



**Impactos ambientais dos plásticos:  
biopolímeros como alternativa para a  
redução do acúmulo de embalagens  
flexíveis de Polipropileno no meio  
ambiente**

Ana Luísa Lobo Fortuna

Monografia em Engenharia Química.

Orientadora: Clarice Campelo de Melo Ferraz, D.Sc.

Fevereiro de 2020

# **IMPACTOS AMBIENTAIS DOS PLÁSTICOS: BIOPOLÍMEROS COMO ALTERNATIVA PARA A REDUÇÃO DO ACÚMULO DE EMBALAGENS FLEXÍVEIS DE POLIPROPILENO NO MEIO AMBIENTE**

***Ana Luísa Lobo Fortuna***

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

Aprovado por:

---

Marcelo Mendes Viana, D.Sc.

---

Ana Mehl, D.Sc.

---

Jacqueline Gisele Silva, M.Sc.

Orientado por:

---

Clarice Campelo de Melo Ferraz, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil  
Fevereiro de 2020

## **Ficha Catalográfica**

Fortuna, Ana Luísa Lobo.

Impactos ambientais dos plásticos: estratégias para redução do acúmulo de embalagens flexíveis de Polipropileno no meio ambiente / Ana Luísa Lobo Fortuna. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2020.

x, 124 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2020. Orientadora: Clarice Campelo de Melo Ferraz.

1. Polipropileno. 2. PLA. 3. PHA. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Clarice Campelo de Melo Ferraz. I. Impactos ambientais dos plásticos: estratégias para redução do acúmulo de embalagens flexíveis de Polipropileno no meio ambiente.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, pelo amor incondicional, dedicação e apoio, sem os quais essa conquista não seria possível.

Ao Vitor, por ser tão carinhoso, parceiro e compreensivo durante todos esses anos. Seu amor me deu forças para continuar.

Aos meus amigos, que me acompanharam por toda a graduação, tornando essa jornada mais leve e divertida.

À minha orientadora, Clarice, pela dedicação, suporte e paciência. Obrigada por me acompanhar durante essa etapa tão complexa e decisiva.

À Escola de Química e seus professores, pelos ensinamentos, fundamentais para a construção da profissional que serei.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

**IMPACTOS AMBIENTAIS DOS PLÁSTICOS: BIOPOLÍMEROS COMO  
ALTERNATIVA PARA A REDUÇÃO DO ACÚMULO DE EMBALAGENS  
FLEXÍVEIS DE POLIPROPILENO NO MEIO AMBIENTE**

Ana Luísa Lobo Fortuna

Fevereiro, 2020

Orientadora: Prof. Clarice Campelo de Melo Ferraz, D.Sc.

O aumento do consumo desenfreado do plástico contribuiu para sua presença em grandes quantidades no lixo urbano. O polipropileno é um dos polímeros mais utilizados na fabricação de embalagens plásticas flexíveis e o acúmulo desses materiais no meio ambiente, principalmente nos oceanos, vem causando diversos impactos negativos à biodiversidade do planeta. Uma alternativa para os problemas causados pelo descarte indevido desses resíduos seria a substituição dos plásticos tradicionais por polímeros biodegradáveis e compostáveis de fontes renováveis cujo ciclo de vida tende a ser menos poluente, visto que, sob condições favoráveis, se degradam em ambientes biologicamente ativos, não produzindo rejeitos tóxicos para o ambiente. Visando esses benefícios, esse estudo analisou dois biopolímeros capazes de substituir o polipropileno na fabricação de embalagens flexíveis, o poliácido láctico (PLA) e os polihidroxialcanoatos (PHAs). Análises SWOT foram realizadas a fim de determinar a viabilidade real de implementação desses biopolímeros nessa indústria e permitiram identificar que os elevados custos de produção, a necessidade de grandes quantidades de recursos naturais e a competição com um mercado já estruturado se caracterizam como as principais barreiras para a consolidação desses materiais no mercado de embalagens flexíveis. Por outro lado, a implementação de legislações que favorecem a utilização de bioplásticos em detrimento dos plásticos convencionais e as mudanças no comportamento do consumidor impulsionam o mercado dos biopolímeros.

## ÍNDICE

1) INTRODUÇÃO .....	1
2) OBJETIVO .....	5
3) METODOLOGIA .....	6
4) ANÁLISES SWOT .....	7
5) POLIPROPILENO (PP) .....	9
5.1) Síntese do Polipropileno.....	11
5.2) Produção Industrial .....	12
5.3) Estrutura de custos e aspectos ambientais do Polipropileno .....	12
5.4) Ambiente de mercado .....	17
5.4.1) Indústria mundial.....	17
5.4.2) Indústria brasileira.....	19
5.5) Matriz SWOT .....	21
5.5.1) Forças .....	22
5.5.2) Fraquezas .....	23
5.5.3) Oportunidades.....	23
5.5.4) Ameaças .....	24
6) POLIPROPILENO NA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS .....	24
6.1) Mercado .....	25
6.1.1) Mercado Mundial.....	25
6.1.2) Mercado Nacional .....	28
6.2) Aspectos ambientais .....	29
7) BIOECONOMIA .....	30
8) BIOPLÁSTICOS.....	34
8.1) O ciclo de vida dos bioplásticos .....	36
8.1.1) Escolha da biomassa .....	36
8.1.2) Requerimentos de área agrícola para a produção de bioplásticos .....	38

8.1.3) Produção de bioplásticos .....	40
8.1.4) Fim de vida dos bioplásticos .....	41
8.2) Mercado global e nacional.....	43
8.3) Impulsionadores do mercado de bioplásticos.....	45
8.3.1) Mudando o comportamento do consumidor .....	46
8.3.2) Investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D) .....	47
8.3.3) Produção e uso da biomassa .....	47
8.3.4) Políticas de incentivo.....	48
9) EMBALAGENS BIODEGRADÁVEIS.....	49
9.1) Propriedades dos materiais biodegradáveis.....	50
9.1.1) Propriedades de barreira.....	50
9.1.2) Propriedades mecânicas.....	51
9.1.3) Cor .....	51
9.1.4) Propriedades microestruturais .....	52
9.2) Mercado global de embalagens plásticas biodegradáveis .....	52
10) BIOPOLÍMEROS SUBSTITUTOS PARA O POLIPROPILENO NA FABRICAÇÃO DE EMBAGALENS FLEXÍVEIS .....	54
10.1) Poliláctico (PLA).....	55
10.1.1) Síntese .....	56
10.1.2) Processabilidade .....	60
10.1.3) Custos de produção e mercado .....	60
10.1.4) Aspectos ambientais .....	63
10.1.5) Matriz SWOT.....	66
10.2) Polihidroxialcanoatos (PHAs) .....	69
10.2.1) Síntese .....	72
10.2.2) Processabilidade .....	76
10.2.3) Custos de produção e mercado .....	77
10.2.4) Aspectos ambientais .....	79

10.2.5) Matriz SWOT .....	82
11) CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	85
12) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	89
APÊNDICE A – MÉTODOS DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL DO POLIPROPILENO .....	103
A.1) Polimerização em suspensão .....	103
A.2) Polimerização em massa ( <i>bulk</i> ) .....	104
A.3) Polimerização em fase gasosa .....	105
A.4) Catalisadores .....	107
APÊNDICE B – MANUFATURA DE FILMES BOPP PARA A FABRICAÇÃO DE EMBALAGENS FLEXÍVEIS.....	111



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Projeção do consumo aparente de transformados plásticos no Brasil até 2023. ....	1
Figura 2: Matriz SWOT.....	7
Figura 3: Perguntas-chave para confecção da matriz SWOT. ....	9
Figura 4: Produção do polipropileno.....	9
Figura 5: Mecanismo de polimerização por adição para o PP. ....	11
Figura 6: Cadeia produtiva dos plásticos.....	13
Figura 7: Comparativo entre o perfil de produção de unidades de craqueamento base etano e base nafta. ....	14
Figura 8: Preços globais do polipropileno, USD por tonelada. ....	15
Figura 9: Principais termoplásticos encontrados nos resíduos urbanos brasileiros. ....	16
Figura 10: Demanda mundial dos principais termoplásticos. ....	18
Figura 11: 10 principais empresas produtoras de polipropileno. ....	19
Figura 12: Principais resinas consumidas no Brasil (%) e exemplos de aplicações. ....	20
Figura 13: Produção, demanda, importação e exportação de polipropileno.....	21
Figura 14: Matriz SWOT para o PP. ....	22
Figura 15: Cadeia evolutiva de embalagens. ....	25
Figura 16: Principais materiais utilizados no mercado global de embalagens plásticas. ....	26
Figura 17: Produção de embalagens flexíveis no Brasil.....	28
Figura 18: Bioeconomia: mais que uma Economia Circular.....	32
Figura 19: Diferença entre polímeros convencionais e bioplásticos.....	35
Figura 20: Emissões de gases do efeito estufa para bioplásticos e petro-plásticos. ....	36
Figura 21: Mudanças climáticas causadas por bioplásticos e petro-plásticos..	37
Figura 22: Custos relativos do biorrefino da beterraba europeia e da cana-de-açúcar brasileira. ....	38
Figura 23: Uso da área agrícola global.....	39
Figura 24: Fluxograma do processo de compostagem. ....	42
Figura 25: Fluxograma do processo de digestão anaeróbica.....	43

