89	0,46	0,07 - 0,18
Marrocos	17,3	1,46	5	68	0,31	0,05 - 0,12
Coreia do Norte	17,3	0,6	9	90	0,3	0,05 - 0,12
EUA	112,9	2,58	13	2	0,28	0,04 - 0,11

Fonte: JAMECK *et al.*, 2015.

Estima-se que entre 4,8 e 12,6 milhões de toneladas de resíduos plásticos tiveram os oceanos como seu destino final no ano de 2010 – sendo descartadas diretamente neles ou levadas aos oceanos por meio de rios (JAMBECK *et al.*, 2015). A disposição inadequada de resíduos nos oceanos acarreta impactos e danos à fauna marinha, à saúde humana, ao meio ambiente e ao turismo.

Em relação à fauna, os resíduos de plástico flutuantes podem causar lacerações, infecções, restrição de mobilidade e estrangulamento aos animais. Ainda, os materiais plásticos podem sofrer desgaste pelos raios solares, dando assim origem a micropartículas – os “microplásticos” – que, por sua vez, podem ser ingeridos por acidente pelos animais, e ocasionarem complicações em seu trato digestivo, se acumulando e obstruindo órgãos e vias digestivas, e liberando substâncias químicas carcinogênicas, utilizadas no processo de produção dos plásticos. Tais substâncias se acumulam nos tecidos dos animais que as ingerem, e através do fenômeno da magnificação trófica (aumento do acúmulo de toxinas à medida que se avança na cadeia alimentar), podem representar um potencial risco para a saúde humana, ainda que esse aspecto não tenha sido amplamente estudado pela comunidade científica (IUCN, 2019).

Rejeitos plásticos depositados inadequadamente nos oceanos também têm um impacto negativo nas atividades turísticas. A poluição visual causada por esses materiais, além da ideia de falta de higiene e de potencial risco à saúde associada a resíduos afastam os turistas e interferem no potencial de desenvolvimento socioeconômico das regiões que apresentam esse problema (IUCN, 2019).

Nesse contexto, a busca por processos de produção alternativos e de recuperação de materiais plásticos, bem como políticas de melhor gestão desses resíduos e dos recursos naturais envolvidos nesse processo, se tornam uma necessidade mundial. O conceito de economia circular, em que o material é projetado de forma tornar mais fácil a sua reincorporação na cadeia industrial após o descarte, começa a ser discutido e aplicado na indústria de transformação de plásticos (ABIPLAST, 2018).

A pressão para que as indústrias reinventem seus processos e adequem-se a métodos mais sustentáveis partiu tanto por meio da legislação, quanto dos consumidores. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), implementada em 2010, visa à redução na geração de resíduos, o consumo sustentável e o compartilhamento das responsabilidades dos materiais pós-consumo entre fabricantes, distribuidores, importadores e consumidores (BRASIL, 2010). Já os consumidores estão mais exigentes quanto às medidas ambientais

adotadas pelas empresas concorrentes, fazendo disso um critério diferencial na escolha dos produtos que consomem.

Como exemplo de metas globais estabelecidas, a União Europeia tem como objetivo destinar ao reuso, reciclagem ou recuperação energética 60% das embalagens plásticas até o ano de 2030, e 100% desses produtos até o ano de 2040 (PLASTICS EUROPE, 2018). A Petrobras, por sua vez, tem como objetivo o aumento zero de emissões operacionais no processo de produção e refino de petróleo até o ano de 2025, e busca, a longo prazo, investimentos em energias renováveis, tornando seu portfólio mais sustentável (PETROBRAS, 2019).

II.3.1 – Estratégias para Redução de Impactos na Indústria dos Plásticos

A estratégia mais assertiva no processo de tornar a indústria dos plásticos mais sustentável é a aplicação da hierarquia de gerenciamento de resíduos, ilustrada na Figura 7. Ela indica as destinações adequadas para os resíduos em ordem de priorização, sendo a redução da geração o fator mais importante, e a destinação a aterros sanitários a opção final para a menor quantidade e volume de resíduos possível.

Figura 7 - Pirâmide de hierarquia de gerenciamento



Fonte: OLIVEIRA (2012).

A redução do uso de recursos deve ser considerada prioridade na busca pela indústria mais sustentável. Na cadeia do plástico, ela se traduz especialmente no menor consumo de materiais plásticos pelos consumidores finais, o que representa um grande desafio, posto que as resinas plásticas estão intrinsicamente presentes no dia-a-dia da população. Outra aplicação da redução é a diminuição do uso de matérias-primas não renováveis para a produção de plásticos, que abre espaço para desenvolvimento de tecnologias a partir de recursos renováveis (OLIVEIRA, 2012).

O reúso se vê presente no direcionamento da indústria de plásticos para formulação de materiais com maior durabilidade, que permitam ser utilizados pelo consumidor final mais de uma vez antes de precisarem ser descartados. Após diversos ciclos de uso, os materiais plásticos devem então ser direcionados para a reciclagem, processo a partir do qual poderão ser reincorporados na cadeia produtiva. A alta carga de exigências ambientais aponta que apenas os resíduos que não puderem seguir para a reciclagem, impedidos na maioria das vezes por conta de contaminação, devem seguir para a incineração, e, apenas após esgotadas todas as opções anteriores, para os aterros (OLIVEIRA, 2012).

Uma das vertentes na busca por tornar os plásticos mais sustentáveis é o investimento em fontes renováveis de matéria-prima, gerando os bioplásticos. Esses polímeros são produzidos a partir de variadas fontes de biomassa, como milho, batata, cana-de-açúcar e mamona, por meio de produção de álcool e óleos (BRASKEM, 2019). Dentre os bioplásticos, existem os não-biodegradáveis (PE, PET, PA) e os biodegradáveis (poliácido láctico, polihidroxialcanoato, polisuccinato de butileno).

Como pontos positivos desses materiais estão a previsão de crescimento para o mercado de biopolímeros, cuja capacidade produtiva mundial aumentou de 249 mil toneladas em 2009 para 4,61 milhões de toneladas em 2016; o impacto positivo na redução de GEE durante o processo produtivo, já que o crescimento das espécies vegetais para a produção do bioplástico consome CO₂; a obtenção de plásticos com as mesmas propriedades dos produtos obtidos a partir de fontes fósseis; a possibilidade de reciclagem dos bioplásticos após o consumo; e, especialmente no caso do Brasil, o aproveitamento da estrutura das usinas de bioetanol a partir de cana-de-açúcar para a produção de biopolímeros – processo inaugurado no país em 2010 pela BRASKEM – convertendo o etanol oriundo da fermentação da cana-de-açúcar em eteno verde, matéria-prima para a produção de bioplástico (BRASKEM, 2019; CASTRO, 2019).

A produção de bioplásticos apresenta, ainda, oportunidades para o aproveitamento do resíduo gerado (bagaço da cana-de-açúcar) para fornecimento de energia para o processo e produção de etanol de 2ª geração (BRASKEM, 2019).

Por outro lado, existem também os desafios frente ao aumento da parcela de bioplásticos no cenário de consumo global. O primeiro deles é a defasagem do preço dos bioplásticos em relação ao preço dos plásticos convencionais, que segue sendo mais baixo e, portanto, apresenta vantagem competitiva. Ainda, a produção de bioplásticos resultaria em uma necessidade de amplificação da produção agrária, com maior exploração e uso da terra, o que pode acarretar outros impactos ambientais, como acidificação do solo e eutrofização dos recursos hídricos. Portanto, é necessário um acompanhamento e estudo preciso dos impactos relacionados a esse processo, de maneira a otimizar a produção com o mínimo possível de riscos ao ambiente. Apesar desses entraves, o cenário geral para o desenvolvimento futuro dos biopolímeros no mercado de plásticos global é favorável, e irá evoluir com a maior difusão das rotas tecnológicas, dos recursos disponíveis e dos ganhos com economia de escala (CASTRO, 2019).

Outra vertente que se faz presente na tentativa de reduzir os impactos ambientais ocasionados pelo consumo dos plásticos são os processos relativos à reincorporação dos resíduos plásticos (que podem ser de origem pós-consumo ou de sobras industriais) à cadeia produtiva, que consistem basicamente na recuperação energética e na reciclagem desses materiais.

A recuperação energética é um dos processos mais amplamente difundidos no mundo para reaproveitamento e minimização dos resíduos de plástico: o material residual da queima de resíduos plásticos representa uma redução de 90% do volume destinado aos aterros sanitários (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, 2019). Na Europa, 41,6% dos resíduos plásticos coletados segue para a recuperação energética, sendo que em alguns países, como Suíça, Dinamarca, Suécia, Bélgica, Áustria e Holanda, esse índice chega a 60%. O processo mais comum para recuperação energética é a incineração, cuja abrangência pode ser vista em números na Tabela 4 (CHEMIK 2013; PLASTICS EUROPE, 2018).

Tabela 4 - Instalações de incineração e quantidade de resíduos totais incinerados em diversos países europeus. Valores de 2009.

País	Número de instalações	Quantidade de resíduos incinerados (milhões de toneladas/ano)
Alemanha	10	19,1
Áustria	14	2,2
Bélgica	16	2,8
Dinamarca	31	3,5
República Tcheca	3	0,4
Espanha	10	2,2
Finlândia	3	0,3
França	130	13,7
Holanda	12	6,3
Noruega	20	1
Polónia	1	0,04
Portugal	3	1,1
Eslováquia	2	0,2
Eslovênia	1	0,01
Suíça	28	3,6
Suécia	31	4,7
Hungria	1	0,4
Grã-Bretanha	23	3,4
Itália	49	4,5

Fonte: CHEMIK, 2013.

A recuperação energética do plástico se faz comum no manejo de resíduos porque a capacidade calorífica média do plástico é de 40 MJ/kg, o que torna propício o seu uso para a geração de energia (para efeito comparativo, o gás natural possui capacidade calorífica de 48 MJ/kg). Ainda, o processo apresenta como vantagens a considerável redução do volume e inertização dos materiais destinados aos aterros sanitários, além de já ser uma tecnologia bem consolidada e difundida globalmente (CHEMIK, 2013; CARNEIRO, 2009). Por outro lado, a incineração requer que os resíduos estejam bem secos para poder apresentar um grau de eficiência satisfatório; apresenta altos custos operacionais devido ao gasto energético do processo; e, principalmente, exige acompanhamento e altos investimentos no tratamento dos efluentes e emissões resultantes do processo – que significam consideráveis impactos ambientais.

A combustão de plásticos pode acarretar emissões de gases tóxicos, como SO₂ e NO_x, decorrentes da presença de contaminantes; dioxinas, oriunda da queima de materiais clorados (presença de PVC nos resíduos plásticos) e CO, a partir da combustão incompleta dos hidrocarbonetos. Os processos atuais já apresentaram significativos avanços no

controle de emissões, na maioria dos casos utilizando uma segunda câmara de combustão. De modo geral, a recuperação energética é recomendada para os casos em que se provar muito oneroso e difícil realizar o processo de reciclagem dos resíduos plásticos (CARNEIRO, 2009; BASTOS, 2013).

Como alternativa, visando o manejo mais adequado dos resíduos plásticos, a reciclagem desses materiais pode ser estudada de acordo com o tipo de processo: reciclagem mecânica ou reciclagem química. Ambos apresentam em comum a reinserção do material plástico pós-consumo na cadeia produtiva; no entanto, a reciclagem mecânica promove apenas alterações físicas nos polímeros reciclados, enquanto a química resulta em mudanças na estrutura química dos materiais (AL-SALEM *et al.*, 2009). Sua representatividade no cenário mundial de manejo de resíduos vem aumentando a cada ano: no período de 2006 a 2016, houve um aumento de 100% dos resíduos plásticos destinados à reciclagem na União Europeia (PLASTICS EUROPE, 2018).

II.4 – Gestão de RSU: Panorama Global e Nacional

De acordo com a ABNT (2004), entende-se por resíduo sólido todos os materiais em estado sólido ou semi-sólido gerados em atividades domésticas, hospitalares, industriais, comerciais, agrícolas, de serviço e de varrição – inclusive lodos gerados em sistemas de tratamento e líquidos com características que tornem inviável seu despejo na rede de esgotos. Em particular, os resíduos sólidos urbanos (RSU) são constituídos pelos resíduos provenientes de atividades domésticas, denominados resíduos domiciliares (RDO), e pelos resíduos oriundos dos serviços de limpeza urbana (RLU).

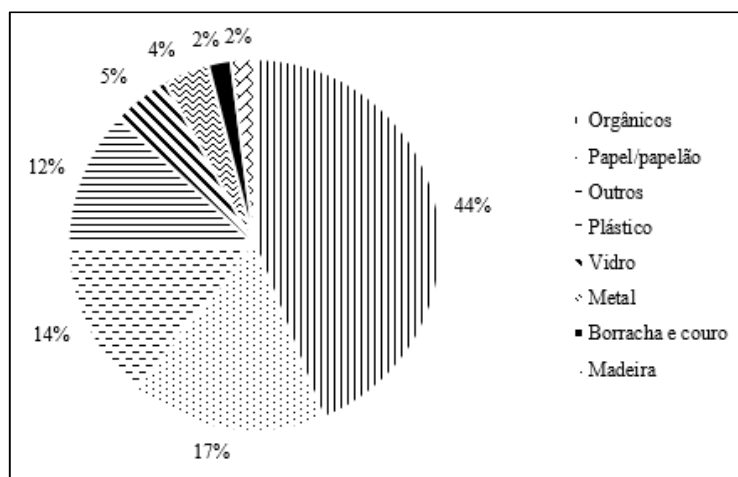
Dentre as classificações de resíduos apresentadas pela ABNT, realizada com base no processo que lhes deu origem, nas características e propriedades do material e no grau de periculosidade à saúde humana e ao meio-ambiente, os resíduos plásticos são classificados como Classe B II: “Não Perigosos e Inertes”. A Tabela 5 compila as possíveis classificações de resíduos quanto à periculosidade, formulada pela ABNT.

Tabela 5 - Classificação dos resíduos quanto à sua periculosidade.

Classificação de resíduos			
Especificidade	Classe I Perigosos	Classe II – Não Perigosos	
		Classe II A Não inertes	Classe II B Inertes
	Materiais que significam risco à saúde humana ou ao meio ambiente, por apresentarem periculosidade, ou alguma característica entre toxicidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade ou patogenicidade.	Resíduos que não se enquadram na classificação de Classe I – Perigosos, e apresentam propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.	Resíduos que não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água.

No mundo, a média *per capita* de geração de resíduos sólidos varia entre 0,11 kg por dia e 4,54 kg por dia, sendo a região da Ásia Ocidental e Pacífico a maior responsável por geração de resíduos sólidos: responde anualmente por 468 milhões de toneladas de resíduos sólidos (WWF e World Bank, 2018). A composição média global em massa dos RSUs está ilustrada na Figura 8.

Figura 8 - Percentual da geração mundial de resíduos por tipo de resíduo

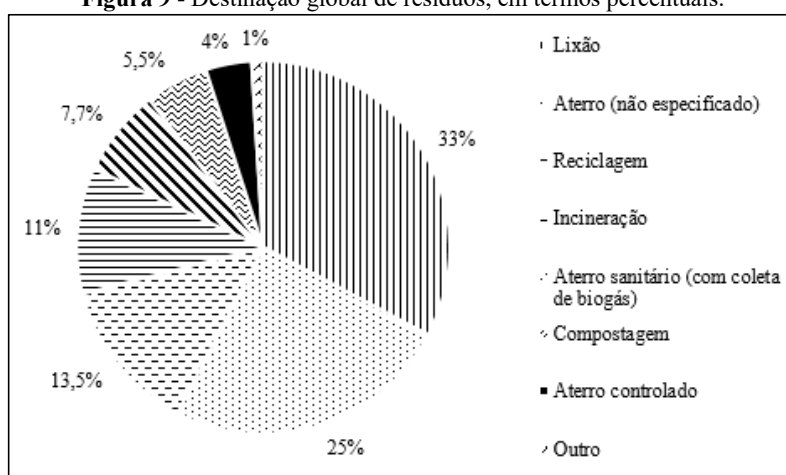


Fonte: Formulação própria com dados de WWF, 2018.

Quando analisados por nível de renda, os países com menor PIB apresentaram um perfil de RSU dominado por mais de 50% de resíduos orgânicos, e uma fração de recicláveis em torno de 16%. Já nos países com PIB elevado, os orgânicos constituem cerca de 30% dos RSU gerados, enquanto os recicláveis ficam em torno de 50%. À medida que há avanços no PIB, a parcela de recicláveis presentes nos RSUs aumenta

significativamente. No tocante à destinação, a nível global 30% dos resíduos seguem para algum tipo de recuperação: compostagem (5,5%), reciclagem (13,5%) ou incineração (11%), de acordo com dados de 2018 da WWF. Embora 33% dos resíduos ainda seguirem para lixões, esse tipo de disposição prevalece em países de baixa renda, que não têm acessibilidade às tecnologias para construção de aterros sanitários. Os segmentos de destinação de resíduos globais estão ilustrados na Figura 9.