Figura 26: Capacidades globais de produção de bioplásticos.....	44
Figura 27: Capacidades globais de produção de bioplásticos por segmento... 45	
Figura 28: Crescimento do mercado de embalagens plásticas biodegradáveis por região. ....	53
Figura 29: Aspectos a serem observados para o desenvolvimento de embalagens.....	54
Figura 30: Estrutura molecular do PLA.....	55
Figura 31: Estruturas químicas para o L-, meso- e D-Lactatos. ....	57
Figura 32: Cadeia de produção do PLA. ....	58
Figura 33: Etapas de produção do PLA a partir das biomassas mais utilizadas. ....	59
Figura 34: Níveis das tecnologias disponíveis para a produção do PLA. ....	60
Figura 35: Tendência de preços do PLA em países desenvolvidos, em 2017. 61	
Figura 36: Previsões para a indústria global do PLA.....	62
Figura 37: Cadeia de produção do PLA e os impactos ambientais associados. ....	64
Figura 38: Requerimentos de matéria-prima, área agrícola e água para a produção de uma tonelada de PLA. ....	64
Figura 39: Matriz SWOT para o PLA.....	66
Figura 40: Estrutura geral dos PHAs. ....	69
Figura 41: Estrutura do polihidroxibutirato (PHB). ....	70
Figura 42: Cadeia de produção dos PHAs. ....	74
Figura 43: Etapas de produção de PHAs a partir das biomassas mais utilizadas. ....	75
Figura 44: Níveis das tecnologias disponíveis para a produção de PHAs.....	76
Figura 45: Cadeia de produção de PHAs e os impactos ambientais associados. ....	79
Figura 46: Requerimentos de matéria-prima, área agrícola e água para a produção de uma tonelada de PHA. ....	80
Figura 47: Ciclo biológico dos PHAs. ....	81
Figura 48: Matriz SWOT para os PHAs.....	82

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Empresas produtoras de PLA e seus principais eventos mercadológicos e tecnológicos.Fonte: Amaral et al., 2019. ....	63
Tabela 2: Comparação entre as propriedades do PHB e do PP. ....	71
Tabela 3: Microrganismos produtores de PHAs. ....	73

## 1) INTRODUÇÃO

O surgimento dos primeiros plásticos totalmente sintéticos data do início do século XX, com a invenção da Baquelita, um substituto para o marfim de elefantes e para os cascos e chifres de bovinos (ABIPLAST, 2017). A versatilidade desses materiais, aliada aos baixos custos, foi responsável por sua grande disseminação, sendo produzidos e utilizados em larga escala a partir dos anos 1950. A produção global de plásticos atingiu a marca de 348 milhões de toneladas em 2017 (PLASTICSEUROPE, 2018). Somente no Brasil, o consumo aparente <sup>1</sup>de transformados plásticos foi de 6,5 milhões de toneladas (ABIPLAST, 2017) e a projeção é que esse valor chegue a 7,8 milhões de toneladas em 2023 (Figura 1).

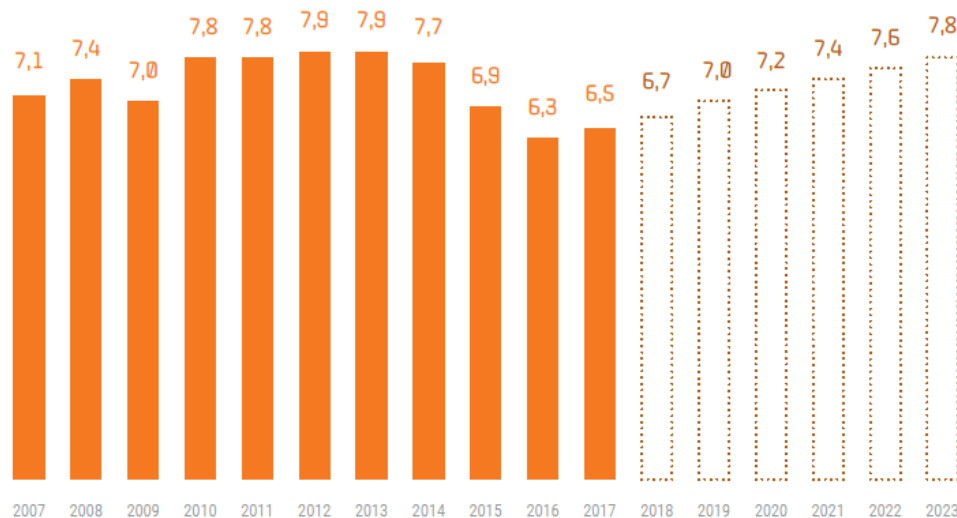


Figura 1: Projeção do consumo aparente de transformados plásticos no Brasil até 2023.  
Fonte: ABIPLAST (2017, pág. 72).

A utilização do plástico trouxe diversos benefícios para a sociedade, tais como a redução do desperdício de alimentos através do uso de embalagens e a redução do consumo energético mundial, visto que, caso os plásticos fossem substituídos por materiais alternativos, como, por exemplo, o vidro e o alumínio,

---

<sup>1</sup> Consumo aparente é definido como o total da produção de um bem, adicionada das importações e subtraída das exportações (Carvalho e Ribeiro, 2012).

o gasto de energia aumentaria em 57%, e as emissões de GEE<sup>2</sup>, em até 61% (PLASTICSEUROPE, 2019; BPF, 2019). Esses materiais vêm sendo amplamente utilizados como embalagens para diversos tipos de produtos devido a propriedades como flexibilidade, leveza e resistência. As embalagens plásticas são consideradas de ciclo de vida curto<sup>3</sup> e representam cerca de 26% da produção mundial do plástico (World Economic Forum, 2016).

O polipropileno é um dos polímeros mais utilizados na fabricação de embalagens. É um material termoplástico<sup>4</sup> que apresenta excelentes propriedades tais como resistência química, fácil moldagem e atoxicidade. Essas propriedades fazem com que esse polímero seja ideal para diversas aplicações industriais, sendo a indústria de embalagens uma das suas principais consumidoras. As embalagens flexíveis são as mais utilizadas no país (ABRE, 2018) e 16% dessas embalagens são constituídas por polipropileno (ABIEF, 2017).

Apesar das suas vantagens, a revolução dos plásticos tem um preço. A maioria dos plásticos utilizados são derivados de hidrocarbonetos fósseis e não biodegradáveis e já representam 12% da composição do lixo global (World Bank Group, 2018). O acúmulo de dejetos plásticos no ambiente vem se tornando uma grande preocupação, gerando grandes consequências ao meio ambiente e afetando terra, rios e mares, sendo comprovado que quase 700 espécies de animais já foram afetadas por esses dejetos (National Geographic, 2018).

Além disso, existe uma crescente conscientização sobre o acúmulo de grandes quantidades de resíduos plásticos em oceanos (Philp et al., 2013). Uma pesquisa publicada em 2015 estimou que 8 milhões de toneladas métricas de

---

<sup>2</sup> Gases do Efeito Estufa (GEE) são substâncias gasosas, tais como CO<sub>2</sub> e vapor d'água, que são responsáveis por absorver parte da radiação infravermelha emitida pela superfície terrestre, fazendo com que a temperatura da Terra seja favorável à existência de vida. O aumento da concentração desses gases na atmosfera intensifica o efeito estufa, elevando a temperatura média do planeta e causando mudanças climáticas (INPE).

<sup>3</sup> Entende-se por ciclo de vida curto uma duração de até um ano (ABIPLAST, 2017).

<sup>4</sup> Termoplásticos são polímeros que derretem quando aquecidos e enrijecem após resfriamento, dando a eles a capacidade de serem remodelados quase indefinidamente. Como resultado, são polímeros mecanicamente recicláveis (PLASTICSEUROPE).

plástico acabam nos oceanos todos os anos (Parker, 2018). Cerca de metade de todo o lixo plástico que acaba nos oceanos vem de apenas cinco países: China, Indonésia, Filipinas, Tailândia e Vietnã, e caso as tendências atuais sejam mantidas, nossos oceanos poderão conter mais plástico que peixes até 2050 (United Nations, 2018).

Uma das soluções para o acúmulo de plásticos na natureza mais discutidas atualmente é a inserção desses materiais em um ciclo fechado, com base nos princípios da Economia Circular, que se configura como uma alternativa à cadeia de produção linear que atua majoritariamente na atualidade. Esse modelo prevê a reutilização de insumos, visando a redução da geração de resíduos e dos impactos ambientais causados pelo crescimento econômico (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

O conceito de Economia Circular tem sido amplamente difundido, principalmente na Europa, porém, um de seus principais pilares, a reciclagem, encontra grandes obstáculos ao redor do mundo. Dados mostram que somente 9% de todo o plástico já produzido foi reciclado e apenas 14% é coletado para a reciclagem agora (United Nations, 2018). As razões para esses baixos percentuais são complexas. Além do fato de que nem todo plástico pode ser reciclado, a falta de conscientização do público faz com que as coletas desse material sejam frequentemente contaminadas, o que pode aumentar o custo da reciclagem. Razões econômicas também influenciam nos percentuais de materiais reciclados. Dependendo do preço do petróleo, é, geralmente, mais barato fabricar plástico virgem, visto que o mercado de plástico reciclado é notoriamente volátil, tornando os investidores relutantes em se comprometer com o setor (United Nations, 2018).

No Brasil, dados sobre a produção e gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) revelam que existem 19.000 toneladas/dia de resíduos sem recolhimento no país e que, por consequência, acabam em locais de descarte impróprios, além de evidenciar que 75% dos brasileiros não separam seus resíduos para a realização de logística reversa (ABRELPE, 2018). Sendo assim, apenas 8,2% dos resíduos plásticos gerados foram recuperados para a reciclagem em 2017 (ABRELPE, 2018).

Tendo em vista a defasagem da reutilização e reciclagem (Ellen MacArthur Foundation, 2017), a funcionalidade de um modelo circular se mostra

comprometida, não se apresentando, sozinho, como uma solução viável para a redução de rejeitos plásticos no momento atual.

Como um complemento à Economia Circular, surge a Bioeconomia, que é um modelo de economia sustentável que utiliza recursos biológicos renováveis para a produção de alimentos, rações, produtos de base biológica e bioenergia (EEA, 2018). No âmbito da indústria polimérica, um modelo baseado na bioeconomia é aplicável a partir da substituição de polímeros derivados de fontes de energia fósseis por biopolímeros.

Biopolímeros são polímeros produzidos a partir de seres vivos ou a partir de fontes renováveis de energia, tais como milho, celulose, cana-de-açúcar e outras (Brito et al, 2011). Devido à escassez do petróleo e ao impacto ambiental causado pela produção e pelo descarte de polímeros de origem fóssil, esses materiais têm se mostrado como uma alternativa favorável. Alguns biopolímeros são potenciais substitutos para polímeros derivados do petróleo e, como são, frequentemente, biodegradáveis, se apresentam como uma solução para o crescente acúmulo de plásticos no meio ambiente (Brito et al., 2011). A biodegradação é um processo natural pelo qual compostos orgânicos são convertidos em compostos mais simples, mineralizados e redistribuídos através de ciclos elementares como o do carbono, nitrogênio e enxofre (Fonseca, 2014). Quando em ambientes biologicamente ativos, polímeros biodegradáveis são consumidos por agentes biológicos, tais como fungos e bactérias, e utilizados como alimentos, eliminando quaisquer resíduos perigosos ou tóxicos para o meio ambiente (Assis, 2009 apud Fonseca, 2014).

Biopolímeros com propriedades mecânicas semelhantes aos polímeros convencionais já são conhecidos. Diante da urgente necessidade de reduzir os impactos ambientais gerados pela crescente fabricação e utilização de plásticos derivados do petróleo, o presente estudo visa introduzir o conceito de Bioeconomia e prever sua aplicabilidade no Brasil e no mundo, através da possível substituição parcial ou total do polipropileno por biopolímeros biodegradáveis na fabricação de embalagens flexíveis. Os biopolímeros capazes de substituir esse material serão estudados de forma a se determinar sua viabilidade econômica e suas reais possibilidades de implementação no mercado e na sociedade atual. O potencial de utilização de embalagens flexíveis fabricadas a partir desses biopolímeros será analisado de forma a se deliberar

se realmente podem ser apresentados como uma alternativa viável para a solução do problema de acúmulo de embalagens plásticas no ambiente.

## **2) OBJETIVO**

O presente estudo visa analisar a viabilidade da substituição parcial ou total do polipropileno por biopolímeros na fabricação de embalagens flexíveis, introduzindo o conceito de Bioeconomia e sua aplicabilidade no Brasil.

Entre os novos materiais desenvolvidos, com aplicabilidade na indústria de embalagens e biodegradabilidade, se destacam os biopolímeros poliácido láctico – PLA e polihidroxialcanoatos – PHAs, que serão estudados de forma a se avaliar sua viabilidade econômica e suas reais possibilidades de implementação no mercado e na sociedade atual. Através de análises aprofundadas dos métodos de produção, custos e mercados de cada biopolímero, o potencial de utilização de embalagens flexíveis fabricadas a partir dos mesmos será analisado de forma a se deliberar se realmente podem ser apresentados como uma alternativa viável para a solução da problemática do acúmulo de embalagens plásticas no ambiente e seus efeitos negativos sobre ele, em particular a formação de ilhas de plásticos nos oceanos, a asfixia, ingestão e envenenamento em animais marinhos e a presença de microplásticos em peixes destinados ao consumo humano.

Para se atingir o objetivo principal, foram definidos dois objetivos secundários:

**OS1:** identificar a aplicabilidade de um modelo baseado na Bioeconomia no âmbito da indústria polimérica e, mais especificamente, da indústria de embalagens plásticas flexíveis, com a introdução do conceito de biopolímeros.

**OS2:** realizar uma análise dos biopolímeros de interesse, com enfoque em métodos de fabricação, custos de produção, mercado e aspectos ambientais, considerando o potencial de acúmulo de material no meio ambiente e a emissão de gases do efeito estufa.



### 3) METODOLOGIA

O presente trabalho se caracteriza como uma pesquisa qualitativa aplicada, segundo a abordagem proposta por Gerhardt e Silveira (2009), pois tem por objetivo gerar conhecimento para a aplicação prática de biopolímeros na indústria de embalagens flexíveis, solucionando, assim, uma questão específica que não pode ser analisada de forma quantitativa.

Quanto aos seus objetivos, de acordo com Gil (2008)<sup>5</sup>, essa pesquisa pode ser classificada como exploratória, pois visa avaliar a viabilidade de implementação mercadológica dos objetos investigados (PLA e PHAs como substitutos para o polipropileno na fabricação de embalagens flexíveis).

A pesquisa bibliográfica e documental foi a principal forma para a obtenção de dados acerca dos processos de produção, aspectos econômicos, mercadológicos, ambientais e sociais de cada biopolímero estudado e, sendo assim, as informações coletadas foram a base sobre a qual todo o trabalho foi desenvolvido.

As fontes utilizadas consistem em artigos da Base de Periódicos CAPES, documentos de associações nacionais e internacionais (ABIPLAST, ABRELPE, ABRE, Plastics Europe, etc.), relatórios de fundações como a Ellen MacArthur Foundation (EMF), relatórios de instituições e agências, como World Bank Group, United Nations e Ministério do Meio Ambiente, sites de empresas especializadas (Braskem), publicações em revistas (National Geographic), livros e patentes depositadas nas bases de USPTO e EPO. As palavras-chaves utilizadas nas buscas incluem polypropylene, bioeconomy, circular bioeconomy, bioplastics, polactic acid, PLA, polyhydroxyalkanoates, PHAs, PHB, PHBV, flexible packaging, entre outras.

A partir dos dados obtidos, pretendeu-se prever o desenvolvimento dos biopolímeros estudados no setor de embalagens flexíveis através de análises SWOT. No caso do presente trabalho, matrizes SWOT foram confeccionadas

---

<sup>5</sup> Gil (2008) considera que uma pesquisa exploratória tem como objetivo o desenvolvimento, esclarecimento e modificação de conceitos e ideias e envolve, na maioria dos casos, levantamentos bibliográficos, entrevistas e estudos de caso.

para avaliar o polipropileno e os biopolímeros passíveis de substituí-lo, PLA e PHAs, de forma a se avaliar a viabilidade de fabricação de embalagens flexíveis a partir desses biomateriais.

#### 4) ANÁLISES SWOT

De acordo com Dantas e Melo (2008), “a análise SWOT é um sistema simples utilizado para posicionar ou verificar a posição estratégica da empresa ou, neste caso, de um segmento, no ambiente em questão”. A matriz SWOT é uma técnica de administração de extrema importância para o planejamento estratégico de qualquer empreendimento. Ela consiste em quatro quadrantes que destacam suas forças, fraquezas, ameaças e oportunidades, e, dessa forma, analisa aspectos internos e externos (De Paula, 2015).

Por não estar centrada apenas nos aspectos internos, a matriz SWOT é capaz de mapear o cenário no qual determinado empreendimento se encontra, podendo assim, prever tendências mercadológicas fundamentais para a predição do seu potencial de sucesso.

Na criação de uma matriz SWOT, deve-se destacar forças e oportunidades como elementos positivos e fraquezas e ameaças como elementos negativos, lembrando que forças e fraquezas constituem aspectos internos, que não dependem do mercado, mas, exclusivamente, da organização, enquanto oportunidades e ameaças, externos, que dependem da dinâmica do mercado.



Figura 2: Matriz SWOT.  
Fonte: [www.scopi.com.br](http://www.scopi.com.br)

De acordo com Rizzo e Kim (2005), a análise SWOT tem como objetivo determinar a combinação ótima entre esses fatores internos e externos.

Segundo os autores:

- Forças: são recursos ou capacidades únicas que a entidade possui para atingir seus objetivos.
- Fraquezas: são limitações ou defeitos que impedem a entidade de progredir.
- Oportunidades: fatores externos que potencializam as forças inerentes à entidade.
- Ameaças: situações desfavoráveis que impedem as estratégias da entidade, apresentando barreiras em relação aos objetivos definidos pela mesma.

Para que uma análise SWOT seja efetiva, Rizzo e Kim (2005) afirmam que deve ser adotada uma estratégia baseada no aproveitamento de oportunidades a partir do emprego de forças e na abordagem proativa de ameaças, no intuito de corrigir fraquezas. Para tanto, Reissman, Thran e Bezema (2017) alegam que as categorias devem se conectar, de forma a permitir um planejamento que atinja os seguintes objetivos:

- Aproveitar oportunidades que se adequam aos pontos fortes;
- Utilizar as forças para combater ameaças;
- Eliminar fraquezas para possibilitar novas oportunidades;
- Desenvolver defesas para evitar que as fraquezas se tornem alvo de ameaças.

Baseado nas definições de Reissman, Thran e Bezema (2017), o diagrama apresentado na Figura 3 foi confeccionado de forma a padronizar perguntas-chave que foram respondidas na montagem da matriz SWOT de cada produto estudado.