Figura 9 - Destinação global de resíduos, em termos percentuais.



Fonte: Formulação própria com dados de WWF, 2018.

No Brasil, a média de geração de RSU corresponde a 1,035 kg/habitante/dia. A região brasileira responsável pela maior parte dos resíduos é o Sudeste, com 105.794 toneladas diárias geradas. O Sudeste também é a região que apresenta maior índice de cobertura de coleta, ou seja, o percentual dos RSUs coletados pelas empresas de gerenciamento de resíduos em relação à quantidade total de resíduos gerada: 98% dos resíduos gerados foram coletados. O menor índice de cobertura do Brasil se encontra no Nordeste, e equivale a 79% (ABRELPE, 2017).

Considerando todo o país, cerca de 40% dos RSUs gerados são dispostos anualmente em lixões e aterros controlados. Com a instituição da PNRS, a logística reversa dos resíduos pós-consumo; a responsabilização compartilhada entre empresas e consumidores pelo ciclo de vida dos produtos; e a implementação da reciclagem foram consideradas medidas prioritárias para o gerenciamento de resíduos no Brasil (ABRELPE, 2017).

Em 2015, foi firmado um Acordo Setorial para implementação de um sistema de Logística Reversa de Embalagens, assinado por associações representantes dos setores de

papel, alumínio e plástico e empresas. O acordo estabelecia uma meta de 24,8% de recuperação de embalagens de alumínio, papel/papelão e plástico.

A Tabela 6 compila os resultados encontrados após a primeira fase de implementação do acordo, ilustrando os valores de resíduos gerados desses três tipos em todo o território nacional, os valores dos materiais recuperados, e o índice de recuperação. Nessa análise, não foi especificado se os RSUs eram oriundos de programas de coleta seletiva ou de coleta convencional conjugada com usinas de triagem. A partir dos resultados mostrados na Tabela 6, percebe-se que a recuperação de resíduos plásticos oriundos de embalagens representa uma grande oportunidade para a gestão de resíduos sólidos no Brasil (ABRELPE, 2017).

Tabela 6 - Análise da recuperação de resíduos recicláveis a partir de embalagens gerados no Brasil em 2017.

Tipo de material reciclável	Quantidade de resíduos de embalagens gerados (t/dia)	Quantidade de resíduos de embalagens recuperados (t/dia)	Índice de recuperação de embalagens (%)
Alumínio	941	821	87,2
Papel/papelão	21.851	11.437	52,3
Plástico	21.153	1.738	8,2

Fonte: Elaboração própria com dados de ABRELPE, 2017.

Capítulo III – Reciclagem de Plásticos

III.1 – Panorama Global e Nacional

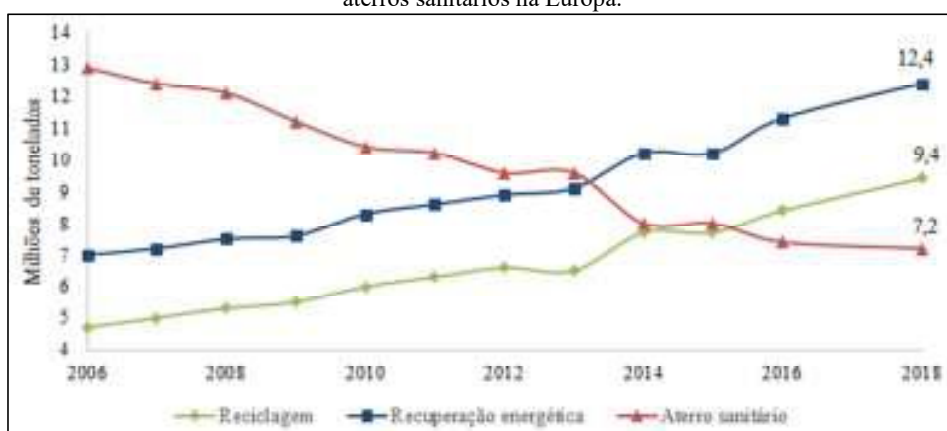
Com o advento das discussões ambientais, da preocupação pelo esgotamento dos recursos naturais, da busca por modelos de produção que considerem o ciclo de vida dos produtos e com a maior participação dos consumidores exigindo dados de sustentabilidade das empresas, a reciclagem vem se firmando ano após ano como uma alternativa mais sustentável para o mercado de plásticos. De acordo com um relatório de 2019 da Orbis Research, empresa especializada em pesquisas de mercado, o mercado de reciclagem de plásticos estava avaliado em 25.600 milhões de dólares em 2018, com expectativa de atingir 41.200 milhões de dólares ao final de 2019 (ORBIS RESEARCH, 2019), até a presente data o relatório não foi atualizado.

Na Europa, em 2017, 32,5% do total dos RSU plásticos gerados – correspondente a 9,4 milhões de toneladas anuais - foram destinados à reciclagem, um significativo aumento de 79% em relação ao ano de 2006, em que 4,7 milhões de toneladas seguiram para esse destino. Quando avaliado apenas o setor de embalagens, o índice de reciclados é de 40,8%, com meta de chegar a 50% em 2025 (PLASTICS EUROPE, 2018).

A

Figura 10 mostra a evolução, em milhões de toneladas, dos resíduos plásticos destinados à recuperação energética, à reciclagem e aos aterros sanitários na Europa, e a partir desse gráfico verifica-se que as tendências de melhoria dos sistemas de gestão de resíduos é uma realidade no continente europeu. Ainda, é válido notar que, nesse mesmo tempo, a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários diminuiu em 44%.

Figura 10 - Evolução dos RSU plásticos destinados à recuperação energética, à reciclagem e a aterros sanitários na Europa.



Fonte: Plastics Europe (2007 a 2019).

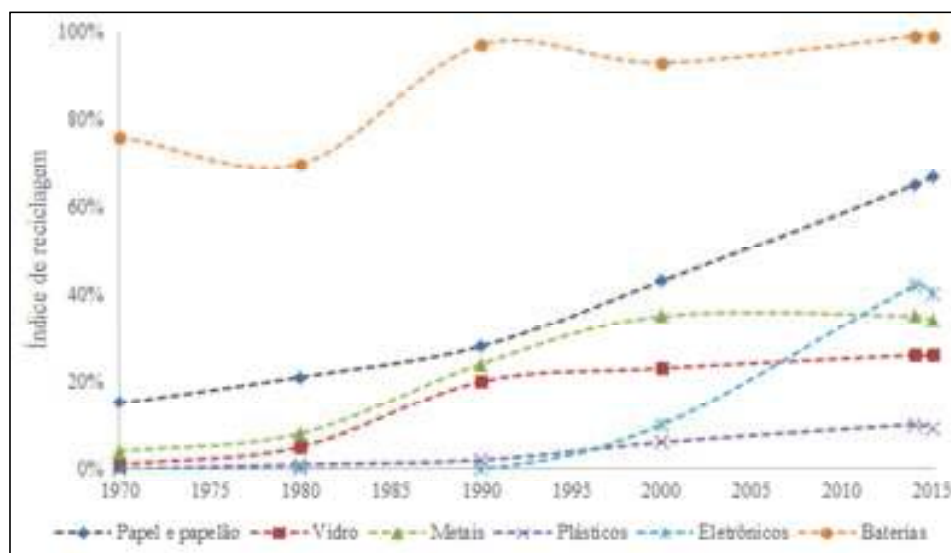
Ainda que as duas destinações com reaproveitamento – recuperação energética e reciclagem – apresentem curvas de evolução semelhante, nota-se que a primeira teve um aumento de 77% nesses 12 anos, enquanto a segunda aumentou em 100%. Isso evidencia avanços em relação à viabilidade da reciclagem como processo de gerenciamento de resíduos plásticos pós-consumo, e, conseqüentemente, maior espaço no mercado para as resinas recicladas.

Já nos EUA, o percentual médio de reciclagem dos resíduos plásticos pós-consumo é de 9%, considerando embalagens, bens duráveis e não-duráveis, que se traduz em 3,1 milhões de toneladas anuais de RSU destinadas à reciclagem. Apesar de ser um índice baixo em relação à Europa, o país apresentou uma evolução de índice de reciclagem inexistente, em 1970, para 9% em 2015. Em comparação, a recuperação energética se mostrou ligeiramente mais presente no país: 5,33 milhões de toneladas tiveram como destino a combustão (EPA, 2018).

Ainda que os índices para reciclagem de plástico estejam baixos, os EUA mostram uma evolução positiva e uma tendência de adesão a práticas de gerenciamento de resíduos mais sustentáveis: o índice global de reciclagem do país cresceu de 6%, em 1960, para 34%, em 2015, com destaque para baterias, que apresentam um índice de reciclagem de 99%. A

Figura 11 ilustra a evolução dos índices de reciclagem nos EUA por tipo de material.

Figura 11 - Evolução dos índices de reciclagem dos principais RSUs recicláveis nos EUA.



Fonte: Formulação própria a partir dos dados de EPA, 2018.

No caso do Brasil, apesar dos baixos índices de reciclagem de plásticos, os dados também se mostram favoráveis ao desenvolvimento do setor: o número de empresas do ramo de reciclagem de plástico no Brasil mais que dobrou entre o período de 2007 e 2017. A Figura 12 traz a evolução de empresas atuantes em reciclagem no Brasil no período mencionado.

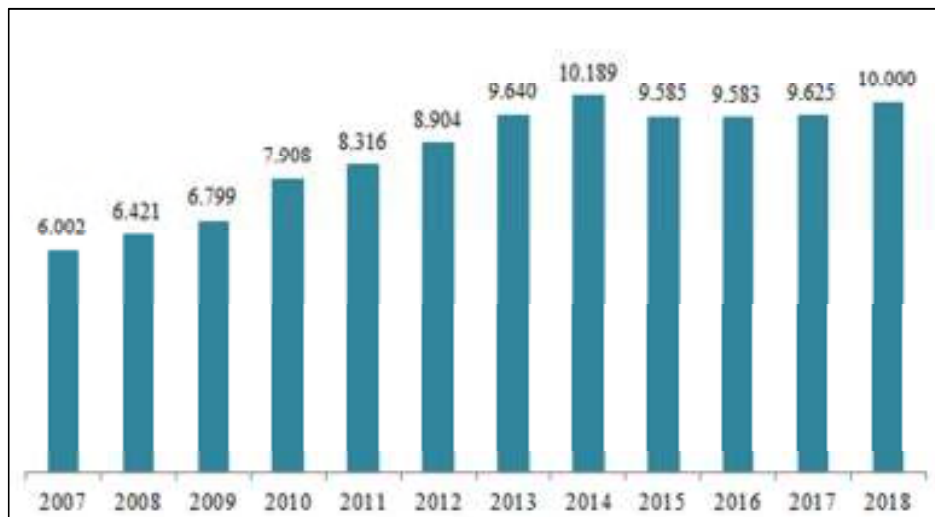
Figura 12 - Evolução do número de empresas do setor de reciclagem de plásticos no Brasil.



Fonte: ABIPLAST, 2018.

Apesar da redução de 2% no número de empresas desde 2014, o número de empregos gerados pelo setor apresenta tendência de aumento desde 2016, tendo um aumento de 3,2% de 2017 para 2018, conforme ilustra a Figura 13.

Figura 13 - Evolução do número de empregos no setor de reciclagem de plásticos no Brasil.



Fonte: ABIPLAST, 2018.

A produção nacional de reciclados plásticos vem se mantendo estável, e abrange 7,1% das resinas consumidas nacionalmente. A média de produção é de 550 mil toneladas anuais, para os dados obtidos dos anos de 2014, 2015 e 2016. Em 2015, houve uma diminuição da produção, que pode ser explicada pela recessão que a economia brasileira

experimentou nesse ano – mas já mostra avanços com a produção voltando a subir (ABIPLAST, 2018).

Seguindo a tendência mundial, os dados nacionais indicam um cenário favorável para o crescimento da indústria de reciclados plásticos no Brasil. No país, além de todos os benefícios ambientais que terão alto impacto na conservação dos mais diversos ecossistemas brasileiros, a reciclagem de plástico implica também em um estímulo ao desenvolvimento da economia, que vem se reerguendo após anos de crises. A expansão deste mercado significaria maior desenvolvimento tecnológico nacional, ampliação e modernização das indústrias e geração de empregos nos mais diversos ramos, permeados pela indústria de produção de materiais plásticos.

III.1.1 – Estudo de Caso: Panorama Atual do Estado do Rio de Janeiro

Em 2013, a massa diária média de resíduos domiciliares *per capita* gerados no RJ foi de 0,77 kg/habitante, ou 16.970,6 t/dia, considerando os dados de população do censo do IBGE de 2010. Apenas a Região Metropolitana responde por 82% da geração total do estado (SEA, 2013).

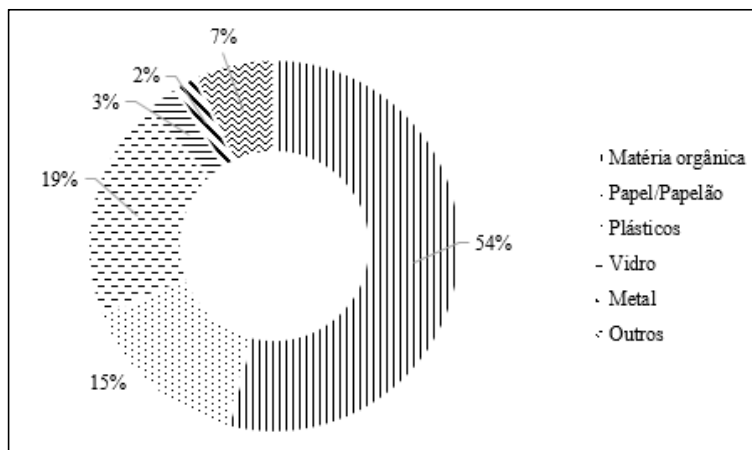
A Tabela 7 e a Figura 14 ilustram a composição gravimétrica média (em massa) dos RSU gerados no RJ, separadas pelo tipo de município, em termos populacionais: municípios de pequeno porte apresentam até 100.000 habitantes; de médio porte, entre 100.000 e 1.000.000; e de grande porte, acima de 1.000.001.

Tabela 7 - Composição gravimétrica média (em massa) dos RSU do estado do Rio de Janeiro, em percentuais, por porte de município.

Municípios	Matéria Orgânica	Papel/Papelão	Plásticos	Vidro	Metal	Outros
Pequenos	56,72	13,45	18,63	2,83	1,58	6,79
Médios	53,03	16,57	19,69	2,95	1,49	6,27
Grandes	53,28	15,99	19,14	3,28	1,57	6,74

Fonte: SEA, 2013, p. 45. A parcela “Outros” compreende resíduos menos nobres, com potencial de reciclagem.

Figura 14 - Composição gravimétrica média (em massa) dos RSU do estado do Rio de Janeiro, para o ano de 2018.

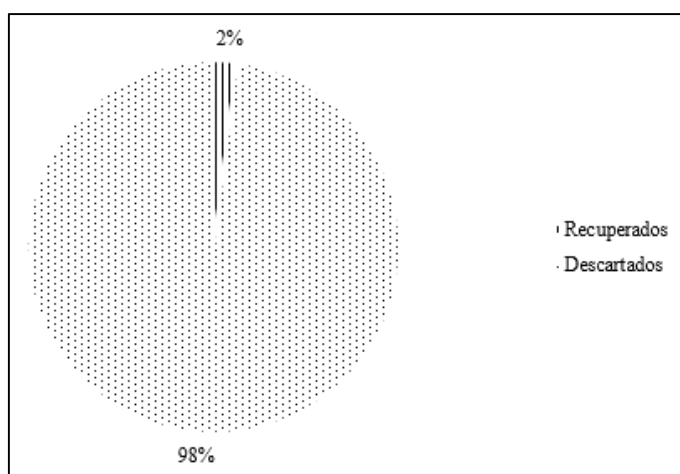


Fonte: Elaboração própria com os dados de SEA, 2013. A parcela “Outros” compreende resíduos menos nobres, com potencial de reciclagem.

Ao total, a geração de RSU no estado corresponde a 6.109.419,6 toneladas anuais, sendo a parcela potencialmente reciclável correspondente a 46% desse total, e a proporção de matéria orgânica, 54%. É válido ressaltar que os resíduos são classificados como “potencialmente recicláveis” porque, para serem reciclados, os materiais deverão passar por etapas de triagem e qualidade, que determinarão quais itens estão aptos para seguir para o processo de reciclagem (SEA, 2013).

A recuperação e o aproveitamento dos resíduos pós-consumo dependem diretamente da qualidade da triagem: a separação na fonte, realizada pelos cidadãos, e os serviços de coleta seletiva e transporte desses materiais representam um papel crucial na viabilização da operação dos processos de recuperação energética e de reciclagem, conforme exposto na Seção III.3.1. Isso ainda representa um grande desafio para o gerenciamento de RSUs no estado do Rio de Janeiro, apesar das iniciativas apresentadas na Seção III.3.2: em 2013, 22 dos 92 municípios do estado operavam com coleta seletiva, possibilitando a recuperação de 61,6 mil toneladas por ano (SEA, 2013), o que equivale a apenas 2,2% do total de RSUs recicláveis gerados no Rio de Janeiro. A proporção entre os RSUs reciclados e os descartados é ilustrada na Figura 15.

Figura 15 - Percentual de recuperação dos RSU recicláveis no estado do Rio de Janeiro



Fonte: Formulação própria a partir de SEA, 2013.

O aproveitamento da parcela de matéria orgânica seria possível através de usinas de compostagem, para a produção de fertilizantes, ou de geração energética: as 3,3 milhões de toneladas anuais de resíduos orgânicos geradas pelo estado teriam potencial de geração mínima de 100MW a partir do biogás oriundo dos RSU, que equivale a 1,4% da geração energética total do estado (SEA, 2013; ANEEL, 2017).

Em relação à parcela potencialmente reciclável, especificamente os RSUs plásticos, é possível listar a quantidade gerada desse tipo de material por ano para as 8 sub-regiões do estado, a partir do percentual médio da composição gravimétrica em massa:

Tabela 8 - Geração de resíduos plásticos no estado do Rio de Janeiro, por região.

Sub-região	População	Geração total de RSU (t/ano)	Geração de RSU plástico (t/ano)
Região Metropolitana	11.838.752	5.290.750,26	1.005.243
Região Centro-Sul Fluminense	272.345	64.081,58	12.176
Região da Costa Verde	243.156	68.791,78	13.070
Região das Baixadas Litorâneas	811.096	219.801,38	41.762
Região do Médio Paraíba	855.643	251.850,44	47.852
Região Noroeste Fluminense	317.476	71.717,88	13.626
Região Norte Fluminense	849.302	246.320,77	46.801
Região Serrana	805.813	215.784,72	40.999

Fonte: Formulação própria com base nos dados de SEA, 2013, e SEFAZ, acessado em 2019.

Um dos ganhos que o aproveitamento dos resíduos plásticos com a reciclagem representaria seria a redução significativa do volume de materiais direcionados aos aterros

sanitários e Centros de Tratamento de Resíduos (CTR) do estado. Em 2013, cerca de 6.046.804 toneladas de RSU foram destinadas aos CTRs do estado (SEA, 2013).

De acordo com o Relatório do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de 2016, divulgado pela Prefeitura do Rio de Janeiro, 93% do total de resíduos coletados na cidade são destinados ao CTR de Seropédica que, segundo sua ficha técnica, tem capacidade de recebimento de 9.000 toneladas/dia, e vida útil de 18 anos, tendo iniciado sua operação em 2011 (CICLUS, acessado em 2019). Levando em consideração apenas os dados de geração diária de RSU no município do Rio de Janeiro para o ano de 2013 - 8.406,19 toneladas/dia -, percebe-se que, nos 8 anos de operação transcorridos até 2019, o aterro sanitário já teria alcançado pelo menos 43,4% de sua capacidade máxima, sem considerar os outros municípios atendidos, gerando a necessidade de que, num horizonte de 10 anos, seja realizado um novo investimento para destinação dos resíduos. Por isso, é importante o estímulo e desenvolvimento de rotas alternativas, mais eficazes, modernas e de maiores ganhos econômicos para a gestão de resíduos sólidos no Rio de Janeiro (PMGIRS - RJ, 2016).

Diferentemente do sistema de coleta britânico, exposto na Seção III.3.1., embora sejam previstas multas e taxas para o descumprimento da legislação, as medidas punitivas em relação à separação dos RSU recicláveis pela população, ou ao recolhimento separado dos resíduos recicláveis pelas empresas de coleta, não são aplicadas com devido rigor. Esse déficit da triagem de resíduos recicláveis na fonte, e de regulamentos que facilitem e estimulem a reciclagem dos materiais pós-consumo representa um desafio para a implantação de projetos de reciclagem no Brasil. Uma alternativa para tornar a adaptação do projeto europeu possível para a realidade brasileira é a compra dos resíduos plásticos já separados dos outros RSUs de usinas de triagem de resíduos.

III.2 – Os Processos de Reciclagem de Plástico

Conforme exposto no Capítulo 2, o Brasil apresenta um grande potencial para recuperação do plástico descartado, atividade que traz ganhos ambientais (redução do volume de resíduos sólidos destinados a aterros e redução de emissões de poluentes, especialmente de óxidos de nitrogênio e de dióxido de enxofre, liberados no processo de produção dos plásticos a partir do petróleo) e ganhos econômicos (geração de novos

empregos, impulsão do mercado interno e desenvolvimento da indústria nacional) para o país.

O fato de que os plásticos sejam produzidos a partir de recursos fósseis não renováveis gera a necessidade de desenvolvimento de técnicas e processos para integração eficiente da gestão de resíduos com a cadeia produtiva, de forma a minimizar a extração dos recursos *in natura* e promover o reaproveitamento dos materiais já processados (AL-SALEM *et al.*, 2009).

Os processos de tratamento e reciclagem dos materiais plásticos podem ser classificados em quatro categorias: re-extrusão (tratamento primário), reciclagem mecânica (tratamento secundário), reciclagem química (tratamento terciário) e recuperação energética (tratamento quaternário). Cada um desses métodos gera diferentes produtos e oferece diferentes vantagens, que devem ser estudados em relação às particularidades da localidade em que serão desenvolvidos, sempre considerando a viabilidade técnica, econômica e comercial (AL-SALEM *et al.*, 2009).

Neste trabalho, serão abordados com ênfase os tratamentos secundários e terciários, que geram produtos com valor de mercado e capazes de serem reinseridos na cadeia industrial de plásticos, e impactam significativamente na quantidade e volume de resíduos destinados aos aterros sanitários.

O tratamento primário não será estudado porque a re-extrusão dos materiais plásticos não envolve as etapas de lavagem e homogeneização das resinas, e por isso é utilizado para o reaproveitamento de resíduos plásticos industriais, e não resíduos pós-consumo, que são o foco deste trabalho. O tratamento quaternário também não será considerado como via de reciclagem, dado o apelo ambiental que envolve esse processo, principalmente relacionado às emissões atmosféricas, efluentes e resíduos sólidos oriundos da combustão de plásticos (RAGAERT *et al.*, 2017).

III.2.1 – Tratamento Secundário: Reciclagem Mecânica de RSUs Plásticos

Por definição, a reciclagem mecânica de plásticos é o processo de recuperação de resíduos plásticos para sua reutilização no processo de produção de materiais plásticos, por

[JP1] Comentário: Incluir o que o bolinha falou sobre o motivo de não aprofundar nesse tema

meio de métodos mecânicos, e é atualmente o processo de reciclagem de plásticos mais difundido no mundo (HOPEWELL *et al.*, 2009; AL-SALEM *et al.*, 2009). Ela permite uma redução significativa no consumo de energia e recursos em comparação com o processo tradicional: a cada 1 tonelada de material reciclado, há uma economia média de 75 % de energia e de 450 L de água em relação ao processo tradicional, além de evitar que resíduos plásticos sejam destinados a aterros sanitários (ABIPLAST, 2018).

O processo conta com etapas de pré-reciclagem de separação dos materiais plásticos dos demais RSU, moagem, lavagem, separação e secagem. Em seguida, estão as etapas de trituração, aglutinação, extrusão e resfriamento. Se necessário, pode haver etapas adicionais de lavagem e secagem, dependendo da destinação final do produto obtido (RAGAERT *et al.*, 2017; BRASKEM, 2019).

A separação dos materiais plásticos dos demais RSUs é etapa imprescindível para a reciclagem mecânica de plásticos, e deve ser realizada por meio da coleta seletiva, por catadores ou triagem mecânica nas usinas de triagem (DODBIBA *et al.*, 2004). As usinas de triagem podem realizar ou não a separação das resinas plásticas entre si.

Caso as resinas não sejam diferenciadas entre si na usina de triagem, ao seguirem para a usina de reciclagem elas precisarão passar por um processo de separação de plásticos. Esta é considerada uma etapa crítica para o processo de gerenciamento de resíduos plásticos, devido à complexidade que representa a identificação e a classificação correta das resinas (DODBIBA *et al.*, 2004).

Na usina de reciclagem, a etapa do processo é a trituração, para redução de seu volume, seguida por lavagem, sendo geralmente empregado um tambor rotativo para essa operação. A etapa de lavagem é importante para a retirada de compostos orgânicos e de demais contaminantes (BISWAJIT *et al.*, 2015; RAGAERT *et al.*, 2017).

Após a lavagem, a carga com resinas plásticas misturadas segue para a separação, realizada em tanques de flotação com água, onde a diferença de densidades irá ser o critério para a separação dos diferentes tipos de resinas: resinas menos densas irão boiar (PP e PE), e resinas mais densas irão submergir (PE, PS, PVC). Como há resinas plásticas com faixas de densidade sobrepostas, se fazem necessários alguns processos adicionais para separação do material: após a secagem, a fração mais leve é direcionada para ciclones, para a separação adicional, que deixa as resinas em condições de pureza e homogeneidade propícias para a operação. Já a fração mais densa pode passar por separação triboelétrica, por exemplo, em que os *pellets* passam por um tambor rotativo, provocando atrito entre as partículas, que gera uma carga superficial com sinais opostos nas superfícies dos materiais.

Em seguida, os materiais são direcionados a um separador eletrostático, onde as partículas com diferentes cargas serão separadas devido à ação do campo elétrico. Teoricamente, esse método de separação pode ser aplicado para misturas com várias resinas plásticas, mas os melhores resultados são obtidos na separação de misturas de apenas dois tipos de resina (RAGAERT *et al.*, 2017).

Finalizadas as etapas de separação, as resinas já homogeneizadas seguem para uma nova trituração, para facilitar sua manipulação nas etapas subsequentes (cargas com resinas já purificadas na estação de triagem seguem direto para esta etapa após a lavagem). Nessa etapa também pode ocorrer a separação de eventuais contaminantes (como pedaços de papel e poeira) com o uso de ciclones, e, se necessário, podem ser adicionadas etapas de lavagem e secagem do material triturado. Em seguida, as resinas são aglutinadas, por compactação por compressão, e podem receber pigmentos e aditivos, dependendo da função desejada para o produto final. Após a compactação do polímero, ele é enviado para extrusoras, onde adquire a forma de filamentos, para a maioria dos casos. Finalmente, as resinas sólidas seguem para resfriamento e são enviadas a um triturador para serem transformadas em *pellets*. Após esse processo, o material já pode seguir para a reinserção na cadeia de transformados plásticos. Atualmente, se obtém PVC e PET reciclados de alta qualidade através da reciclagem mecânica (TRINDADE, 2015; AL-SALEM *et al.*, 2009).

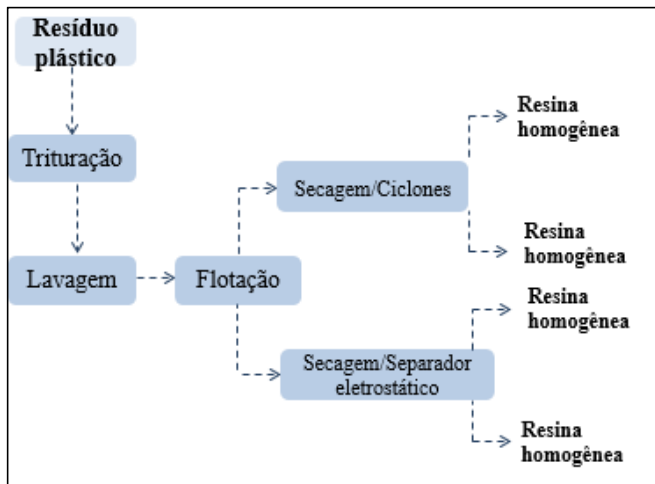
A separação e homogeneização das resinas que serão processadas por via mecânica das resinas é uma etapa crítica e essencial para que as resinas recicladas conservem boas propriedades físicas e mecânicas. Dessa forma, a triagem dos RSU e separação entre as diferentes resinas podem representar uma limitação para regiões em que a coleta seletiva e a separação de resíduos não seja bem difundida (OLIVEIRA, 2012).

Algumas alternativas utilizadas para tentar minimizar o efeito de perda de propriedades mecânicas e físicas são o uso de aditivos (como extensores de cadeia) nas resinas recicladas, ou a adição de resinas plásticas virgens às recicladas, formando assim um *blend* que apresente as propriedades exigidas pelo mercado (ABIPLAST, 2018).

A Figura 16 e a

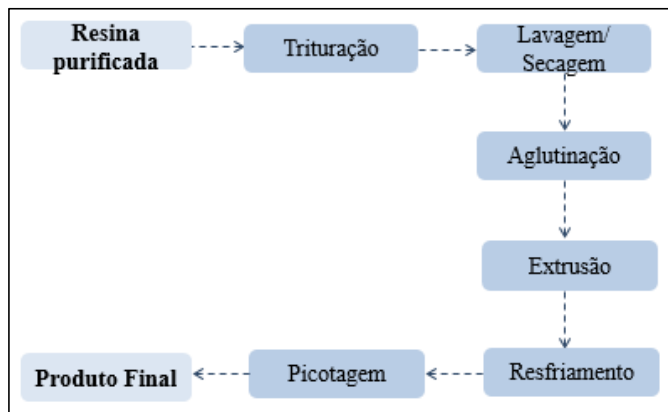
Figura 17 ilustram, respectivamente e de modo esquematizado, o processo de pré-reciclagem e de reciclagem dos RSUs plásticos.

Figura 16 - Esquema de processo de pré-reciclagem mecânica da fração plásticos do RSUs



Fonte: Elaboração própria com base em AL-SALEM *et al.*, (2009); RAGAERT *et al.* (2017).

Figura 17 - Esquema do processo de reciclagem mecânica de resíduos plásticos.



Fonte: Elaboração própria com base em AL-SALEM *et al.*, 2009; RAGAERT *et al.* (2017).

III.2.2 – Tratamento Terciário: Reciclagem Química de RSUs Plásticos

A reciclagem química do plástico consiste na despolimerização dos resíduos plásticos, ou seja, em alterações na estrutura molecular desses materiais de modo que as

resinas poliméricas sejam quebradas e produzam novamente os monômeros que lhes deram origem, ou ainda outras moléculas menores de hidrocarbonetos primários (etano, por exemplo). Como consequência, são obtidos monômeros e/ou hidrocarbonetos, que são matéria-prima para produção de novos plásticos ou outros produtos petroquímicos. Através dessa rota tecnológica, podem ser processadas misturas de polímeros, sem que a qualidade dos produtos finais seja afetada (AL-SALEM *et al.*, 2009).

Existem três processos principais pelos quais os resíduos plásticos podem ser submetidos à reciclagem química: (i) pirólise, (ii) gaseificação e (iii) hidrogenação. Todos são termolíticos, ou seja, constituem reações na presença de calor, sob condições controladas (BRASKEM, 2019).

O processo de pirólise consiste no craqueamento térmico das macromoléculas de plástico, a alta temperatura (cerca de 600 °C), em atmosfera inerte, e já está no mercado nos EUA, Grã Bretanha e Alemanha. A corrente de entrada no processo pode ser composta por uma mistura de resinas plásticas, evitando-se PVC, pois na presença de calor gera HCl, altamente corrosivo, e PET, e outras resinas oxigenadas, pois favorecem a produção de coque (ZERO WASTE EUROPE, 2019).

A partir da pirólise, são obtidos produtos em fases líquida (óleos alifáticos e aromáticos), sólida (parafinas e carvão) e gasosa, com uma mistura de cadeias de hidrocarbonetos bem similar à obtida com o refino de petróleo, que pode ser processada nas instalações tradicionais da indústria petroquímica, gerando produtos com alto valor agregado, ou mesmo ser usado como combustível (GRAUSE, 2011).

As vantagens do processo de pirólise são a possibilidade de processamento de diversas resinas plásticas simultaneamente (apenas com as restrições já mencionadas ao PVC e ao PET) e a geração de um produto de alto valor agregado, que pode ser trabalhado por processos já maduros industrialmente e bem difundidos no mundo inteiro, ou para geração de energia. Em ambos os casos, o resultado gera valor a partir do processamento de resíduos que seriam simplesmente descartados.