	Fatores Positivos	Fatores Negativos
Fatores internos	<p><b><u>Forças</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Quais as vantagens?</li> <li>- Quais são os fatores apoiando a tecnologia?</li> </ul>	<p><b><u>Fraquezas</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- O que pode ser melhorado?</li> <li>- Que obstáculos impedem o progresso?</li> <li>- Quais pontos precisam de aperfeiçoamento?</li> </ul>
Fatores externos	<p><b><u>Oportunidades</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Quais os benefícios?</li> <li>- Que mudanças na tecnologia atual podem ocorrer?</li> <li>- Mudanças governamentais favorecem a ação?</li> </ul>	<p><b><u>Ameaças</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Quais obstáculos externos a tecnologia pode enfrentar?</li> <li>- O ambiente social e mercadológico ameaça a expansão da nova tecnologia?</li> </ul>

Figura 3: Perguntas-chave para confecção da matriz SWOT.  
 Fonte: Confecção própria com base em Reissman, Thran e Bezema, 2017.

Os dados utilizados para confeccionar as matrizes foram obtidos a partir de pesquisa bibliográfica e documental, como explicitado no capítulo 3.

## 5) POLIPROPILENO (PP)

O polipropileno é um polímero de adição sintetizado a partir do propileno, um subproduto gasoso do refino de petróleo, e é produzido a partir da polimerização por adição desse monômero<sup>6</sup> (Figura 4). Foi polimerizado pela primeira vez em 1951 pelos cientistas Paul Hogan e Robert Banks e o químico italiano Giulio Natta sintetizou a primeira resina de polipropileno através da utilização de catalisadores desenvolvidos para a indústria do polietileno em gás propileno, em 1954. Em 1957, o polímero se tornou bastante popular e começou a ser comercializado por toda a Europa (Creative Mechanisms, 2016).

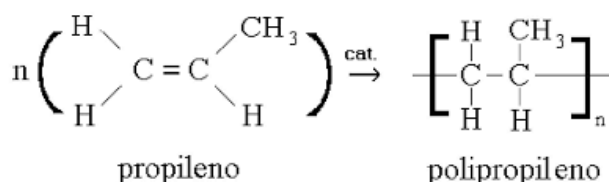


Figura 4: Produção do polipropileno.  
 Fonte: Trombetta, 2010.

<sup>6</sup> Monômero é uma molécula com uma unidade de repetição (Canevarolo, 2006).

Atualmente, é um dos plásticos mais produzidos no mundo e sua versatilidade e adaptabilidade à diversos métodos de fabricação fazem com que esse material seja utilizado em diferentes áreas e sua aplicação continue crescendo ao longo dos anos, desafiando a entrada de materiais alternativos no mercado (BPF, 2019). Por ser um termoplástico de baixo custo e fácil processamento, esse polímero pode ser modificado através de processos de copolimerização e aditivação a fim de adquirir uma vasta gama de propriedades, tendo grande aplicabilidade nas indústrias de embalagens, fibras e moldagem por injeção (Poliversal, 2012).

Devido a sua estrutura semi-cristalina, é um material altamente resistente à flexão e à fadiga, e, por ser uma resina que oferece um bom equilíbrio entre propriedades térmicas, químicas e elétricas, se tornou uma das principais poliolefinas<sup>7</sup> existentes no mercado (Tudo sobre Plásticos, 2016).

Suas excelentes características fazem com que o polipropileno seja um plástico consumido em larga escala, visto que oferece grandes vantagens em relação a outras matérias-primas. Sua baixa densidade garante produtos leves, reduzindo custos de transporte e sua ótima processabilidade torna a produção mais ágil e econômica, garantindo a redução de gastos com materiais, máquinas e mão de obra. A resistência a corrosão, impactos e a baixas temperaturas, além da sua superioridade em transparência, brilho e acabamento superficial fazem com que o polipropileno seja um material de grande interesse comercial.

Apesar de suas características, algumas desvantagens podem explicar a busca por novos materiais que substituam o polipropileno. Por ser um material de origem fóssil, seu custo de produção está suscetível às variações dos preços do petróleo, além de gerar resíduos que podem demorar de 250 a 400 anos para se decompor (Reciclagem dos Plásticos, 2013). Do ponto de vista operacional, o polipropileno é altamente suscetível à oxidação e a mesma pode ocorrer sob condições normais de processamento. Sendo assim, torna-se necessário o uso de aditivos antioxidantes para que o material seja devidamente estabilizado.

---

<sup>7</sup> Poliolefinas são polímeros originários de hidrocarboneto alifático insaturado contendo uma dupla ligação carbono-carbono reativa (Canevarolo, 2006). Possuem fórmula geral  $C_2H_{2n}$ .

## 5.1) Síntese do Polipropileno

A síntetização do polipropileno a partir do propileno ocorre na presença de um catalisador e sob condições controladas de pressão e temperatura (Marie e Calafut, 1998). A polimerização por adição se dá com a ruptura de uma ligação dupla para a formação de duas ligações simples e é constituída de três etapas: iniciação, propagação e terminação. O mecanismo de adição proposto para o polipropileno é mostrado na Figura 5.

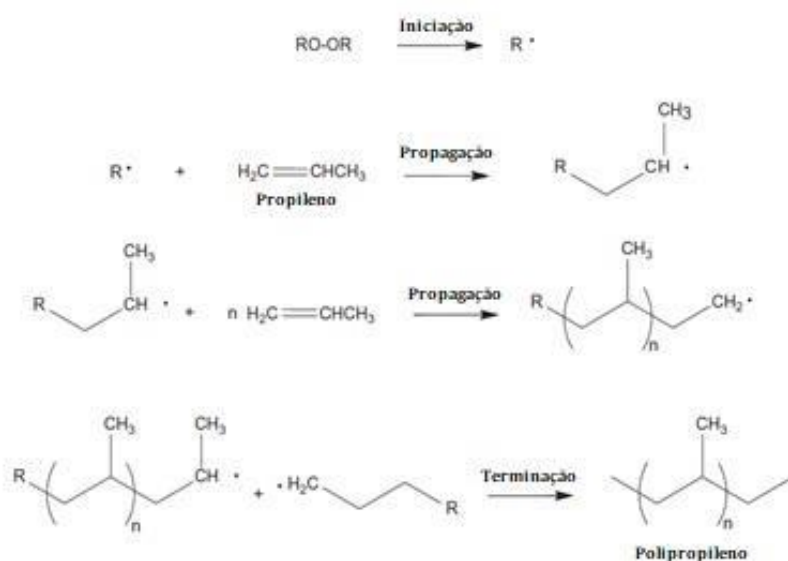


Figura 5: Mecanismo de polimerização por adição para o PP.  
Fonte: Adaptado de *Plastics in Medical Devices*, 2nd Edition.

Na etapa de iniciação, o propileno reage com um sistema catalítico para formar o sítio ativo a partir do qual se dará a reação. Na propagação, a espécie reativa gerada na iniciação incorpora, sucessivamente, moléculas do monômero, através da reação entre o grupo funcional metálico presente na cadeia polimérica e a ligação insaturada do propileno. Assim, é formada uma cadeia longa e linear, na qual grupos metil estão ligados à átomos alternados de carbono.

Na terminação, o sítio reativo reage, espontaneamente ou através da adição de reagentes, interrompendo a propagação do polímero (Maier e Calafut, 1998).

## **5.2) Produção Industrial**

Existem, essencialmente, três tipos de polipropileno: o homopolímero<sup>8</sup>, o copolímero<sup>9</sup> heterofásico e o copolímero estatístico ou rondônico (Petry, 2011). O homopolímero apresenta uma estrutura mais rígida e cristalina, sendo o mais utilizado na indústria de embalagens flexíveis (ABIPLAST, 2019). Os principais métodos de produção industrial podem ser agrupados em polimerização em suspensão, polimerização em massa (*bulk*) e polimerização em fase gasosa. Os processos de última geração, comumente, utilizam sistemas de reatores de fase gasosa ou em massa e são bem conhecidos e otimizados.

A descrição dos principais meios de produção industrial do polipropileno, assim como os catalisadores mais utilizados, são descritos no Apêndice A.

## **5.3) Estrutura de custos e aspectos ambientais do Polipropileno**

Os materiais plásticos tradicionais são de origem fóssil, sendo produzidos a partir do petróleo. Atualmente, há forte dependência do petróleo e seus derivados para atendimento à demanda energética mundial, e, com isso, apenas um percentual de 4% dessa matéria-prima é destinado a produção de plásticos (Braskem, 2013). A cadeia produtiva do plástico é apresentada na Figura 6.

---

<sup>8</sup> Homopolímero é um polímero cuja cadeia principal é formada por um único mero (unidade de repetição) (Canevarolo, 2006).

<sup>9</sup> Copolímero é um polímero cuja cadeia principal é formada por mais dois ou mais meros diferentes. (Canevarolo, 2006).