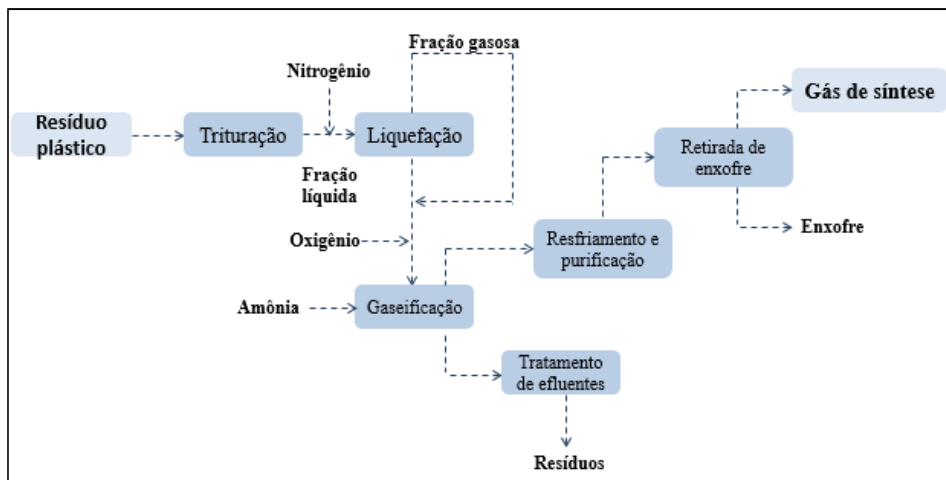
A empresa Plastic Energy possui duas plantas de pirólise na Espanha, em operação desde 2014 e 2017, processando PEAD, PEBD, PS e PP em gases compostos por hidrocarbonetos. A fração condensável desses gases é convertida em diesel, óleo leve e outros componentes sintéticos, que são comercializados para a indústria petroquímica. Os gases não-condensáveis são utilizados para gerar energia para a própria planta de pirólise (ZERO WASTE EUROPE, 2019).

Como desafio, está a alta demanda energética do processo: segundo o Departamento de Energia dos EUA, o custo de produção de 1 kW pela pirólise é o dobro do custo de produção da mesma quantidade de energia a partir de células fotovoltaicas, e a pirólise só se prova economicamente viável se o volume de produção for elevado, e se a alimentação da entrada for estável em termos de quantidade, composição e qualidade (ZERO WASTE EUROPE, 2019). Ainda, existe a possibilidade de formação de substâncias tóxicas, como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH) e dioxinas, que apresentam potencial para causar mutações genéticas e câncer (GREENPEACE, 2019).

Uma última consideração a ser feita sobre a pirólise é que, para direcionar o produto final para a produção de novos plásticos, devem ser adicionados processos de otimização da fração de nafta na mistura obtida, que são um desafio para a indústria em geral, o que leva à preferência de mercado pela destinação da mistura de hidrocarbonetos à geração de energia (ZERO WASTE EUROPE, 2019).

O segundo processo de reciclagem química é a gaseificação. É o processo no qual os resíduos plásticos (e outros materiais, como biomassa) são levados a altas temperaturas, na presença limitada de O₂, dando origem majoritariamente ao gás de síntese (CO + H₂), de ampla utilização na indústria petroquímica. Ar é utilizado em vez de O₂ puro a fim de simplificar e reduzir os custos do processo, no entanto a presença de N₂ como inerte interfere na capacidade calorífica do produto final, fazendo com que seja necessária sua remoção da corrente de saída (AL-SALEM *et al.*, 2009). No processo, podem ser gerados HCl, H₂S e HF e, portanto, há etapas de purificação dos gases gerados. A tecnologia de gaseificação mais conhecida e difundida é o processo Texaco, ilustrado na Figura 18.

Figura 18 - Esquema do processo Texaco de gaseificação.



Fonte: Formulação própria a partir de ZERO WASTE EUROPE, 2019.

O processo esquematizado conta primeiro com o craqueamento dos resíduos plásticos em óleo e uma fração de gases condensáveis e não condensáveis (os últimos são utilizados para geração de energia da planta). Em seguida, o óleo e os gases condensados são injetados no gaseificador, cuja temperatura de operação é de 1.200 °C a 1.500 °C, e são gerados no processo CO, H₂, CH₄, CO₂, NH₃, H₂S, NO_x e alcatrão. Finalmente, a corrente segue para os processos de purificação, e o gás de síntese é recuperado. Os processos de purificação correspondem à maior parte dos custos de produção do gás de síntese (ZERO WASTE EUROPE, 2019).

A gaseificação é aplicada em pela empresa canadense Enerkem, para produção de combustíveis (etanol e metanol) a partir de RSU; na Europa, um consórcio composto pelas empresas Air Liquide, Enerkem, Nouryon, Shell e o porto da cidade holandesa de Roterdã, visa construir a primeira planta europeia de geração de petroquímicos a partir de RSUs plásticos, com capacidade estimada de conversão de 360.000 toneladas de RSU em 220.000 toneladas de metanol, futuramente destinado à produção dos petroquímicos (ZERO WASTE EUROPE, 2019).

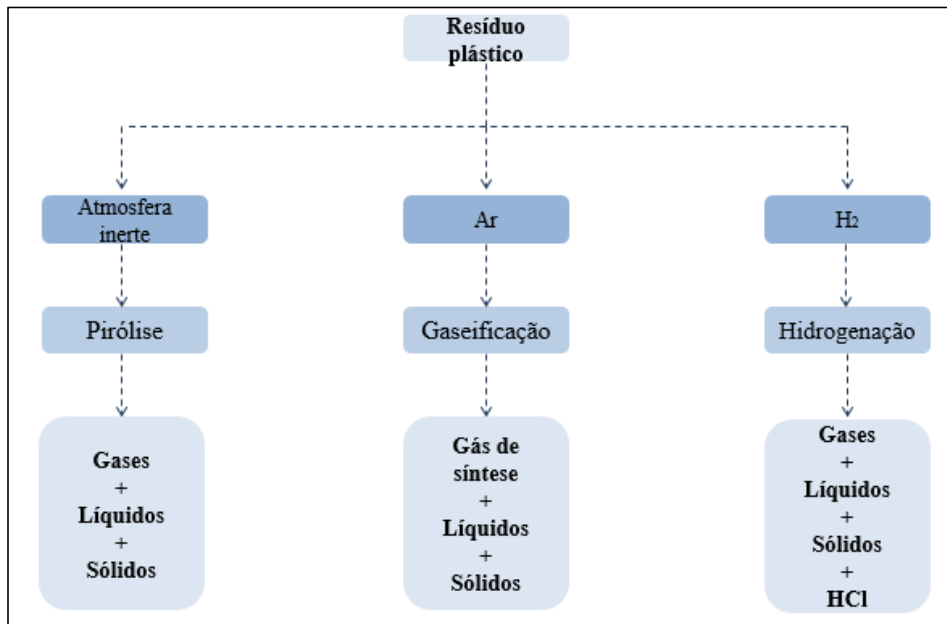
Os desafios que as plantas de gaseificação enfrentam são bastante similares aos das plantas de pirólise: alta demanda energética, requerimento de altos volumes de entrada e estabilidade em termos de composição e qualidade da alimentação do processo. Para a gaseificação, geralmente se faz necessário um pré-tratamento dos resíduos, para reduzir a umidade e aumentar sua capacidade calorífica, o que acaba por aumentar os custos (ZERO WASTE EUROPE, 2019).

Finalmente, a terceira alternativa é a hidrogenação. Através desta tecnologia, os polímeros plásticos são quebrados pela ação de hidrogênio, novamente sob condições de altas temperaturas, produzindo também gases e resíduos sólidos de alto conteúdo de carbono.

Os resíduos plásticos são primeiro submetidos a um processo de despolimerização e descloretização, este último aplicado para misturas com elevada presença de PVC. Em seguida, o material segue para o tratamento com H₂. O cloreto residual é eliminado do sistema através da água gerada na reação (AL-SALEM *et al.*, 2009).

A Figura 19 ilustra, de forma esquematizada, os processos de reciclagem química apresentados nesta seção.

Figura 19 - Esquema dos processos de reciclagem química.



Fonte: Elaboração própria com os dados de BRASKEM, 2019.

Como a reciclagem química ainda está em fase inicial de aplicação industrial, ainda não há reconhecimento em legislações, regulamentos e normas técnicas amplamente difundidos e estabelecidos (PLASTICS RECLYCLERS EUROPE, 2019). Entretanto, o mercado de reciclados de plásticos reconhece esse tipo de reciclagem como sendo uma grande oportunidade, à medida que gera produtos de alta qualidade, com valor agregado e de ampla aplicação industrial (BASF, 2019).

III.2.3 – Reciclagem Mecânica e Reciclagem Química: Resumo Comparativo

Com base nos dados expostos nas seções III.1 e III.2, pode-se montar a Tabela 9, com os dados comparativos entre os processos de reciclagem mecânica e química.

Tabela 9 - Comparativo entre reciclagem mecânica e química.

Reciclagem mecânica	Reciclagem química
Processo amplamente difundido no mundo.	Processo com início recente de implantação em escala industrial.
Obtenção de resina plástica reciclada.	Obtenção de misturas de hidrocarbonetos que podem ser aplicadas para produção de petroquímicos ou como combustíveis. Atualmente, prevalece a segunda aplicação.
Baixa demanda energética.	Alta demanda energética.
Separação e triagem como pontos críticos do processo. Contaminantes e resinas diferentes comprometem a qualidade do produto final.	Possibilidade de processamento de várias resinas plásticas simultaneamente.
Não há emissões tóxicas.	Possibilidade de emissões de substâncias tóxicas à saúde humana.

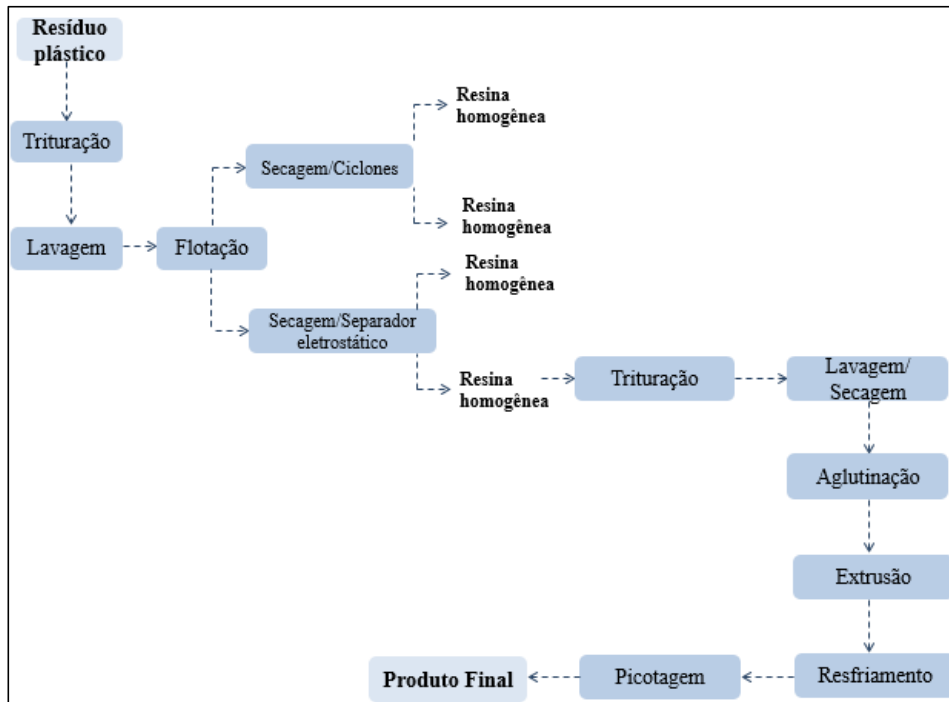
Fonte: Elaboração própria.

Comparando os dois macroprocessos apresentados, a reciclagem mecânica apresenta como vantagem o menor gasto energético em relação à química, dada a elevada temperatura requerida para os processos de craqueamento térmico, e a simplicidade em geral que o processo mecânico apresenta. O processamento químico, por outro lado, gera produtos com maior valor agregado, e traz como vantagem a capacidade de processamento de diferentes resinas ao mesmo tempo, excluindo a limitação mecânica da separação das resinas (HOPEWELL *et al.*, 2009).

A reciclagem química é um processo de aplicação industrial recente, portanto não é uma tecnologia amadurecida e acessível a todo o mundo, e ainda se encontra em fase de aprimoramentos do processo (especialmente em relação à gestão dos efluentes e emissões e ao consumo energético). Com isso, o processo escolhido para o presente estudo de viabilidade é o processo mecânico, já bastante consolidado como modelo de produção, com baixas emissões e efluentes gerados, e com produto final que pode ser reincorporado à

cadeia dos plásticos. A Figura 20 esquematiza o processo de reciclagem mecânica de RSU plásticos.

Figura 20 - Esquema completo do processo de reciclagem mecânica de plásticos.



Fonte: Elaboração própria.

III.3 – Projetos de Reciclagem de RSUs Plásticos

III.3.1 – Caso Modelo: Reino Unido

Na União Europeia, os países que lideram o ranking de reciclagem de plásticos são: Noruega, Suécia e Alemanha, com percentuais de 41%, 43% e 38,6%, respectivamente, de resíduos plásticos reciclados. Esses altos índices são impulsionados, entre outros fatores, por ações governamentais para estimular a triagem dos resíduos diretamente na fonte, educando a população a em relação ao manejo adequado de seus resíduos, e responsabilizando empresas pela gestão pós-consumo (PLASTICS EUROPE, 2018).

O Reino Unido é uma das nações que vem buscando, nos últimos anos, a melhoria dos seus índices de reciclagem e recuperação de resíduos plásticos pós-consumo: o índice médio de reciclagem para os quatro países que compõem o bloco (Irlanda do Norte, Inglaterra, País de Gales e Escócia) aumentou de 11% em 2000 para 45,7% em 2017,

[JP2] Comentário: Porque o reino unido é o modelo?

sendo o País de Gales o que apresenta melhor desempenho no setor de reciclagem, com índice atual próximo a 60% (ENVIRONMENTAL AGENCY, 2019; REINO UNIDO, 2019). A meta desejada para o ano de 2030 é que o índice de reciclagem médio chegue a 75%. Para os RSUs plásticos, o índice de reciclagem para o ano de 2017 foi de 46,2% - equivalentes a 1,04 milhões toneladas – superando a meta da União Europeia de 22,5% (REINO UNIDO, 2019).

Ainda, o país está adotando medidas governamentais para impulsionar a melhoria no sistema de gestão de resíduos pós-consumo: segundo a Nova Estratégia de Gerenciamento de Recursos e Resíduos (*New Resources and Waste Strategy*, no original) do governo britânico, será de responsabilidade das indústrias manufatureiras os custos da reciclagem e disposição final dos resíduos plásticos gerados durante a produção. Essa medida visa à inibição de geração indevida de resíduos, e à otimização dos recursos utilizados durante os processos. Ainda segundo o órgão do governo britânico, os próximos passos do programa são a simplificação do sistema de reciclagem e a facilitação da triagem na fonte dos diferentes tipos de resinas plásticas (ENVIRONMENT AGENCY, 2019).

Por conta da disponibilidade de referências e de dados acerca de projetos e estudos sobre reciclagem de plástico no país, o Reino Unido será adotado como modelo de referência para esse estudo, na busca por projetos de reciclagem de RSUs plásticos a serem implantados no estado do Rio de Janeiro.

Uma das ações do programa que já foi posta em prática é a instalação de compartimentos especiais destinados apenas a resíduos recicláveis, que são recolhidos por meio de um sistema de coleta exclusivo que, dependendo da localidade, pode ser semanal ou quinzenal (REINO UNIDO, 2019a). É válido ressaltar, também, que a legislação britânica prevê que as empresas de coleta e transporte de resíduos devem coletá-los de modo separado, para que possam ser destinados a seus respectivos processos de recuperação e reciclagem. Essa questão é passível de audição pelos órgãos ambientais (REINO UNIDO, 2014).

Em todos os países que compõem o Reino Unido, também há a possibilidade de os cidadãos levarem seus resíduos recicláveis direto para as centrais de triagem, de onde os materiais serão encaminhados para a reciclagem (REINO UNIDO, 2019b). É essencial a triagem eficiente dos RSUs, a fim de direcionar cada tipo de material para seu processo específico, e evitar o comprometimento da qualidade do produto final por conta de contaminações na alimentação do processo (RAGAERT *et al.*, 2017). Nas seções III.3.1.1

e III.3.1.2, serão apresentados dois casos-modelo do Reino Unido em termos de reciclagem de plásticos, utilizados como referências para o presente estudo.

III.3.1.1 – Estudo WRAP

Em 2009, foi realizado um estudo pelo WRAP – Waste and Resources Action Program (REINO UNIDO), a fim de analisar a viabilidade econômica de uma unidade de recuperação de materiais plásticos para reciclagem no Reino Unido. Para análise, foi considerado como modelo um processo capaz de processar 80.000 t/ano de RSUs plásticos, que seriam previamente segregados dos demais RSUs em estações de triagem. A unidade de reciclagem contaria com triagem semi-automática das resinas plásticas (com uma etapa de separação manual, e a segunda etapa por infravermelho); seção de moagem e lavagem de todos os materiais plásticos; seção de extrusão a vácuo para os plásticos rígidos; e seção de aglomeração e extrusão para os plásticos filme.

O estudo britânico obteve como resultado que o projeto de usina de reciclagem de RSUs plásticos, com capacidade instalada de processamento de 80.000 t/ano, é viável economicamente, com valor presente líquido (VPL) de 14 milhões de libras, e taxa interna de retorno (TIR) de 27%.

III.3.1.2 – Complexo de Aproveitamento de RSUs – Viridor

Seguindo a forte tendência governamental de incentivo à reciclagem, foi anunciado para 2020 o início da operação da maior usina de reciclagem de plástico do Reino Unido. A empresa Viridor, já atuante no ramo de reciclagem de diversos tipos de RSU, realizou um investimento total de 65 milhões de libras esterlinas para a nova planta de reciclagem, que será capaz de processar cargas com misturas de diferentes resinas plásticas, com capacidade instalada de 80.000 t/ano. A eficiência do processo para esse novo projeto é de 75 %, gerando 60.000 toneladas anuais de plásticos reciclados a partir de RSU (VIRIDOR, 2019). Essa nova usina britânica de reciclagem de plásticos pós-consumo estará inserida em um macro complexo de gestão de RSU, que também conta com uma usina de triagem

de resíduos, uma unidade de geração de energia a partir de resíduos domiciliares (“waste-to-energy”, WTE), e uma estação de tratamento de efluentes dos processos do complexo.

A unidade de geração energética representa um investimento de 252 milhões de libras esterlinas e será responsável pelo processamento dos resíduos que não estiverem aptos a serem submetidos à reciclagem, com capacidade de processamento de 320.000 toneladas de resíduos por ano, gerando energia suficiente para o abastecimento de 44.000 residências, e garantindo o fornecimento energético para a unidade de reciclagem (VIRIDOR, 2019). Já a estação de tratamento de efluentes atenderá às demais unidades do complexo, e tem investimento estimado em 2 milhões de libras.

III.3.1.3 – Comparativo entre Referências

As duas referências apresentada nas Seções III.3.1.1 e III.3.1.2 apresentam semelhanças e diferenças entre si, que serão nesta seção discutidas, a fim de se estabelecer quais os valores-base para o estudo no Brasil.

Como ponto de semelhança, ambos os projetos visam à recuperação de resíduos plásticos pós-consumo através da reciclagem mecânica dos resíduos, e comportam o processamento de tipos variados de resinas plásticas, segregadas nas etapas iniciais da operação. Ainda, ambos consideram uma capacidade instalada de processamento 80.000 t/ano de resíduos.

Como diferença, o primeiro aspecto observado é a magnitude dos projetos descritos. O estudo econômico promovido por WRAP (2009) abrangia apenas a reciclagem dos plásticos em si, englobando desde a segregação das resinas até a extrusão do plástico reciclado. Esse projeto considera que a matéria-prima será segregada dos demais resíduos urbanos em estações de triagem fora da planta de reciclagem, fazendo com que a unidade de reciclagem receba apenas RSUs plásticos. O projeto da empresa Viridor (2019), por outro lado, se trata de um complexo de gerenciamento de resíduos, abrangendo desde a triagem dos RSUs oriundos da coleta urbana até os processos, em separado, de reciclagem de plásticos e de geração de energia, contando também com uma unidade de tratamento de resíduos e efluentes dos dois processos. O escopo e investimento do segundo projeto é substancialmente maior, bem como sua complexidade e abrangência.

Em termos de dados para comparação, o estudo de WRAP (2009) fornece o Fluxo de Caixa completo para seu projeto modelo, identificando todas as parcelas de despesas, como o consumo de utilidades e o número de funcionários considerado, e todas as fontes de receita, em uma estrutura que torna possível a sua análise para o cenário brasileiro. Já o complexo de gerenciamento de resíduos da Viridor (2019) não teve seus custos nem estimativas de receita divulgadas; apenas os valores dos investimentos das unidades do complexo.

III.3.2 – Caso Nacional: O Estado do Rio de Janeiro

No Brasil, consonante ao cenário de metas ambientais e de compromisso com a sustentabilidade estabelecido a nível federal com a instituição da PNRS, o estado do Rio de Janeiro estabeleceu o seu Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS/RJ). Esse documento estabelece metas e orientações à gestão pública dos municípios do estado visando à melhoria nos sistemas de gestão de resíduos e na estrutura voltada à reciclagem e recuperação de RSU. O PERS prevê, ainda, cooperação intermunicipal para o gerenciamento de RSU, com a formação de consórcios intermunicipais para facilitar a viabilidade técnica de destinações mais adequadas para os RSUs (SEA, 2013).

Anterior à medida, o estado já apresentava projetos voltados para a gestão dos RSUs: RIO+LIMPO, voltado para a questão do saneamento, e LIXÃO ZERO, visando à disposição adequada dos resíduos pós-consumo (SEA, 2013).

A nível municipal, tomando como exemplo a maior cidade do estado do Rio de Janeiro, a Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro desenvolveu algumas ações em prol da melhoria de gestão de resíduos sólidos, tais como a isenção de IPTU para empresas voltadas para a reciclagem de resíduos; o Programa Lixo Zero, realizado pela COMLURB em parceria com a Guarda Municipal, que visa aplicação de multa para indivíduos que descartarem seus resíduos de maneira inapropriada; e programas de incentivo à reciclagem com parcerias públicas e privadas. Dentre esses, pode-se destacar o Light Recicla, programa que consiste em promover abatimentos na conta de luz em troca de materiais recicláveis. Há 11 “ecopontos” na cidade, onde os cidadãos podem se cadastrar no programa e levar seus resíduos recicláveis (contemplando plásticos, papéis, metais, vidro e

óleo vegetal utilizado). De 2011 a dezembro de 2015 foram recebidas 6 toneladas de resíduos recicláveis, sendo 43% resíduos plásticos (PMGIRS- RJ, 2016).

Capítulo IV – Unidade de Reciclagem de Plásticos no Rio de Janeiro:

EVTE

Conforme discorrido no Capítulo 3, o estado do Rio de Janeiro apresenta grande potencial e oportunidades em relação a melhorias no gerenciamento municipal de resíduos sólidos. A seguir, será realizado um EVTE sobre a instalação de uma usina de reciclagem de resíduos plásticos no Rio de Janeiro como alternativa para uma melhor gestão de resíduos na cidade.

Como o presente estudo visa uma alternativa de melhoria à destinação dos RSUs plásticos nacionais, será utilizado o estudo de WRAP (2009), apresentado na Seção III.3.1.1, por ser um projeto mais simples, de menor investimento e complexidade operacional, a ser considerado como um primeiro passo para o país em direção à uma gestão de resíduos mais sustentável. Corroborando essa escolha, os dados fornecidos por WRAP (2009) terão grande importância para a construção do cenário nacional, permitindo que a análise seja feita a partir de valores de mercado, e não somente com base em estimativas, o que ocorreria caso o complexo de reciclagem da Viridor fosse tomado como modelo.

A

Figura 21 ilustra o fluxograma do processo em questão, conforme descrito por WRAP (2009). O projeto considera que os RSUs plásticos são obtidos de usinas de triagem de resíduos, e que a planta realiza apenas a segregação das resinas plásticas entre si. Ainda, os RSUs de plástico filme passam pela extrusão separados dos RSUs de plástico rígido.

Em relação à capacidade instalada, será considerada a mesma do projeto modelo, de 80.000 toneladas anuais de resíduos plásticos. A taxa de ocupação varia de acordo com o tempo de vida do projeto, e será discutida a partir do estudo de demanda, na Seção IV.1. O

horizonte de planejamento considerado no estudo modelo é de 10 anos, sendo 2 anos de construção da planta e 8 anos de operação.

Figura 21 - Fluxograma modelo do projeto de usina de reciclagem de RSU plásticos.



Fonte: Formulação própria a partir de WRAP (2009).

O EVTE consiste no levantamento de diversos aspectos inerentes a um projeto a ser implementado, com o objetivo de atestar se tal projeto é viável do ponto de vista técnico e econômico. Cabe aqui notar que projetos de investimentos cujos ganhos além daqueles obtidos pela receita da venda de bens e serviço apresentam ganhos sociais e/ou ambientais precisam ser avaliados sob esta ótica também.

No presente trabalho, os aspectos avaliados pelo EVTE serão:

- a) estudo e projeção da demanda;
- b) estudo e projeção dos preços;
- c) estudos dos investimentos;
- d) estudo dos custos de produção;
- e) elaboração do Fluxo de Caixa e avaliação dos indicadores.

IV.1 – Estudo e Projeção da Demanda

O primeiro aspecto a ser avaliado será a previsão da quantidade de resíduos plásticos gerados no município do Rio de Janeiro. Para essa análise, será verificada a curva de tendência ao longo de um horizonte de 10 anos, definido a partir de padrões encontrados na indústria química.

O estudo da previsão de demanda – que, nesse caso, se traduz na quantidade de RSUs plásticos gerados - pode ser realizado através de métodos qualitativos ou quantitativos. Os primeiros baseiam-se na opinião e vivências de um grupo de especialistas no assunto, que são consultados para dar seu parecer em relação ao futuro do mercado em questão. Ainda que sejam bastante utilizados em estudo de previsão de demanda, os métodos qualitativos apresentam vieses e podem ser tendenciosos segundo a opinião dos profissionais consultados. Os segundos, por sua vez, são pautados na análise de dados históricos de demanda, e podem ser introduzidas variáveis que representem o contexto econômico do período para uma análise mais assertiva. Esses métodos podem ser classificados em séries temporais e métodos causais (LEMOS, 2006). No presente trabalho, a demanda da produção de plástico reciclável será projetada com base em métodos quantitativos.

Os métodos de séries temporais fazem uso do histórico de demanda do produto para realizar previsões da demanda futura, assumindo constância nos padrões desses dados e extrapolando tendências para o tempo futuro. Já os métodos causais analisam a demanda correlacionando sua dependência ao histórico de outra variável econômica independente, como o PIB, variável amplamente utilizada nesses estudos. Esses métodos assumem que as relações causais históricas entre a demanda do produto específico e a variável econômica selecionada se manterão no futuro (LEMOS, 2006).

Foram utilizados como base de geração de plásticos recicláveis os dados divulgados pela SEA, em 2013, expostos na Seção III.4., e os dados de crescimento populacional entre 2000 e 2012, divulgados pela SEFAZ (2019). Os valores-base para o projeto estão ilustrados na Tabela 10:

Tabela 10 - Dados base para a projeção de geração de RSUs plásticos no estado do Rio de Janeiro.

Sub-região	População	Geração total de RSU plástico (t/ano)	Geração per capita de RSU plástico (kg/hab.dia)	Variação demográfica anual (2000 – 2010)
-------------------	------------------	--	--	---

Região Metropolitana	11.838.752	1.005.243	0,23	0,89%
Região Centro-Sul Fluminense	272.345	12.176	0,12	0,72%
Região da Costa Verde	243.156	13.070	0,15	4,00%
Região das Baixadas Litorâneas	811.096	41.762	0,14	4,47%
Região do Médio Paraíba	855.643	47.852	0,15	0,90%
Região Noroeste Fluminense	317.476	13.626	0,12	0,66%
Região Norte Fluminense	849.302	46.801	0,15	2,15%
Região Serrana	805.813	40.999	0,14	0,72%

Fonte: Elaboração própria com os dados de SEA, 2013, e SEFAZ, 2019.

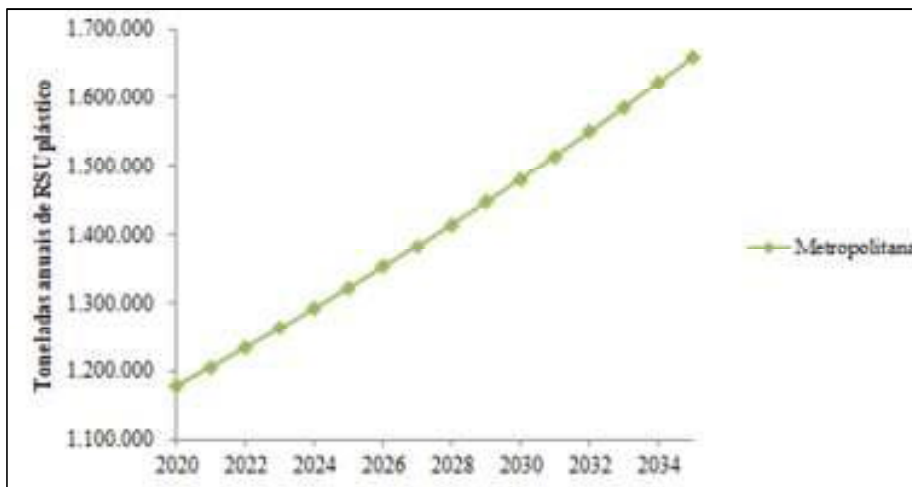
A taxa de crescimento populacional foi utilizada, então, como parâmetro para a taxa de aumento de geração de resíduos total ao longo do horizonte de planejamento do projeto. É válido destacar que a projeção considerou a taxa de crescimento constante ao longo do período de estudo – ou seja, a população do estado apresentaria apenas crescimento até o ano de 2035.

Outra premissa adotada para essa projeção foi de que a geração *per capita* de RSU teria crescimento de 1,4% ao ano, dado obtido a partir da série histórica de geração de resíduos do município do Rio de Janeiro, entre 1996 e 2009 (COMLURB, 2019), e estendido para as demais regiões do estado, dado que não havia dados disponíveis da evolução de RSU *per capita* para as demais regiões.

O resultado final da geração total de RSUs plásticos foi então obtido a partir da atualização da geração *per capita* diária de RSUs plásticos, multiplicada pela população atualizada conforme as taxas de crescimento populacional de cada sub-região do estado.

A projeção da geração de RSU plásticos, para todas as sub-regiões do estado do Rio de Janeiro, está ilustrada nas Figura 22 e Figura 23. A Projeção para a Região Metropolitana foi realizada em um gráfico separado pois está em uma ordem de grandeza muito acima das demais regiões, distorcendo a escala do gráfico.

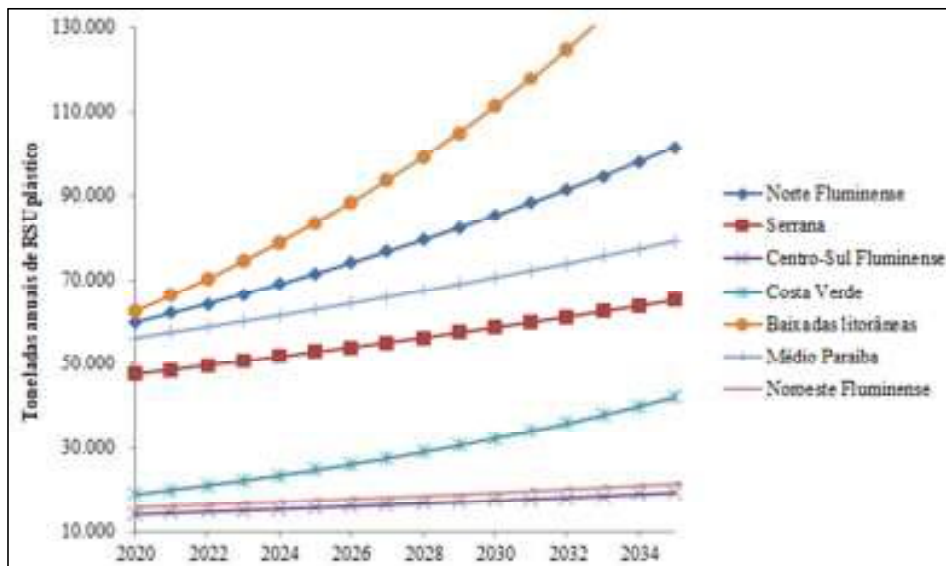
Figura 22 - Projeção da geração de resíduos plásticos na região Metropolitana do estado do Rio de Janeiro.



Fonte: Formulação própria com base em dados de SEA (2013) e SEFAZ (2019).

A região Metropolitana apresenta uma altíssima geração de resíduos plásticos, muito acima da capacidade de processamento da planta de referência, que comporta 80.000 toneladas anuais de RSU plástico. Sendo assim, essa região não será elegível para a implantação do presente projeto.

Figura 23 - Projeção da geração de resíduos plásticos nas demais sub-regiões do estado do Rio de Janeiro.



Fonte: Formulação própria com base em dados de SEA (2013) e SEFAZ (2019).

As curvas de geração de resíduos plásticos das regiões das Baixadas Litorâneas e Norte Fluminense apresentam crescimento acelerado, ultrapassando ou chegando bastante

próximo à marca de 80.000 t/ano dentro do horizonte de estudo do projeto em questão – o que torna a capacidade sugerida da usina insuficiente para atender a essas localidades. Por outro lado, as regiões da Costa Verde, do Centro-Sul Fluminense, e do Noroeste Fluminense apresentam a geração de resíduos consideravelmente abaixo da capacidade instalada, o que poderia inviabilizar o projeto caso ele fosse instalado nessas regiões.