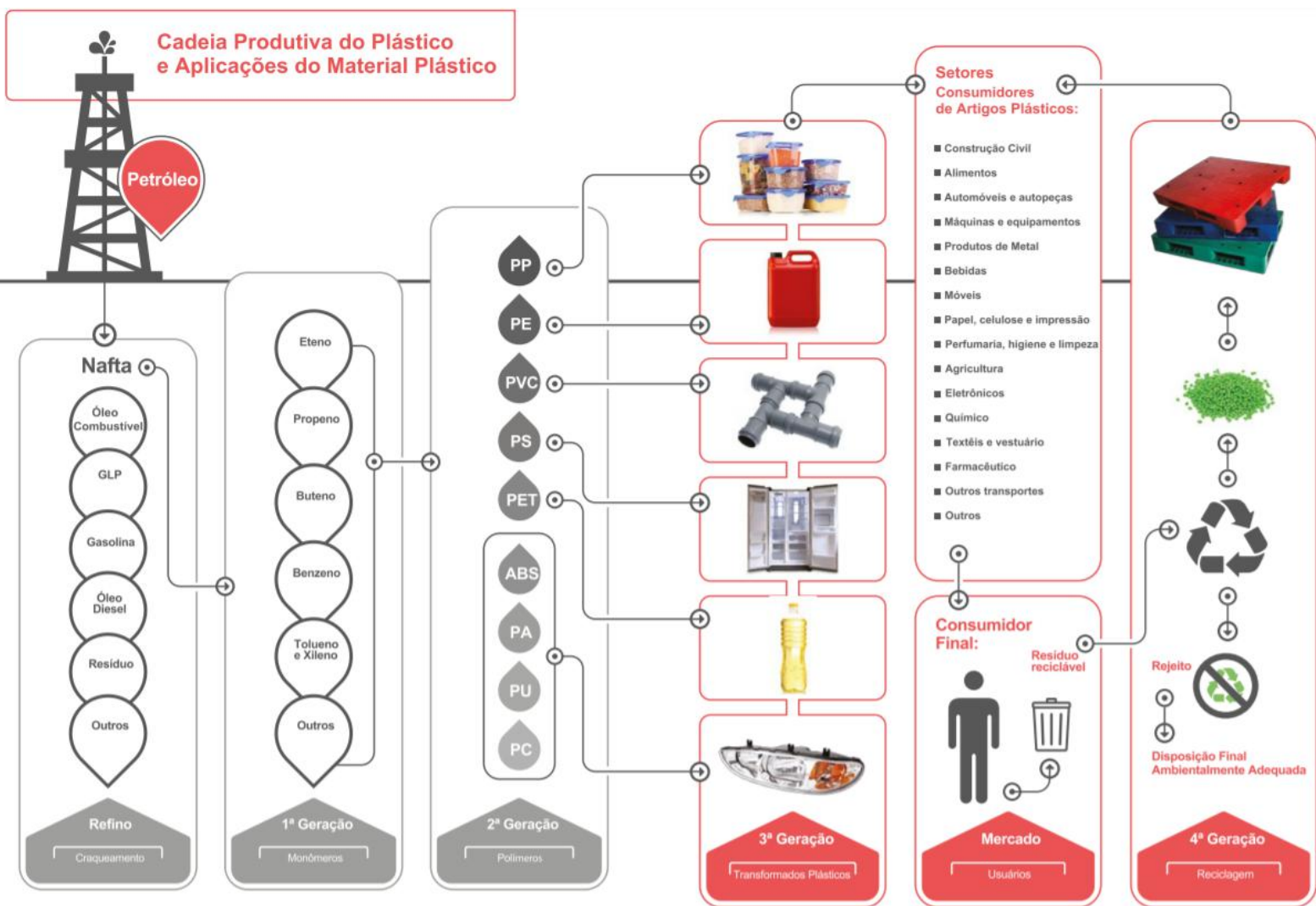


Figura 6: Cadeia produtiva dos plásticos.  
Fonte: ABIPLAST (Associação Brasileira da Indústria do Plástico).

Atualmente, a indústria petroquímica utiliza como insumos principais a nafta, originada do petróleo, e o etano, obtido do gás natural. A matéria-prima utilizada afeta diretamente o perfil dos petroquímicos básicos obtidos. A Figura 7 apresenta o percentual de polipropileno produzido a partir da nafta e a partir do etano.



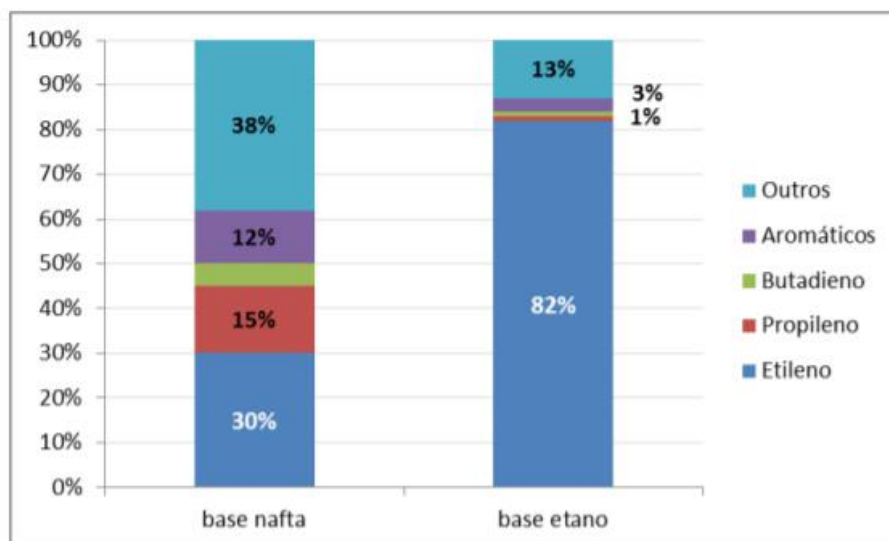


Figura 7: Comparativo entre o perfil de produção de unidades de craqueamento base etano e base nafta.

Fonte: EPE (Empresa de Pesquisa Energética), 2018.

O uso do etano como matéria-prima tem sido tendência mundial, visto que é proveniente do gás natural, o que aumenta sua disponibilidade e diminui seu preço. No passado, o propileno era visto apenas como um co-produtor na produção de eteno, mas o aumento pela demanda desse composto, aliado ao crescente uso do etano como base petroquímica, levou à necessidade de novos meios de produção *on-purpose*<sup>10</sup>. Esse novo cenário levou a uma alteração na precificação do propileno para uma dinâmica de produtor marginal, sendo o produtor marginal, geralmente, o asiático (Braskem, 2019).

O polipropileno é produzido a partir do propileno. Sendo assim, a precificação desse material é baseada no custo dessa matéria-prima. Como o propileno tem origem fóssil, está diretamente ligado ao petróleo, sofrendo com suas oscilações e incertezas, causadas tanto por razões econômicas, quanto políticas. Além disso, a indústria do polipropileno tem experimentado algumas tendências significativas, que influenciam diretamente no seu mercado global, tais como a diminuição do crescimento petroquímico convencional, o aumento

<sup>10</sup> Produção *on-purpose*: produção de propileno a partir do propano através de desidrogenação de propano (PDH), craqueamento de olefinas, carvão e metanol para obtenção de olefinas e “methatesis process”, que consiste em reações para a fração C-4 do refino do petróleo a fim de maximizar a obtenção de propileno. (EIRIZ, 2017).

da produção de propileno a partir de meios *on-purpose*, a expansão da participação de empresas privadas no mercado e a queda do investimento estrangeiro, à medida que as empresas investem nas capacidades de produção doméstica (Global Polypropylene Market Outlook, 2017). Essas tendências, aliadas às baixas nos preços do barril do petróleo nos últimos anos, têm causado um declínio significativo nos preços do polipropileno, como mostrado na Figura 8 (Global Polypropylene Market Outlook, 2017).

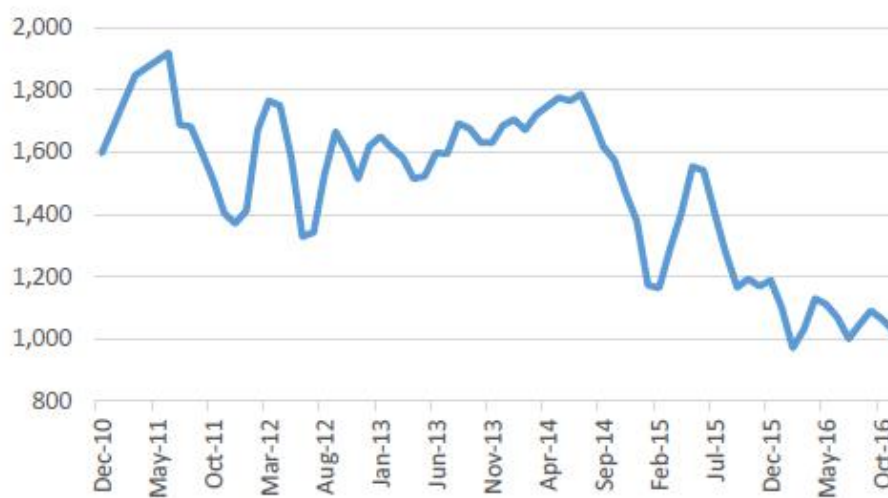


Figura 8: Preços globais do polipropileno, USD por tonelada.  
Fonte: GLOBAL POLYPROPYLENE MARKET OUTLOOK, 2017.

Apesar dos baixos preços do polipropileno, a questão ambiental tem motivado a busca por materiais mais sustentáveis. Os plásticos têm sido considerados grandes vilões ambientais, visto que sua degradação pode demorar séculos, fazendo com que se acumule em grandes quantidades no meio ambiente e interferindo diretamente com a flora e a fauna. O polipropileno é utilizado em aplicações de vida curta<sup>11</sup>, tais como embalagens, o que implica que uma grande quantidade de resíduo é gerada em um curto período de tempo. Sendo assim, há uma crescente preocupação com a disposição final desses resíduos. Visto que é um polímero termoplástico, o polipropileno pode ser remoldado quando submetido a temperaturas elevadas, o que faz com que seja

<sup>11</sup> Plástico de vida-curta é aquele que usualmente descartado em um prazo máximo de 2 anos (PLASTIVIDA).

passível de ser reciclado. A reciclagem desses materiais apresenta diversos benefícios como “a economia de energia, a preservação de fontes esgotáveis de matéria-prima, a redução de custos com disposição final do resíduo, a economia com a recuperação de áreas impactadas pelo mau acondicionamento dos resíduos, o aumento da vida útil dos aterros sanitários, a redução de gastos com a limpeza e a saúde pública e a geração de emprego e renda” (Spinacé e De Paoli, 2005, p.70). Na Europa, o índice de reciclagem de plásticos é de 31,1% (Plastics Europe, 2018), ultrapassando o percentual desse material depositado em aterros, porém, no Brasil, a maioria das empresas de reciclagem são de pequeno porte e, por isso, a separação é feita, majoritariamente, de forma manual (Spinacé e De Paoli, 2005), o que dificulta o processo de reaproveitamento desses materiais. A Associação Brasileira da Indústria do Plástico calcula que 25,8% dos plásticos de vida curta produzidos são reciclados no país (ABIPLAST, 2017), porém, de acordo com a ONG internacional WWF, apenas 1,28% de todo o plástico produzido no Brasil é efetivamente reinserido na cadeia de valor, e os dois principais motivos são a falta de tecnologia adequada e o baixo valor de mercado do plástico reciclado (Braskem, 2019). Devido às dificuldades de logística e à viabilidade econômica dos processos, a geração de plásticos recicláveis tem ultrapassado a capacidade de conversão desses materiais em produtos utilizáveis, fazendo com que grande parte dos resíduos seja depositado no ambiente. Em 2005, o polipropileno já se encontrava entre os principais termoplásticos presentes nos resíduos das grandes cidades brasileiras (Figura 9) (Spinacé e De Paoli, 2005).