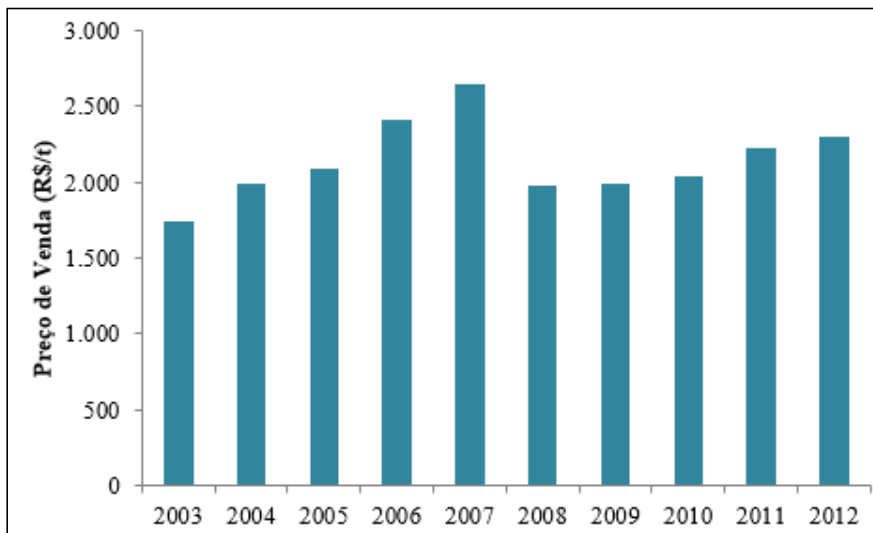
Finalmente, as regiões do Médio Paraíba e Serrana são as que apresentam as demandas mais compatíveis com a faixa de capacidade do projeto de referência. A primeira apresenta valores maiores de geração de resíduos plásticos, representando uma taxa de ocupação de 70,1% no primeiro ano de operação até 98,84% no último ano do projeto - caso toda a quantidade de resíduos plásticos fosse processada pela unidade em estudo. Levando em consideração a oportunidade de ganho de escala para uma produção maior, essa região foi a escolhida para o estudo de implementação do projeto.

IV.2 – Estudo e Projeção do Preço de Venda

O próximo parâmetro a ser avaliado no estudo de implantação de uma usina de reciclagem de plásticos no Rio de Janeiro é a estimativa do preço no horizonte de planejamento do projeto. Esse indicador contempla as estimativas futuras de disponibilidade do produto no mercado selecionado, considerando a participação da concorrência, e o preço de venda esperado para o produto.

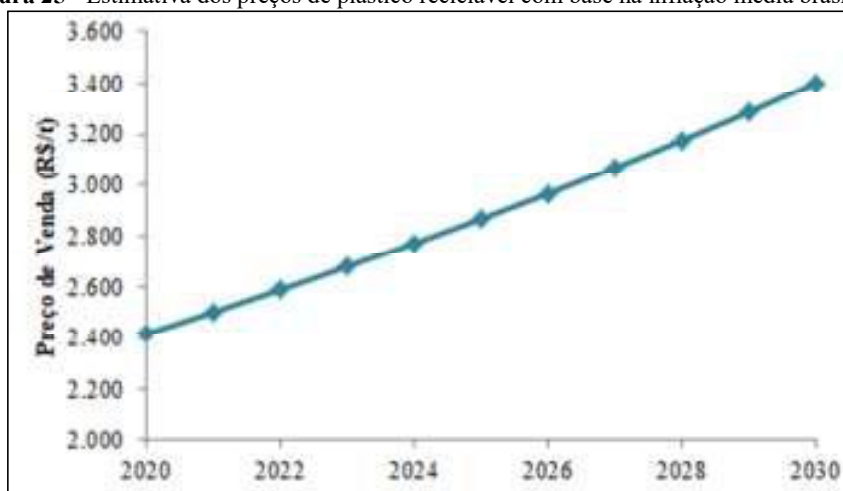
A série histórica apresentada na Figura 24 traz dados de preço médio de venda de resinas plásticas recicladas (PLASTIVIDA, 2013). Para realização da projeção do preço ao longo do horizonte de planejamento do projeto, a variação anual do preço de venda foi comparada à variação da inflação anual da inflação no período considerado, de 6,37%. O valor médio da variação do preço de plástico reciclado em relação à inflação foi de 3,48% ao ano. Essa média foi, então, aplicada à inflação média brasileira dos últimos 19 anos, 6,34% (INFLATION,EU, 2019), e, portanto, a taxa de variação anual de preço obtida para a projeção foi de 3,46% ao ano. A série história está apresentada na Figura 24, enquanto que os resultados da projeção estão ilustrados na Figura 25.

Figura 24 - Dados históricos do preço de venda de resinas plásticas recicladas.



Fonte: ABIPLAST, 2013.

Figura 25 - Estimativa dos preços de plástico reciclável com base na inflação média brasileira.



Fonte: Elaboração própria com dados de ABIPLAST (2018) e INFLATION.EU (2019).

IV.3 – Estudo dos Investimentos

Em análises preliminares de projetos, o estudo dos investimentos é necessário para entender a ordem de grandeza do capital que deverá ser disponibilizado para o início do projeto.

O Investimento Total (IT) é composto pelo Capital de Giro (CG), parcela dedicada a garantir o início das operações e seu bom funcionamento, e pelo Investimento Fixo (IF), que corresponde aos gastos com os recursos necessários para implementar o projeto, como equipamentos, edificações, terreno. Este, último, por sua vez, pode ser subdividido em ISBL (Inside Battery Limits), que corresponde ao investimento da estrutura de produção; e OSBL (Outside Battery Limits), relativo ao investimento em itens que se relacionam com o processo, mas ficam fora dos limites da unidade de produção, como edificações auxiliares, estações de tratamento. (MANTOVANI, 2006).

Para a avaliação do investimento, uma parcela importante a ser considerada é o custo dos equipamentos. Na usina em questão, a relação de equipamentos utilizados está ilustrada na Tabela 11.

Tabela 11 - Equipamentos necessários para o processo de reciclagem de RSUs plásticos.

Equipamento	Unidades
Moinho	3
Tanque de flotação	1
Esteiras	10
Aglutinadora	1
Extrusora	1
Tambor rotativo para secagem	1
Ciclone	1

*Nota: os equipamentos referentes ao tratamento de efluentes não estão incluídos na listagem.
Fonte: Formulação própria.

Para o presente estudo, o valor do investimento total utilizado será o valor nacionalizado para o investimento na planta de reciclagem de plástico considerada no estudo de WRAP (2009). No estudo modelo, o Investimento Total do projeto é de £29.495.000,00.

A partir das correlações fornecidas por Perlingeiro (2012), é possível calcular, a partir do Investimento Total, o Capital de Giro (CG) e o Investimento Fixo da planta, segundo as Equações 1 a 3. Vale notar que as correlações apresentam erros, que inserem parcelas de incerteza nos valores finais obtidos.

$$I_{TOTAL} = 2,2 \times ISBL \quad 1$$

$$ISBL = \text{£}13.406.818,18$$

$$I_{FIXO} = 1,91 \times ISBL \quad 2$$

$$I_{FIXO} = \text{£}25.607.022,73$$

$$I_{TOTAL} = I_{FIXO} + CG \quad 3$$

$$CG = \text{£}3.887.977,27$$

A etapa final corresponde à nacionalização do projeto, visto que o investimento referencial foi calculado para outro país. A nacionalização é realizada por meio da aplicação do fator de nacionalização no valor do Investimento Fixo, que pode ir de 0,5 até 1,5. O fator de nacionalização utilizado foi de 1,15, com cotação da libra esterlina em R\$5,29, (BRASIL, 2019). Os valores estimados para o investimento na usina de reciclagem de plástico, já nacionalizados, encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 - Síntese do investimento necessário para o projeto de usina de reciclagem de resíduos plásticos no estado do Rio de Janeiro.

Tipo de Investimento	Valor em R\$
IF	155.780.322,76
CG	23.652.509,74
IT	179.432.832,50

Fonte: Formulação própria.

IV.4 – Estudo dos Custos de Operação

O estudo de WRAP (2009) contemplava os custos de produção relativos à operação da planta de reciclagem na Inglaterra, seu local de origem. Nesta Seção, será realizada a estimativa dos custos de operação adaptados ao cenário brasileiro, a partir de correlações disponíveis na literatura, a fim de tornar a nacionalização do projeto mais próxima da realidade do Brasil.

De acordo com Turton (2008), a estimativa dos custos pode ser realizada categorizando as parcelas de gastos de operação em três grupos: custos diretos, custos fixos e despesas gerais. Suas especificações e detalhamentos se encontram na Tabela 13.

Tabela 13 - Detalhamento dos tipos de custo de operação relacionados a um processo químico.

Fator	Descrição
1. Custos diretos	Fatores que variam com a produção
Matérias-primas	Custos de todas as matérias-primas envolvidas no processo.
Utilidades	Custos de todas as utilidades necessárias para o processo.
Tratamento de resíduos	Custos relacionados ao tratamento de efluentes gerados no processo.
Supervisão e administrativo	Custo da mão-de-obra de pessoal administrativo, engenheiros e equipe de apoio.
Manutenção e reparos	Custos de mão-de-obra e material relacionados à manutenção.
Suprimentos operacionais	Custos de todos os demais suprimentos, à exceção das matérias-primas, que fazem parte do processo, suportando a operação.
Laboratórios	Custos voltados à manutenção dos laboratórios.
Patentes e royalties	Custos envolvidos no uso de patentes/tecnologia protegida.
2. Custos Fixos	Fatores que não variam com o nível de produção
Mão-de-obra	Custo da mão-de-obra necessária para a operação.
Depreciação	Custo associado à depreciação do terreno. Fator utilizado para cálculo do imposto cobrado sobre o projeto.
Taxas e seguro	Custos relacionados aos impostos e taxas de seguradoras locais.
Despesas da planta	Custos e despesas associados às unidades auxiliares de processamento.
3. Despesas Gerais	Custos relacionados às atividades administrativas, não ligados diretamente à produção
Administração	Custos envolvendo salários, infraestrutura e outros fatores ligados à administração da planta.
Distribuição e vendas	Custos relacionados a vendas e marketing.
P&D	Custos relacionados às pesquisas e ao desenvolvimento de novas tecnologias.

Fonte: Formulação própria a partir de Turton (2008).

A partir dos vários custos discriminados na Tabela 13, é possível calcular o custo de operação de um processo a por meio da Equação 4:

$$C_{Op} = C_D + C_F + DG \quad 4$$

Em que C_{Op} é o custo de operação (US\$/ano); C_D são os custos diretos; C_F , os custos fixos; e DG as despesas gerais da planta.

Turton (2008) apresenta diversas correlações que enquadram os custos detalhados na Tabela 13 em blocos, resultando na Equação 5, uma correlação geral para o custo de operação:

$$C_{Op} = 0,280 \times IF + 2,13 \times C_{MDO} + 1,23 \times (C_{MP} + C_{Ut} + C_{TE}) \quad 5$$

Em que IF é o valor do Investimento Fixo (já calculado na Seção IV.3), CMDO é o custo com mão-de-obra, CMP é o custo com matéria-prima, CUt é o custo com utilidades e CTE é o custo com o tratamento de efluentes.

IV.4.1 – Estimativa do Custo de Mão-de-Obra (CMDO)

Para estimar os custos anuais com mão-de-obra, foi utilizado como base a referência de WRAP (2009): 87 funcionários, contemplando operação, manutenção e laboratório.

No Brasil, o salário mínimo para o ano de 2019 é de R\$ 1.058,21 mensais (BRASIL, 2019). Multiplicando pelo número de funcionários estimado para o projeto, e considerando ainda 13º salário e 30 dias de férias, o custo anual com mão-de-obra para o presente projeto é de R\$ 15.344,07 por operador. Seider (2009) indica, ainda, a inclusão de 15% do valor de custo anual para contabilização de benefícios adicionais, e outros 6% correspondentes a suprimentos e serviços para os operários. Portanto, o custo anual total de mão-de-obra operária para o presente projeto seria de R\$ 1.615.270,51 para o ano de 2019.

Para realizar a projeção dos custos de mão-de-obra para o horizonte de planejamento do projeto, foi considerado que o salário mínimo brasileiro teria uma taxa de crescimento anual compatível à inflação média dos últimos 20 anos, 6,34% (INFLATION.EU, 2019). Os valores encontrados estão na Tabela 21 do Anexo A.

É importante notar que, para o estudo de referência, foram considerados apenas cargos de operários para os funcionários da unidade de reciclagem de plásticos. No presente estudo, essa premissa foi replicada. Esse critério impacta na subestimação dos custos finais de operação, já que o quadro de funcionários de uma unidade real conta com uma hierarquia de profissionais, que abrange cargos com remuneração bastante superior ao salário mínimo considerado para os cálculos.

[JP3] Comentário: Não considerou outros salários, para engenheiros por exemplo?

IV.4.2 – Estimativa do Custo de Matéria-Prima

De acordo com CEMPRE (2019), o preço médio de venda de RSU plástico para reciclagem no Rio de Janeiro é de R\$1.300/t para o ano de 2019. A partir deste valor, e utilizando uma taxa anual de 3,46% de aumento, a partir da análise feita para o preço de venda de reciclados plásticos, na Seção IV.2, foi realizada a projeção para o custo da matéria-prima durante a vida útil operacional do projeto. Os valores podem ser verificados na Tabela 22 do Anexo A.

IV.4.3 – Estimativa do Custo de Utilidades

Os gastos com utilidades, energia e água, serão estimados com base no consumo desses recursos levantado por WRAP (2009). Os valores de consumo anual para essas utilidades são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Consumo de utilidades para o processo.

Utilidade	Consumo anual	Unidade
Água	176.000	m ³
Energia	54.826.667	kWh

Fonte: Formulação própria com base em WRAP, 2009.

A partir dos dados fornecidos pela CEDAE (2019), companhia responsável pelo abastecimento de água do Rio de Janeiro, e pela Firjan (2017), em estudo que consolida as tarifas energéticas industriais para o Brasil, os custos considerados para as utilidades para o estado do Rio de Janeiro estão compilados na Tabela 15:

Tabela 15 - Custos de utilidades para o estado do Rio de Janeiro.

Utilidade	Custo unitário
Água	R\$22,77 + R\$5,7 por m ³
Energia	R\$659,02/MWh

Fonte: Formulação própria com base em CEDAE (2019) e Firjan (2017).

Dessa forma, é possível estimar os custos anuais com utilidades para o projeto em estudo para o ano de 2019, destacado na Tabela 16:

Tabela 16 - Custo anual com utilidades estimado para o projeto em estudo.

Utilidade	Custo anual (R\$)
Água	1.003.222
Energia	36.131.870
Total	37.135.092

Fonte: Formulação própria.

Para a evolução dos custos de utilidades, também foi empregada a taxa de referência de 3,46%, calculada na Seção IV.2. Dessa forma, a projeção dos custos de utilidades para o horizonte de planejamento do projeto fica tal como está ilustrado na Tabela 23 do Anexo A.

Como a taxa utilizada para a projeção dos custos de utilidades foi a mesma empregada para as projeções do preço de venda do produto final, não estão sendo levadas em considerações as flutuações específicas dos setores de energia e água, o que representa uma estimativa artificial para o presente estudo, e pode acarretar em projeções subestimadas para os parâmetros de utilidades.

IV.4.4 – Estimativa do Custo de Tratamento de Efluentes

A última parcela para obtenção do custo total de manufatura para a reciclagem de RSUs plásticos é o custo com o tratamento de efluentes. Para o presente processo, o tratamento de efluentes se traduz majoritariamente no tratamento da água utilizada para lavagem e separação das resinas plásticas. Para fins de estimativa, será considerado o processo de tratamento secundário, que envolve filtração e remoção de impurezas com lodo ativado (TURTON, 2008).

Para esse processo, Turton (2008) sugere o custo de US\$43/1000m³ de água tratada. Convertendo para moeda nacional, com cotação do dólar em R\$4,07 (BRASIL, 2019), obtém-se o custo de R\$175,01/1000m³ de efluente como valor de referência.

Considerando o consumo de água calculado na Seção IV.4.3, de 176.000 m³ mensais, e aplicando o custo de tratamento sugerido por Turton, o custo anual para o tratamento de efluentes do processo é de R\$30.800.

A projeção desta parcela de custos foi realizada com base na taxa referência de 3,46% ao ano. Os valores obtidos estão na Tabela 24 do Anexo A.

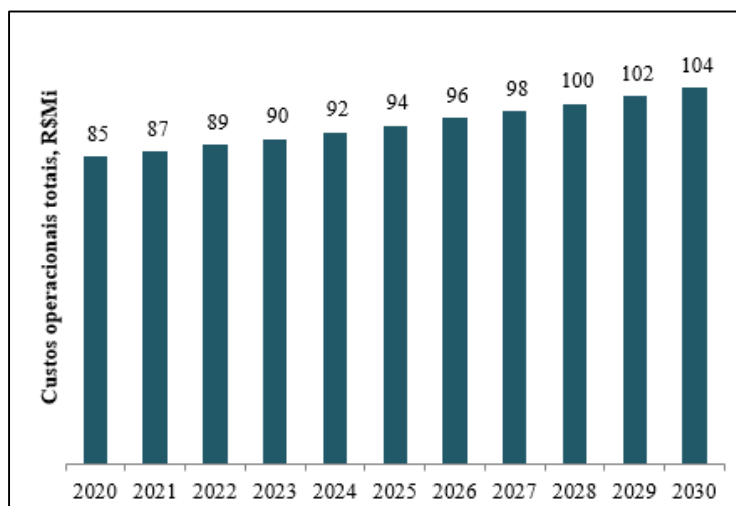
[JP4] Comentário: Não conseguiu a série histórica?

IV.4.5 – Cálculo dos Custos para o Horizonte de Planejamento do Projeto

A partir das parcelas calculadas nas Seções IV.4.1 até IV.4.4, é possível realizar o cálculo dos custos anuais de operação para o projeto em estudo, segundo a equação fornecida por Turton.

Dadas as premissas citadas nas respectivas Seções de cálculo de custos, a evolução dos custos para o presente projeto, calculados a partir da Equação 5 (TURTON, 2008), pode ser visualizada na Figura 26:

Figura 26 - Custos de operação para uma usina de reciclagem de plásticos.



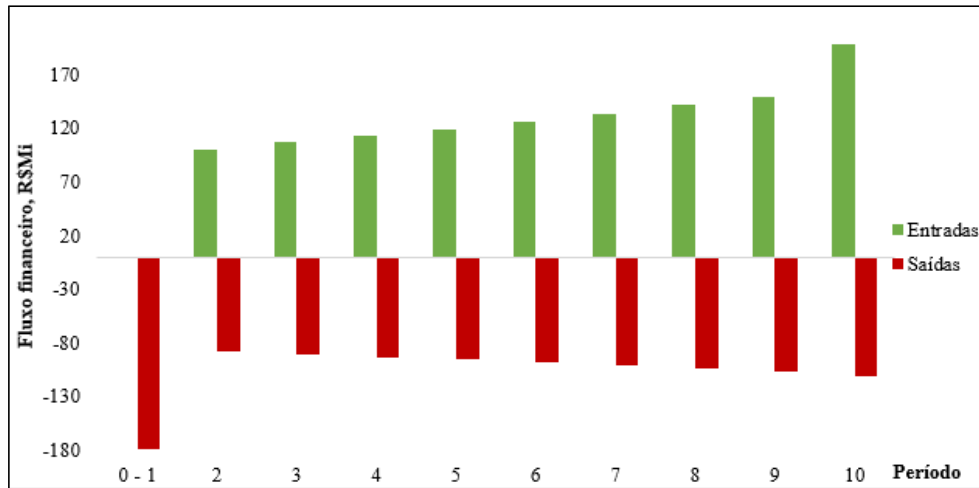
Fonte: Formulação própria.

IV.5 – Fluxo de Caixa e Indicadores de Viabilidade

A partir das projeções calculadas nas Seções de IV.1 a IV.4, é possível montar o Fluxo de Caixa do presente projeto, para o horizonte de planejamento considerado. Para a construção, foi considerado ICMS de 12% (SINFERJ, 2019) e Imposto de Renda de 15% (BRASIL, 2019). O Fluxo de Caixa mostra as despesas e receitas previstas para o

investimento, e constitui uma das etapas da avaliação de viabilidade do projeto, conforme ilustrado na Figura 27:

Figura 27 - Fluxo de Caixa para o projeto de instalação de usina de reciclagem de plásticos no estado do Rio de Janeiro.



Fonte: Formulação própria.

Os indicadores utilizados para analisar a viabilidade econômica do presente projeto serão: Valor Presente Líquido (VPL), que consiste no somatório dos fluxos de caixa do horizonte de planejamento do projeto trazidos para o valor presente (SEIDER, 2009); Taxa Interna de Retorno (TIR), que corresponde à taxa que anula o VPL; e Índice de Lucratividade (IL), que consiste no ganho em valor atual sobre cada unidade monetária investida (TURTON, 2008). Os equacionamentos para os cálculos dos três indicadores de viabilidade são explicitados nas equações 6 e 7, em que i é a taxa mínima de atratividade do projeto (geralmente a taxa de financiamento) e FC_0 é o Fluxo de Caixa do período 0 do projeto.

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} \quad 6$$

$$IL = \frac{\sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j}}{FC_0} \quad 7$$

Os valores encontrados para os indicadores estão na Tabela 17. Para os cálculos, foi utilizada a taxa de 6,15% ao ano, obtida a partir dos valores de referência de financiamento do BNDES para projetos gestão de resíduos sólidos.

Tabela 17 - Indicadores de viabilidade econômica calculados para o projeto de estudo.

VPL	R\$2.581.519,70
TIR	6,43%
IL	R\$0,01

Fonte: Formulação própria.

O valor encontrado para o VPL indica que o projeto é economicamente viável: os valores atuais dos retornos do projeto, calculados nos Fluxos de Caixa, somam uma quantia positiva, indicando que os retornos esperados no horizonte de produção serão capazes de recuperar os investimentos realizados na planta. O IL também sugere a mesma análise, indicando que, para cada real investido no projeto, é previsto um ganho futuro de R\$0,01. Finalmente, a TIR sugere que o capital investido poderá ser recuperado dentro dos moldes estabelecidos para o projeto, a uma taxa de 6,43% ao ano.

IV.6 – Análise do Financiamento

Uma vez estabelecido o valor do investimento, pode-se optar por realizar o projeto por meio de capital próprio ou através do financiamento. Nesta seção serão apresentadas as condições para a realização do financiamento do projeto pelo BNDES, e futuramente essas condições serão aplicadas na elaboração do Fluxo de Caixa financiado.

Em 2009, foi criado o Fundo Clima, programa destinado à aplicação de parcelas do Fundo Nacional em projetos que visem contribuições positivas ao cenário de mudanças climáticas, redução do consumo energético, e demais iniciativas voltadas para a sustentabilidade. O objetivo do Fundo é incentivar e viabilizar a implementação dessas iniciativas (BNDES, 2019).

O programa possui vários subprogramas que abrangem as diferentes frentes de desenvolvimento sustentável, como Mobilidade Urbana, Energias Renováveis, Gestão e Serviços de Carbono, e Resíduos Sólidos, que seria a categoria em que o projeto de reciclagem de plástico se enquadraria (BNDES, 2019). Atualmente, o programa está suspenso, pois todos os recursos destinados ao Fundo já foram consumidos, mas, para fins de estudo, os parâmetros do programa serão usados como base para o estudo do financiamento do presente projeto.

Para o subprograma de Resíduos Sólidos, o BNDES pode participar com até 80% do valor dos itens financiáveis, sendo o valor máximo de 30 milhões de reais a cada 12 meses,

com prazo de até 15 anos, pelo sistema de prestações constantes (sistema Price). No sistema de apoio direto, em que a solicitação é feita diretamente ao BNDES, a taxa de juros é composta pelas parcelas de custo financeiro, equivalente a 3% ao ano; remuneração do BNDES, de 0,9% ao ano, e taxa de risco de crédito, que neste trabalho será considerada como 2,25%, metade da taxa SELIC do ano de 2019 (BNDES, 2019). Sendo, assim, a taxa de juros do financiamento do presente projeto seria de 6,15% ao ano.

Dessa forma, para o projeto em estudo, será considerado apenas o financiamento de 30 milhões de reais no primeiro ano do projeto, com taxa de juros anual de 6,15%, que será pago ao longo de 15 anos. Para tais parâmetros, a simulação do financiamento do projeto ficaria tal como ilustrada na Tabela 18:

Tabela 18 - Simulação do financiamento do projeto, pelo Programa Fundo Clima do BNDES.

Período	Dívida (R\$)	Prestação (R\$)	Amortização (R\$)	Juro (R\$)
0	30.000.000	-	-	-
1	27.739.945	4.105.055	2.260.055	1.845.000
2	25.340.897	4.105.055	2.399.048	1.706.007
3	22.794.307	4.105.055	2.546.590	1.558.465
4	20.091.102	4.105.055	2.703.205	1.401.850
5	17.221.650	4.105.055	2.869.452	1.235.603
6	14.175.727	4.105.055	3.045.923	1.059.131
7	10.942.479	4.105.055	3.233.248	871.807
8	7.510.387	4.105.055	3.432.092	672.962
9	3.867.221	4.105.055	3.643.166	461.889
10	0	4.105.055	3.867.221	237.834

Fonte: Formulação própria com dados de BNDES (2019).

Considerando os dados da Tabela 18, o Fluxo de Caixa obtido para o modelo de financiamento adotado está ilustrado na

Figura 28.

Figura 28 - Fluxo de Caixa para o projeto de instalação de usina de reciclagem de plásticos no estado do Rio de Janeiro, considerando financiamento do BNDES.



Fonte: Formulação própria.

Para este cenário, também foram calculados os indicadores de viabilidade econômica (VPL, TIR e IL). Os valores encontrados estão ilustrados na Tabela 19.

Tabela 19 - Indicadores de viabilidade econômica do projeto para o cenário de financiamento.

VPL	R\$33.332.616,92
TIR	9,87%
IL	R\$0,19

Fonte: Formulação própria.

Com os indicadores obtidos, percebe-se que o VPL e o IL do projeto considerando o financiamento do BNDEs são maiores do que o cenário considerando apenas o capital próprio. Isso é um indicativo de que a alternativa de uso de capital de terceiros é positiva e contribui para o retorno econômico do projeto, sendo assim indicada para este caso. A TIR do projeto com financiamento também é superior à do projeto que considera apenas capital

próprio, sugerindo que o retorno sobre o investimento no cenário financiado é mais rápido do que na alternativa.

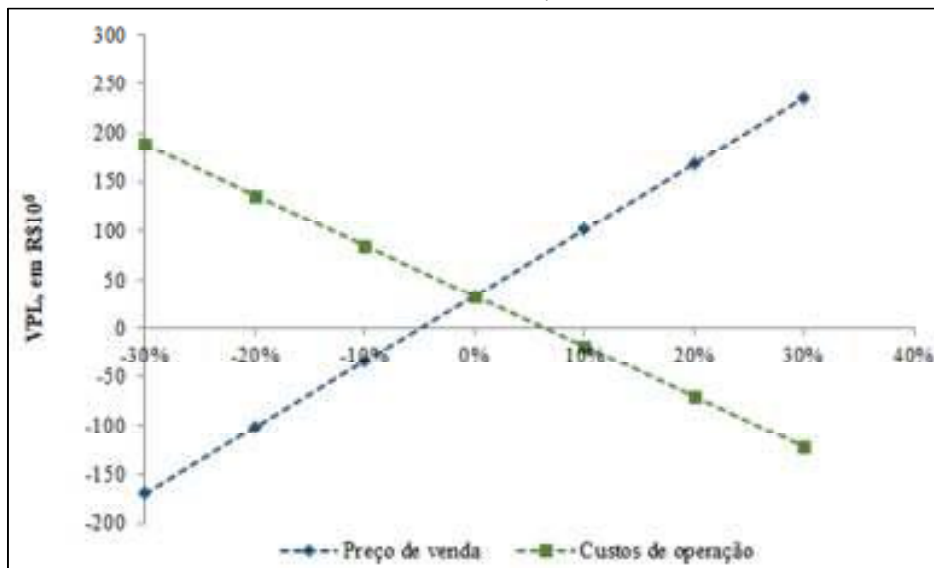
IV.7 – Análise de Sensibilidade

A partir do estabelecimento do Fluxo de Caixa, pode ser realizada a análise de sensibilidade do projeto, que consiste na verificação dos efeitos que variações nos parâmetros estimados têm sobre o resultado final de viabilidade. Esse procedimento possibilita que se tenha uma noção do risco associado às estimativas que são feitas em relação à rentabilidade do projeto (TURTON, 2008).

Foram escolhidos para análise os parâmetros preço de venda do material plástico reciclado, os custos de matéria-prima e os custos de utilidades. A escolha do preço de venda se justifica dado que está intrinsicamente ligado à rentabilidade do projeto, e pode sofrer alterações ao longo do horizonte de planejamento, com, por exemplo, a entrada de novas empresas no mercado ou a influência do aumento ou diminuição do preço das resinas plásticas produzidas a partir de petróleo. Já a análise do efeito dos custos de operação anuais é interessante pois, se a viabilidade do projeto for altamente sensível aos valores empregados no modelo de estudo, será necessário garantir o mínimo de variações possível em relação ao cenário modelo, em relação a fornecedores, consumo energético e de água.

Para essa análise, o VPL foi utilizado como indicador de rentabilidade do projeto. O resultado obtido está ilustrado na Figura 29, em que o valor base do projeto é a interseção entre as curvas dos parâmetros avaliados.

Figura 29 - Análise de sensibilidade para o projeto de usina de reciclagem de plásticos , com financiamento.



Fonte: Formulação própria.

Observando o gráfico, pode-se verificar que, conforme conclusão intuitiva, os dois parâmetros analisados provocam efeitos contrários no VPL: o preço de venda tem influência direta no indicador, enquanto a relação dos custos com o VPL é inversa. Ainda que a magnitude do efeito dos parâmetros seja bastante semelhante, o projeto apresenta maior sensibilidade em relação ao preço de venda do que aos custos analisados: a mesma variação no preço de venda provoca uma variação maior (em módulo) no VPL do que a variação nos custos de matéria-prima e de utilidades, sendo a matéria-prima a parcela de menor influência sobre a rentabilidade do projeto.

Capítulo V – Resultados e Conclusões

Cumprindo o objetivo de analisar a viabilidade econômica de uma usina de reciclagem de plásticos como alternativa para uma melhoria no gerenciamento dos RSUs do estado do Rio de Janeiro, foi realizado o EVTE para a implementação de tal projeto, considerando o modelo apresentado pelo estudo de WRAP (2009).

Como resultado, foram obtidos os Fluxos de Caixa para a operação da unidade modelo, em um horizonte de planejamento de 10 anos, e, a partir do Fluxo de Caixa, foram calculados os indicadores de rentabilidade para avaliar a operação. A Tabela 20 compila os valores dos três indicadores obtidos para a opção de utilização apenas de capital próprio, e a alternativa de utilizar o financiamento oferecido pelo programa de Resíduos Sólidos do BNDES.

Tabela 20 - Resumo dos indicadores de rentabilidade para o projeto com capital próprio e financiado.

Indicador	Apenas capital próprio	Capital próprio + financiamento do BNDES
VPL	R\$2.581.519,70	R\$33.332.616,92
TIR	6,43%	9,87%
IL	R\$0,01	R\$0,19

Fonte: Formulação própria.

Pelos valores dos indicadores obtidos, conclui-se que a implantação da usina de reciclagem de plásticos na região do Médio Paraíba do estado do Rio de Janeiro representa uma alternativa viável para a melhoria do gerenciamento de RSUs da região. O projeto apresenta rentabilidade no horizonte de planejamento considerado, e apresenta não apenas potencial econômico, mas também acarreta diversos benefícios sociais e ambientais para todo o estado: estímulo à geração de empregos nas diversas etapas envolvidas na cadeia de reciclagem do plástico; diminuição do volume final de resíduos, contribuindo para o aumento da vida útil dos aterros sanitários do estado; desenvolvimento de processos mais sustentáveis, com menor consumo de recursos de água e energia. Todos esses ganhos não foram mensurados no presente trabalho.

Para o modelo utilizado no estudo de viabilidade do projeto, a variável considerada que apresentou maior influência na rentabilidade da unidade estudada foi o preço de venda do plástico reciclado. Esse dado é importante para a manutenção da viabilidade de projeto

frente a variações que podem ocorrer durante o tempo de operação e interferir no preço de venda, como novas entradas de concorrentes no setor e mudança de tarifas e tributos.

É válido ressaltar que as aproximações e correlações utilizadas no presente estudo estão sujeitas a incertezas, que podem apresentar uma interferência significativa nos resultados do projeto além do cenário considerado. Ainda, há de ser considerada também a fragilidade das estimativas dos custos de utilidades, nas quais foi aplicada uma taxa proveniente do estudo dos preços de venda das usinas recicladas, e não taxas relativas aos setores de água e energia.

Cabe, ainda, notar que o resultado obtido complementa a análise realizada por Oliveira (2019), que verificou a recuperação dos RSUs do Rio de Janeiro através do processo de geração de energia, que também é um processo amplamente utilizado no mundo como destinação mais sustentável aos materiais pós-consumo. Nesse contexto, a reciclagem seria uma alternativa viável para dar uma destinação ainda mais nobre à fração plástica dos RSUs, produzindo um material que promoverá geração de valor e poderá ser reinserindo na cadeia produtiva, poupando os recursos naturais utilizados na produção das resinas virgens. Dessa forma, os processos de reciclagem de plásticos e de recuperação energética podem coexistir no estado do Rio de Janeiro, a fim de garantir o bom gerenciamento de todas as frações dos resíduos urbanos pós-consumo, e proporcionar a máxima redução do volume enviado aos aterros sanitários.

Capítulo VI – Sugestões para Trabalhos Futuros

A fim de seguir na mesma linha de pesquisa deste estudo, com objetivo de analisar alternativas de melhorias de gerenciamento de resíduos urbanos para o estado do Rio de Janeiro, são sugeridos os seguintes estudos:

mensuração dos ganhos ambientais e sociais trazidos pela implantação do projeto de reciclagem de plásticos;

oportunidades de redução de custos do processo de reciclagem de plásticos;

análise de viabilidade econômica do processo de reciclagem da fração de vidros dos RSUs;

análise da viabilidade econômica da geração de biogás a partir da fração orgânica dos RSUs;

análise da viabilidade do projeto de integração dos processos de recuperação energética e de reciclagem de plásticos para a realidade do Rio de Janeiro.