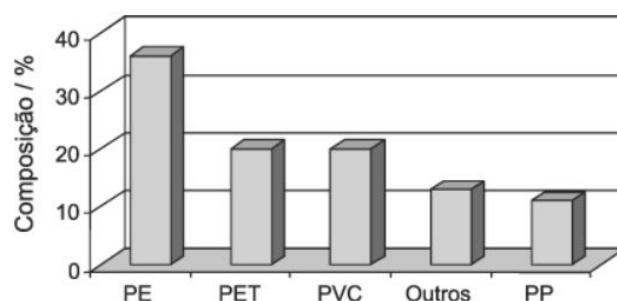


Figura 9: Principais termoplásticos encontrados nos resíduos urbanos brasileiros.  
Fonte: Spinacé e De Paoli (2005).

Além da reciclagem, outro destino final para os materiais plásticos é a

incineração. A queima de plásticos libera substâncias perigosas, como metais pesados, poluentes orgânicos persistentes e resíduos de cinzas para o ar. Esses poluentes contribuem para o desenvolvimento de asma, câncer e distúrbios endócrinos. Os poluentes orgânicos persistentes são capazes de viajar longas distâncias até que são depositados no oceano e nas calotas polares, onde podem adsorver-se em outros detritos plásticos marinhos e em microplásticos, ameaçando a saúde marinha e a humana. Apesar de plantas, atualmente em operação, utilizarem tecnologias para queimar o plástico e transformá-lo em energia, sua construção e operação são extremamente caras. Além disso, essas usinas têm o potencial de emitir poluentes tóxicos, visto que empregam purificadores, precipitadores e filtros sofisticados que, de acordo com um relatório publicado em 2017 pelo Conselho Mundial de Energia, "são úteis desde que as plantas de combustão sejam adequadamente operadas e controladas" (National Geographic, 2019).

#### **5.4) Ambiente de mercado**

##### **5.4.1) Indústria mundial**

Apesar de sua produção comercial ser datada da década de 1950, o polipropileno atingiu a primeira posição em consumo em meados da década de 1990, sendo, atualmente, o segundo maior mercado de polímeros do mundo, representando mais de 25% da demanda global (Global Polypropylene Market Outlook, 2017). O gráfico apresentado na Figura 10 representa a evolução da demanda mundial de termoplásticos.

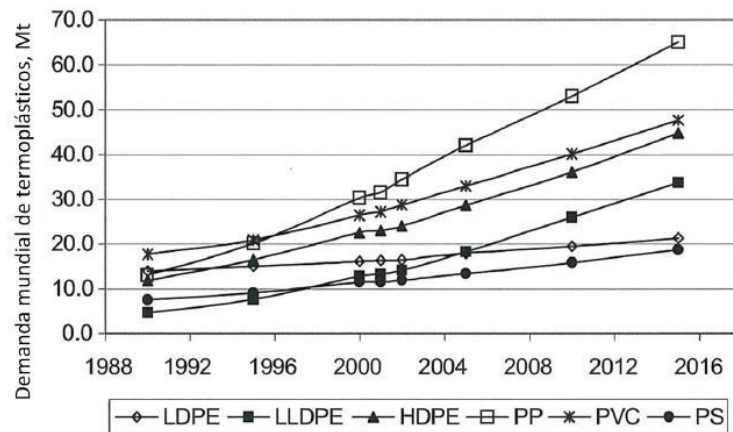


Figura 10: Demanda mundial dos principais termoplásticos.  
Fonte: Petry, 2011.

O crescimento da demanda global de PP vem sendo liderado pelas economias emergentes, principalmente pela China, e é esperada a chegar a aumentar para 120 milhões de toneladas até 2030, ante 60 milhões de toneladas em 2015 (Global Polypropylene Market Outlook, 2017). Apesar disso, a oferta global dessa resina tem projeções de aumentar significativamente nos próximos anos, intensificando a concorrência entre os produtores. Matérias-primas não convencionais de baixo custo estão impulsionando novos investimentos em capacidade na América do Norte (gás de xisto) e China (carvão), fazendo com que regiões menos competitivas tenham que se adaptar por meio de racionalizações de insumos ou de inovações de produtos e processos.

A China é, atualmente, a principal produtora de polipropileno, apresentando uma participação de 27% na produção global total em 2016. A Ásia, excluindo a China, vem logo em seguida, com um percentual de 25% da produção total (Plastics Insight, 2017). O mercado do polipropileno é altamente dependente do preço das *commodities*<sup>12</sup> e a concorrência é considerada uma das mais altas dentre materiais poliméricos. Os líderes mundiais desse mercado são gigantes industriais como: BASF, Borealis AG, Braskem, Chevron Phillips Chemical Company, DuPont, ExxonMobil, Reliance Industries Limited, Sinopec,

<sup>12</sup> Commodities são artigos de comércio; bens que não sofrem processos de alteração (ou que são pouco diferenciados). Como seguem um determinado padrão, o preço das commodities é negociado nas Bolsas de Valores Internacionais. Portanto, seus preços são fixados a nível global pelo mercado internacional (MENEZES, 2015).

LyondellBasell Industries, SABIC, Bayer Material Science, Fulton Pacific, INEOS, Total SA, Washington Penn Plastic Company Inc., PetroChina Company Limited, Qatar Petroquímica Company e Japan Polypropylene Corporation.

Levando em conta uma série de fatores, a maioria dos especialistas concorda que essas empresas manterão suas posições até 2022 (Global Polypropylene Market Outlook, 2017). A Figura 11 apresenta a quantidade de polipropileno produzida, em milhões de toneladas, pelas 10 principais empresas fabricantes desse polímero.

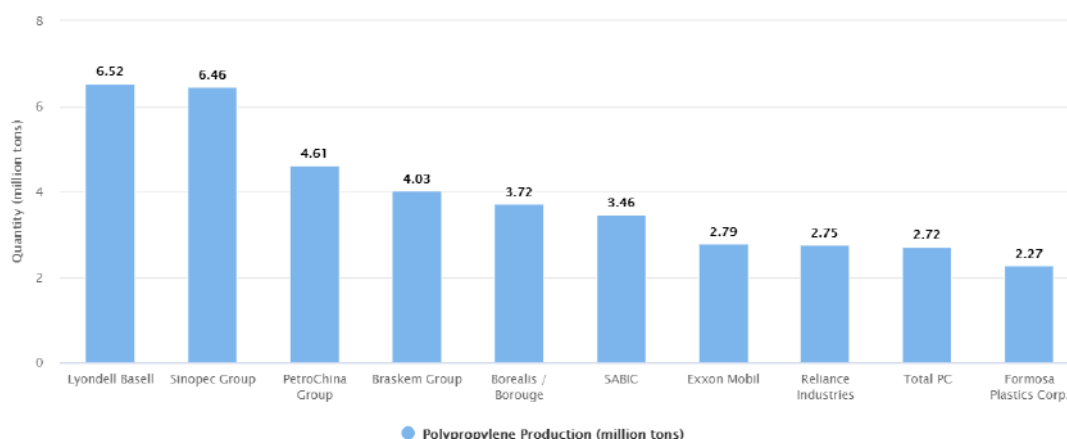


Figura 11: 10 principais empresas produtoras de polipropileno.  
Fonte: PLASTICS INSIGHT, 2017.

#### 5.4.2) Indústria brasileira

O polipropileno foi inicialmente produzido na América Latina pela empresa Polibrasil, em 1978, no Pólo Petroquímico de Capuava, o primeiro pólo petroquímico do Brasil. Em 2010, era produzido por duas empresas, Braskem e Quattor, porém, desde a compra da Quattor pela Braskem nesse mesmo ano, essa vem sendo a única produtora de polipropileno no país. Atualmente, o polipropileno é uma das resinas termoplásticas mais consumidas no Brasil, representando um percentual de 20,3% (ABIPLAST, 2018), como mostrado na Figura 12.