Referências Bibliográficas

- ABIPLAST (2018). *Perfil 2017*. Disponível em <<http://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2017/>>. Acessado em outubro/2019
- ABIPLAST (2019). *Perfil 2018*. Disponível em <<http://www.abiplast.org.br/publicacoes/perfil-2018/>>. Acesso em outubro/2019.
- ABRE (2019). Disponível em <<https://www.abre.org.br/>>. Acesso em agosto/2019.
- ABRELPE (2017). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. Disponível em <<http://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em setembro/2019.
- ABNT (2004). *NBR-10004: Resíduos Sólidos - classificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 63p.
- AL-SALEM, S.M. *et al.* (2009). *Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review*. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09002190>> Acesso em out/2019.
- AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL (2019). *Recover & Repurpose: Keeping Plastics Out of the Environment*. Disponível em <<https://plastics.americanchemistry.com/Energy-Recovery/>>. Acesso em nov/2019.
- ANDRADE, J. E. P. *et al.* (2005). *A indústria petroquímica*. Disponível em <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/3667>>. Acesso em set/2019.
- ANEEL (2017). *Balço energético do estado do Rio de Janeiro (2015-2016)*. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/index.php/pt/destaque/noticias/165-lancamento-do-balanco-energetico-do-estado-do-rio-de-janeiro-2015-2016>>. Acesso em nov/2019.
- BANCO CENTRAL (2019a). *Cotação do dólar*. Disponível em <<https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/fechamentodolar>>. Acesso em dez/2019.
- BANCO CENTRAL (2019b). *Cotação da libra*. Disponível em <<https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/cotacoestodas>>. Acesso em dez/2019.

BASF (2019). *Chemcycling*. Disponível em < <https://www.basf.com/global/en/who-we-are/sustainability/we-drive-sustainable-solutions/circular-economy/chemcycling.html>>. Acesso em set/2019.

BASTOS, B. Q. (2013). *Tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos*. Disponível em <<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007270.pdf>>. Acesso em out/2019.

BISWAJIT, R. et al (2015). *Sorting of plastic waste for effective recycling*. Disponível em <<https://pdfs.semanticscholar.org/2eed/9e01f42acf6080263dfb255ba336fa1c5142.pdf>>. Acesso em out/2019.

BNDES. *Fundo Clima – Resíduos Sólidos*. Disponível em <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/fundo-clima-residuos-solidos/>>. Acesso em nov/2019.

BRASIL (2019). *Tributos – IRPJ*. Disponível em <<http://receita.economia.gov.br/acesso-rapido/tributos/IRPJ>>. Acesso em nov/2019.

BRASIL (2010). *Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos>>. Acesso em set/2019.

BRASKEM (2019). *O plástico no planeta*. Disponível em <https://www.braskem.com.br/download/Principal/21103?file=Cartilha_Braskem.pdf>. Acesso em set/2019.

CARNEIRO, P. A. (2009). *Análise das tecnologias para gestão e reaproveitamento energético dos resíduos urbanos para reciclagem de plásticos*. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1781/dissertacao_0034235.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em out/2019.

CASTRO, T. H. M. (2019). *Os bioplásticos: Impactos ambientais e perspectivas de mercado*. Disponível em <http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/mestrado/Thais_Hessab_MESTRADO_2019.pdf>. Acesso em set/2019.

CBIC (2019). *O Mercado imobiliário no Brasil*. Disponível em: <<https://cbic.org.br/wp-content/uploads/2019/11/3%C2%BA-Trimestre-2019-Indicadores-Imobili%C3%A1rios-Nacionais-APRESENTA%C3%87%C3%83O.pdf>>. Acesso em nov/2019.

CEDAE (2019). *Estrutura Tarifária*. Disponível em: <https://www.cedae.com.br/Portals/0/tarifas/ESTRUTURA_TARIFARIA_OUT_2019.pdf>. Acesso em nov/2019.

CHEMIK (2013). *Energy recovery from waste plastics*. Disponível em <https://yadda.icm.edu.pl/element/5_13__Siudyga_GB>. Acesso em out/2019.

CEMPRE (2019). *Preço dos materiais recicláveis*. Disponível em <<http://cempre.org.br/cempre-informa/id/115/preco-dos-materiais-reciclaveis>>. Acesso em out/2019.

CICLUS (2019). *Ficha técnica – CTR Seropédica*. Disponível em <http://www.ciclusambiental.com.br/arquivos/Ficha_tecnica_CTR2.pdf>. Acesso em nov/2019.

D'AMBRIÈRES, W. (2019). *Plastics recycling worldwide: current overview and desirable changes*. Disponível em <<https://journals.openedition.org/factsreports/5102>>. Acesso em out/2019.

DODBIBA, G. et al (2004). *Progress in separating plastic materials for recycling*. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/50300490_Progress_in_Separating_Plastic_Materials_for_Recycling>. Acesso em set/2019.

ENVIRONMENTAL AGENCY, UK. *Recycling*. Disponível em: <<http://www.environmentlaw.org.uk/rte.asp?id=86>>. Acesso em nov/2019.

EPA (2018). *National Overview: Facts and Figures on Materials, Wastes and Recycling*. Disponível em <<https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials>>. Acesso em out/2019.

EPA (2019). *Plastics: Material Specific Data*. Disponível em: <<https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/plastics-material-specific-data>>. Acesso em out/2019.

FARIA, F. P. *et al.* (2011). *A reciclagem de plásticos a partir do conceito de produção mais limpa*. Disponível em <<https://revista.feb.unesp.br/index.php/gepros/article/view/534>>. Acesso em nov/2019.

FIRJAN (2017). *Quanto custa a energia elétrica?* Disponível em <<https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-economia/quanto-custa-a-energia-eletrica.htm>>. Acesso em dez/2019.

FRARE, L. M. *et al.* (2006). *Correlações para estimativas de custos na remoção de ácido sulfídrico de biogás*. Disponível em <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/1282/715>>. Acesso em out/2019.

GEYER, *et al.* (2017). *Production, use and fate of all plastics ever made*. Disponível em <<https://advances.sciencemag.org/content/3/7/e1700782>>. Acesso em set/2019.

GRAND VIEW RESEARCH (2019). *Plastic Market Size Worth \$721.14 Billion By 2025*. Disponível em <<https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-plastics-market-analysis>>. Acesso em out/2019.

GRAUSE, G. *et al.* (2011). *Feedstock recycling of waste polymeric material*. Disponível em <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-011-0031-z>>. Acesso em set/2019.

GREENPEACE (2019). *Incineração e saúde humana*. Disponível em <http://greenpeace.org.br/toxicos/pdf/sumario_exec_health.pdf>. Acesso em dez/2019.

HOPEWELL, J. *et al.* (2009). *Plastics recycling: challenges and opportunities*. Disponível em <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2873020/>>. Acesso em out/2019.

INFLATION.EU (2019). Disponível em <<https://pt.inflation.eu/taxas-de-inflacao/brasil/inflacao-historica/ipc-inflacao-brasil.aspx>>. Acesso em set/2019.

IUCN (2019). *Marine plastics*. Disponível em <<https://www.iucn.org/resources/issues-briefs/marine-plastics>>. Acesso em out/2019.

JAMBECK, J. R. *et al.* (2015). *Plastic waste inputs from land into the ocean*. Disponível em <https://www.iswa.org/fileadmin/user_upload/Calendar_2011_03_AMERICANA/Science-2015-Jambeck-768-71__2_.pdf>. Acesso em out/2019.

LEMOS, F. (2006). *Metodologia para seleção de métodos de previsão de demanda*. Disponível em <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/5949/000522463.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em out/2019.

OLIVEIRA, J. P. (2019). *Síntese de fluxogramas alternativos para o processo de geração de energia a partir de RSU*. Disponível em <<https://www.marinha.mil.br/spolm/content/anais-2019>>. Acesso em nov/2019.

OLIVEIRA, M. C. (2012). *Gestão de resíduos plásticos pós-consumo: perspectivas para a reciclagem no Brasil*. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/MariaClaraBrandtRibeiroDeOliveira.pdf> Acesso em out/2019.

ONU (2017). *Towards a pollution-free planet*. Disponível em <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/21800/UNEA_towardspollution_long%20version_Web.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em nov/2019.

ONU (2014). *Valuing plastic*. Disponível em <<http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/9238/-Valuing%20plastic%3a%20the%20business%20case%20for%20measuring%2c%20managing%20and%20disclosing%20plastic%20use%20in%20the%20consumer%20goods%20industry-2014Valuing%20plasticsF.pdf?sequence=8&isAllowed=y>>. Acesso em nov/2019.

ORBIS RESEARCH (2019). *Plastic Market Growth*. Disponível em <<https://www.globenewswire.com/news-release/2019/06/11/1866654/0/en/Plastic-Recycling-Market-to-grow-at-6-1-CAGR-to-hit-41-2-Bn-by-2025-Industry-Analysis-by-2019-Trends-Size-Cost-Structure-Sales-Revenue-Growth-Drivers-Price-and-Gross-Margin.html>>. Acesso em out/2019.

PERGLINGEIRO, C. A. G. (2005). *Engenharia de Processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos*. São Paulo, Ed. Blucher.

PETROBRAS (2019). *Relatório de Sustentabilidade de 2018*. Disponível em <https://www.investidorpetrobras.com.br/fck_temp/1030_3/file/Sustentabilidade_2018.pdf>. Acesso em nov/2019.

PIATTI, T. M. *et al.* (2005). *Plásticos: características, usos, produção, e impactos ambientais*. Disponível em <http://www.usinaciencia.ufal.br/multimedia/livros-digitais-cadernos-tematicos/Plasticos_caracteristicas_usos_producao_e_impactos_ambientais.pdf>. Acesso em ago/2019.

PLASTICS INDUSTRY ASSOCIATION (2019). *Jobs in U.S. plastics industry increase according to 2018 size and impact report*. Disponível em <<https://www.plasticsindustry.org/article/jobs-us-plastics-industry-increase-according-2018-size-and-impact-report>>. Acesso em set/2019.

PLASTICS INSIGHT (2019). *PET: produção, mercado e propriedades*. Disponível em <<https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/polyethylene-terephthalate/>>. Acesso em ago/2019.

PLASTICS RECYCLERS EUROPE (2019). *Chemical Recycling*. Disponível em <<https://www.plasticsrecyclers.eu/chemical-recycling>>. Acesso em ago/2019.

PLASTICSEUROPE (2014 – 2019). *Plastics: The Facts*. Disponível em <<https://www.plasticseurope.org/em>>. Acesso em nov/2019.

PLASTIVIDA (2013). *Monitoramento dos índices de reciclagem mecânica de plásticos no Brasil*. Disponível em <http://www.plastivida.org.br/images/temas/Apresentacao_IRMP2010.pdf>. Acesso em set/2019.

PORTAL BRASIL (2019). *Salário mínimo*. Disponível em <<https://www.portalbrasil.net/salariominimo.htm>>. Acesso em dez/2019

RAGAERT, K. *et al.* (2017). *Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste*. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X17305354>>. Acesso em ago/2019.

REINO UNIDO (2014). *Separate collection of waste: paper, plastic, metal and glass*. Disponível em <<https://www.gov.uk/guidance/separate-collection-of-waste-paper-plastic-metal-and-glass>>. Acesso em nov/2019.

REINO UNIDO (2019). UK: *Statistics on Waste*. Disponível em <www.gov.uk/government/statistics/uk-waste-data>. Acesso em dez/2019.

REINO UNIDO (2019a). *Collection*. Disponível em <<http://www.environmentlaw.org.uk/rte.asp?id=85>>. Acesso em nov/2019.

REINO UNIDO (2019b). *Recycling*. Disponível em <<http://www.environmentlaw.org.uk/rte.asp?id=86>>. Acesso em nov/2019.

RIO DE JANEIRO (2016). *Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - PMGIRS – RJ*. Disponível em <http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/3372233/4177431/D.O._28112016DECRETO42.605_2016PMGIRScompletocomanexos.pdf>. Acesso em nov/2019.

RIO DE JANEIRO (2019). *Data Rio*. Disponível em <<http://www.data.rio/>>. Acesso em nov/2019.

SEA (2013). *Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro – relatório síntese*. Rio de Janeiro, 2013.

SEFAZ (2019). *Municípios em dados*. Disponível em <<http://www.fazenda.rj.gov.br/sefaz/content/conn/UCMServer/uuid/dDocName%3AWCC197714>>. Acesso em nov/2019.

SEIDER, W. D. *et al.* (2009). *Product and Process Design Principles*. 3 ed. Westford.

SINDIPLAST (2019). *Tipos de plásticos*. Disponível em <<http://www.sindiplast.org.br/tipos-de-plasticos/>>. Acesso em out/2019.

SINFRERJ (2019). *Rio concede incentivos fiscais ao plástico*. Disponível em <<http://www.sinfrefrj.com.br/rio-concede-incentivos-fiscais-ao-plastico>>. Acesso em dez/2109.

TEIXEIRA, M. O. *et al.* (2015). *Panorama da indústria petroquímica e de fertilizantes*. Disponível em <<http://cnq.org.br/system/uploads/publication/d917168c9cd337e34d7ead8843299376/file/petroquimica-e-fertilizantes-b.pdf>>.

TRINDADE, K. (2015). *Estudo de viabilidade para uma empresa de reciclagem de plástico em Ijuí/RS*. Disponível em <<http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3158/TCC%20vers%C3%A3o%20final.pdf?sequence=1>>. Acesso em set/2019.

TURTON, R. *et al.* (2008). *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes*. 3 ed. Boston.

VIRIDOR (2019a). *Sustainability report*. Disponível em <<https://www.viridor.co.uk/siteassets/document-repository/policies/sustainabilityreport2019.pdf>>. Acesso em nov/2019.

VIRIDOR (2019b). *Avonmouth Plastic Recycling Announcement*. Disponível em <<https://www.viridor.co.uk/who-we-are/latest-news/2019-news/avonmouth-plastic-recycling-announcement/>>. Acesso em nov/2019.

WITS (2019). *United States Plastic or Rubber Imports By Country 2017*. Disponível em <https://wits.worldbank.org/CountryProfile/en/Country/USA/Year/LTST/TradeFlow/Import/Partner/by-country/Product/39-40_PlastiRub>. Acesso em out/2019.

WRAP UK (2009). *A financial assessment of recycling mixed plastics in the UK*. Disponível em <<http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/WRAP%20A%20financial%20assessment%20of%20recycling%20mixed%20plastics%20in%20the%20UK.pdf>>. Acesso em dez/2019.

WWF (2018). *What a Waste*. Disponível em <<http://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>>. Acesso em nov/2019.

ZERO WASTE EUROPE (2019). *El Dorado of Chemical Recycling*. Disponível em <https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/2019_08_29_zwe_study_chemical_recycling.pdf>. Acesso em dez/2019.

Anexo A – Tabelas com Projeções para os Custos de Operação do Projeto

Tabela 21 - Projeção dos custos de mão-de-obra.

Ano	Custo Mão-de-obra (R\$/ano)
2020	1.539.987,77
2021	1.637.622,99
2022	1.741.448,29
2023	1.851.856,11
2024	1.969.263,79
2025	2.094.115,11
2026	2.226.882,01
2027	2.368.066,33
2028	2.518.201,74
2029	2.677.855,73
2030	2.847.631,78

Fonte: Formulação própria com dados de BRASIL (2019) e INFLATION.EU (2019).

Tabela 22 - Projeção dos custos de Matéria-prima.

Ano	Preço da matéria-prima (R\$/ton)
2020	1.345
2021	1.392
2022	1.440
2023	1.490
2024	1.541
2025	1.595
2026	1.650
2027	1.707
2028	1.766
2029	1.827
2030	1.890

Fonte: Formulação própria a partir de dados de CEMPRE (2019) e INFLATION.EU (2019).

Tabela 23 - Projeção dos custos de utilidades.

Ano	Custo de utilidades (R\$/ano)
2020	38.421.000
2021	39.751.436
2022	41.127.943
2023	42.552.115
2024	44.025.603
2025	45.550.115
2026	47.127.417
2027	48.759.338
2028	50.447.768
2029	52.194.666
2030	54.002.054

Fonte: Formulação própria com base nos dados de CEDAE (2019), FIRJAN (2017) e INFLATION.EU (2019).

Tabela 24 - Projeção dos custos do tratamento de efluentes.

Ano	Custo do tratamento de efluentes (R\$/ano)
2020	31.867
2021	32.970
2022	34.112
2023	35.293
2024	36.515
2025	37.779
2026	39.088
2027	40.441
2028	41.842
2029	43.290
2030	44.790

Fonte: Formulação própria a partir dos dados de TURTON (2008) e INFLATION.EU (2019).