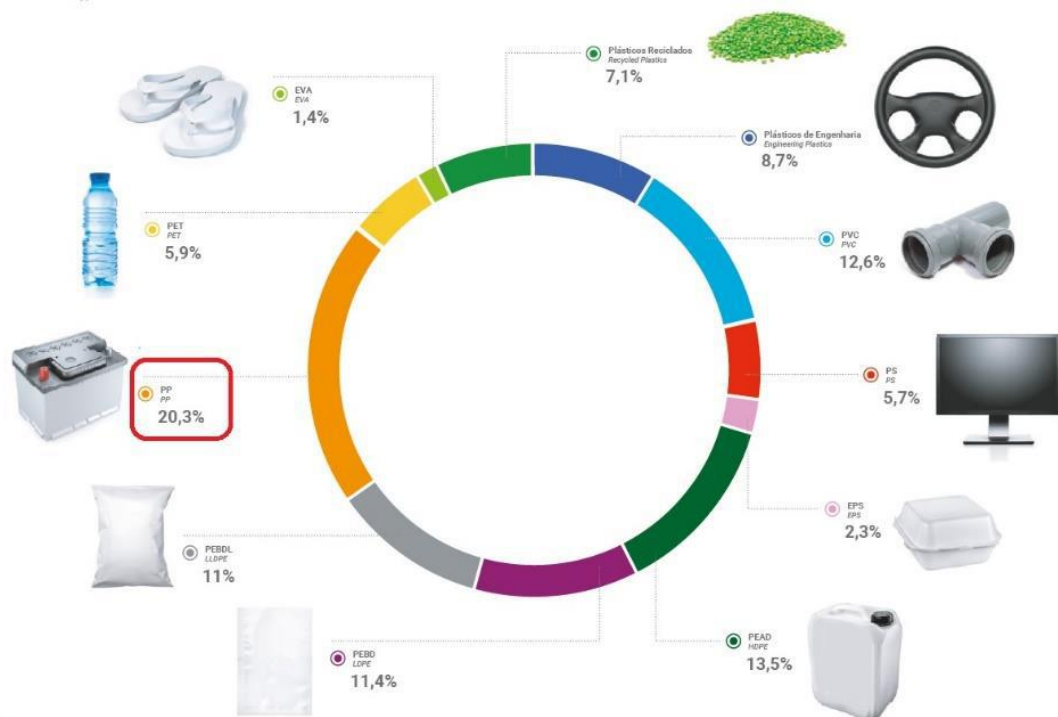


Figura 12: Principais resinas consumidas no Brasil (%) e exemplos de aplicações.  
Fonte: ABIPLAST, 2018.

A produção nacional de polipropileno tem importância estratégica, visto que é um grande consumidor de propileno, gerado nas centrais petroquímicas. A Braskem tem uma capacidade de produção anual de 1,8 milhões de toneladas desse material sendo que, dentre as unidades produtivas da empresa, a unidade em Paulínia (SP), com capacidade de 380 mil toneladas por ano, utiliza o gás de refinaria como matéria-prima, reduzindo a dependência da nafta (EPE, 2018). A Figura 13 apresenta os dados de produção, demanda, importação e exportação de polipropileno nacional.

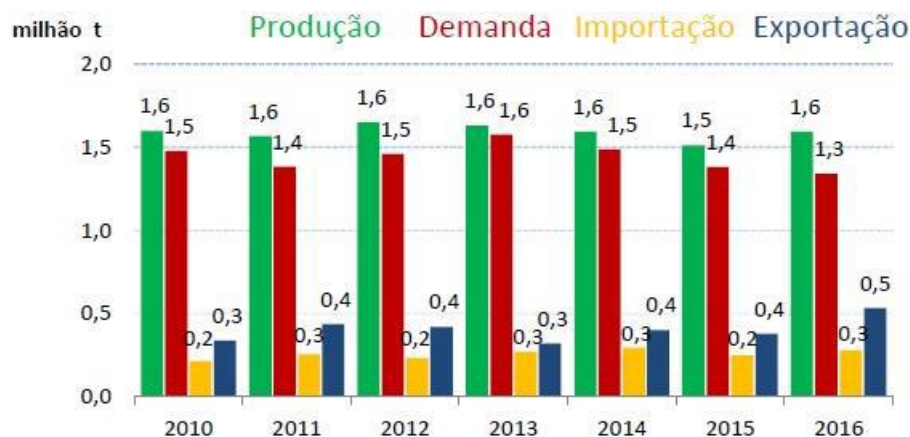


Figura 13: Produção, demanda, importação e exportação de polipropileno.  
Fonte: Panorama do Refino e da Petroquímica no Brasil, 2018.

Desde a instituição da Braskem como única produtora de polipropileno no país, a produção dessa resina vem apresentando níveis constantes. Além disso, a produção nacional é superior à demanda e, apesar de toda a resina ser chamada de polipropileno, diferentes classes (*grades*<sup>13</sup>) são produzidas para diferentes aplicações. Dessa forma, o Brasil exporta alguns destas classes e importa outros, sendo exportador líquido de PP.

### 5.5) Matriz SWOT

A matriz SWOT para o polipropileno é apresentado na Figura 14.

<sup>13</sup> Grades: Classes de resinas com características e propriedades distintas (EPE, 2018).



	Fatores Positivos	Fatores Negativos
Fatores internos	<u>Forças</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Grande versatilidade</li> <li>- Consolidação no mercado</li> <li>- Processo de fabricação otimizado</li> <li>- Baixos preços</li> </ul>	<u>Fraquezas</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dependência do petróleo</li> <li>- Grande impacto ambiental devido ao descarte inapropriado</li> </ul>
Fatores externos	<u>Oportunidades</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Produção <i>on-purpose</i></li> <li>- Ganhos em escala</li> <li>- Investimentos na indústria de reciclagem</li> </ul>	<u>Ameaças</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Políticas governamentais agressivas</li> <li>- Surgimento de biopolímeros</li> </ul>

Figura 14: Matriz SWOT para o PP.  
Fonte: Fabricação própria.

#### 5.5.1) Forças

Devido às suas propriedades químicas e físicas, o polipropileno pode ser empregado em diversas aplicações, possuindo grande adaptabilidade a diferentes métodos de processamento. Além disso, através de processos de copolimerização e aditivação, esse material adquire ampla aplicabilidade em diferentes segmentos da indústria, desde embalagens e têxteis até o setor automobilístico.

Os processos de fabricação industrial desse material são bastante conhecidos e otimizados, com condições brandas de operação e catalisadores capazes de produzir os vários tipos de polipropileno com altos rendimentos e estereoespecificidade. Os novos meios de produção de propileno a partir do propano proveniente do gás natural também vêm barateando o processo, visto que esse insumo é mais barato do que a nafta, e, com isso, o polipropileno tem apresentado um declínio em seus preços.

Por sua vasta gama de aplicações, a resina de polipropileno vem sendo uma das resinas termoplásticas mais consumidas no mundo, garantindo assim, sua consolidação no mercado de transformados plásticos.

### 5.5.2) Fraquezas

Apesar de possuir grande versatilidade e baixos preços, o polipropileno é um produto de origem fóssil, sendo assim, fortemente dependente do petróleo. Por essa razão, a volatilidade dos preços desse insumo faz com que os preços do PP também apresentem grande variabilidade.

Além disso, por ser um petroquímico, esse material não apresenta biodegradabilidade, podendo permanecer no ambiente por séculos, causando impactos significativos. O polipropileno é um material reciclável, e, apesar de os índices de reciclagem nos principais países europeus estarem aumentando ao longo dos anos, o Brasil ainda não possui tecnologia suficiente para que essa prática seja realizada efetivamente.

A incineração dos resíduos plásticos também não se apresenta como uma boa solução para o acúmulo de polipropileno no meio ambiente, visto que libera diversos gases, que além de tóxicos para a humanos e animais, contribuem para mudanças climáticas.

### 5.5.3) Oportunidades

Devido ao surgimento de novos meios de produção *on-purpose*, países produtores de polipropileno, principalmente a China e a América do Norte, vêm aumentando sua capacidade instalada e, com o aumento da oferta desse material, seus preços tendem a baixar ainda mais.

O investimento na indústria de reciclagem apresenta grande potencial, visto a preocupação atual com a preservação ambiental. A reciclagem, além de diminuir o acúmulo de materiais no ambiente, gera energia e empregos, além permitir a recuperação de monômeros que podem ser reutilizados como matéria-prima para a indústria química. Uma melhoria nos métodos de coleta seletiva e uma otimização dos processos de reciclagem aparecem como uma oportunidade para influenciar o surgimento de novas empresas especializadas nesse setor, aumentando, assim, o percentual de materiais reciclados no país e no mundo.

#### 5.5.4) Ameaças

A crescente preocupação com o acúmulo de plásticos no meio ambiente tem feito com que os governos de diversos países tomem medidas agressivas acerca da produção e utilização desse material. Países da União Européia proibirão o uso de plásticos descartáveis a partir de 2021 e 187 países já acordaram, junto a ONU, o compromisso de diminuir a produção do plástico de uso único, fomentar pesquisas no sentido de descobrir alternativas, e investir em reciclagem.

Como consequência desses fatores, o número de projetos de pesquisa acerca de novos materiais biodegradáveis para a substituição do plástico vem aumentando significativamente. Apesar de serem mais caros e ainda não possuírem consolidação no mercado, o fato de não serem dependentes do petróleo e possuírem alta degradabilidade faz com que os biopolímeros se apresentem como uma alternativa real ao uso de plásticos, tais como o polipropileno.

### **6) POLIPROPILENO NA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS**

A versatilidade do polipropileno permite seu emprego em diversas aplicações e, de acordo com o último relatório da empresa de pesquisa de mercado Ceresana (2018), é esperado que as receitas geradas por esse tipo de plástico apresentem um crescimento médio de 4,9% por ano até o ano de 2026.

A indústria de embalagens é responsável por, pelo menos, a metade do consumo mundial desse polímero (Reso Ambiental, 2015), cuja principal utilização está nas embalagens flexíveis, que concorrem ou substituem embalagens de papelão ou alumínio, garantindo maior resistência e oferecendo maior tempo de vida à produtos perecíveis. Por ser química e biologicamente inerte, o polipropileno tem autorização do Ministério da Saúde para ter contato com diversos tipos de produtos, incluindo fármacos e alimentos.

Além de suas características intrínsecas, seu baixo peso molecular faz com que as embalagens produzidas sejam mais leves, barateando custos de transporte e, conseqüentemente, gerando menos custos em seus processos

produtivos. Em 2018, a indústria de embalagens flexíveis foi o principal mercado de vendas do polipropileno, com um total de 16,4 milhões de toneladas do material sendo processadas em filmes, sacolas e sacos (CERESANA, 2018).

As embalagens plásticas de polipropileno são produzidas por empresas transformadoras de plásticos. Na continuidade da cadeia, são vendidas para indústrias as quais as utilizam para embalar seus produtos, tais como de alimentos e cosméticos, ou, diretamente, para o consumidor final, como descrito na Figura 15.

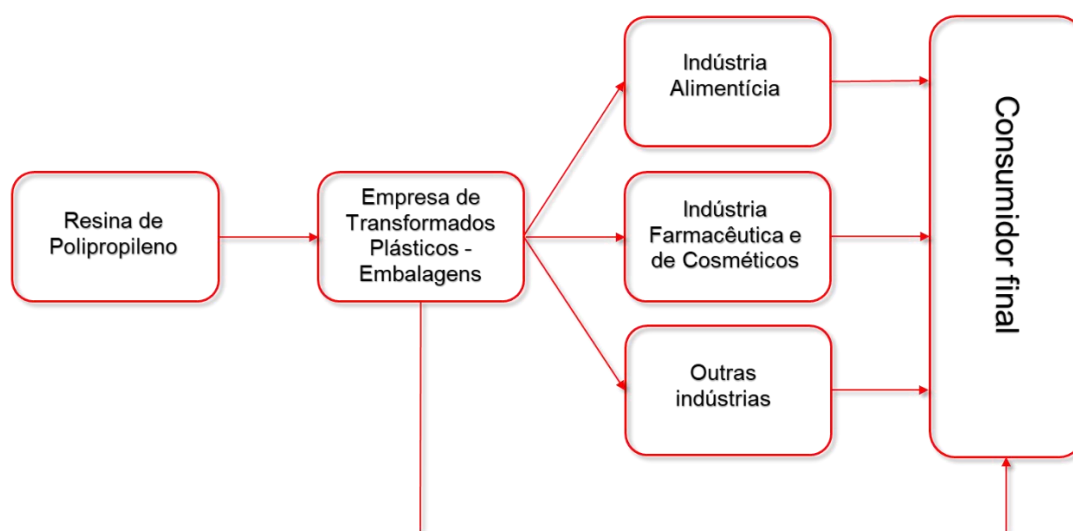


Figura 15: Cadeia evolutiva de embalagens.  
Fonte: Adaptado de Martins et al., 2014.

Os filmes de polipropileno biorientado (BOPP) são amplamente utilizados na fabricação de embalagens flexíveis, visto que apresentam excelentes características mecânicas e estéticas, além de serem leves e fáceis de imprimir e laminar. São utilizadas em produtos como salgadinhos, biscoitos, sopas instantâneas, barrinhas de cereais, rótulos de garrafas PET, ovos de páscoa, batata palha, e outros. O processo de manufatura dessas embalagens é descrito no Apêndice B.

## **6.1) Mercado**

### **6.1.1) Mercado Mundial**

Em comparação com outros tipos de embalagens, consumidores e

fabricantes têm demonstrado grande preferência pelas embalagens plásticas, devido ao seu baixo custo de produção, leveza e fácil manuseio.

A indústria de embalagens plásticas foi avaliada em 334,31 bilhões de dólares em 2018, e espera-se um crescimento global de 3,47% por ano no período de 2019 a 2024 (Mordor Intelligence, 2018), sendo as olefinas e poliolefinas, os materiais mais utilizados nessa indústria, como mostrado na Figura 16 (Plastics News, 2019).

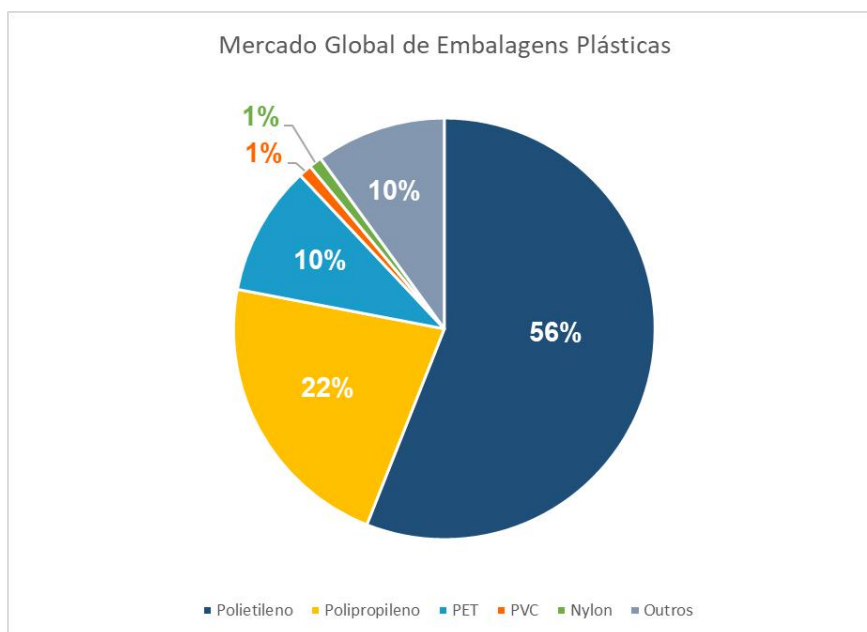


Figura 16: Principais materiais utilizados no mercado global de embalagens plásticas.  
Fonte: Adaptado de Wood Mackenzie, 2018 apud Plastics News, 2019.

Embalagens flexíveis oferecem diversas vantagens em detrimento a embalagens rígidas, como maior facilidade de manuseio e descarte, melhor custo-benefício, maior apelo visual e maior conveniência e, por isso, têm se apresentado como favoritas no mercado de embalagens mundial. A indústria de alimentos é a principal consumidora de embalagens flexíveis de plástico (Arizton Advisory & Intelligence, 2019) e o polipropileno é o segundo principal material utilizado na confecção dessas embalagens, representando um total de 22% de todos os materiais (Nonclercq, 2016).

O consumo de embalagens plásticas flexíveis será avaliado em mais de US\$ 85 bilhões em 2019, e, com a crescente demanda nos principais setores, como alimentos e bebidas, elétrico e eletrônico e e-commerce, deve-se esperar um crescimento global anual de 5,2% entre 2018 e 2028 (Future Market Insights,

2018).

A região Ásia-Pacífico possui a maior participação no mercado global de embalagens plásticas flexíveis, que é impulsionado principalmente pelo domínio da região Ásia-Pacífico na produção de plásticos, alto investimento na instalação de novas fábricas e pelo crescimento da indústria de alimentos e bebidas, principal consumidora desse tipo de embalagens, sendo que as principais empresas atuando nesse mercado incluem Amcor Limited, com sede no Reino Unido, Constantia Flexibles Group e Mondi Group, com sedes na Áustria, Huhtamaki Group, com sede na Finlândia e Sealed Air Corporation, Sonoco Products Co., Coveris Holdings S.A., Bemis Company, Inc. e Ampac Holdings LLC, com sedes nos Estados Unidos.

A indústria de embalagens flexíveis tem passado por transformações que afetam diretamente sua produção e consumo. De acordo com Coelho (2016), o termo Indústria 4.0 descreve uma visão na qual as fábricas do futuro serão muito mais inteligentes, flexíveis, dinâmicas e ágeis. O autor ainda afirma que “o impacto da Indústria 4.0 vai para além da simples digitalização, passando por uma forma muito mais complexa de inovação baseada na combinação de múltiplas tecnologias, que forçará as empresas a repensar a forma como gerem os seus negócios e processos, como se posicionam na cadeia de valor e como pensam no desenvolvimento de novos produtos e os introduzem no mercado, ajustando as ações de marketing e de distribuição”. Mais do que procurar produtos, o cliente procura experiências e tudo é considerado na hora da compra, desde a embalagem, até comentários em redes sociais. Sendo assim, em seu relatório “*Global Packaging Trends 2019*”, a agência de inteligência de mercado Mintel identificou novas tendências para o setor, com destaque para a personalização e para a sustentabilidade. A Indústria 4.0 possibilita uma produção individualizada com os custos da produção em massa, permitindo o atendimento de desejos específicos e individuais. Ao mesmo tempo, prevê a utilização de materiais mais inteligentes e, visto que com a crescente preocupação do consumidor com a poluição plástica, as marcas vêm sendo forçadas a buscar novas matérias-primas para suas embalagens. Neste cenário, surgem oportunidades para novos modelos de negócio, tais como a Bioeconomia, com a introdução de recursos de base biológica no mercado global de embalagens flexíveis.

### 6.1.2) Mercado Nacional

No Brasil, o mercado de embalagens plásticas flexíveis foi um dos menos afetados pela crise econômica. Embora a produção tenha caído 1,6%, o faturamento teve uma alta de 8,4%, atingindo R\$ 19,6 bilhões. Em 2015, 32% das matérias-primas plásticas transformadas foram destinadas a produção de embalagens flexíveis e, como mostrado na Figura 17, 16% dessas embalagens foram constituídas de polipropileno, sendo a indústria de alimentos sua principal consumidora, com uma participação de 23% (ABIEF, 2016).

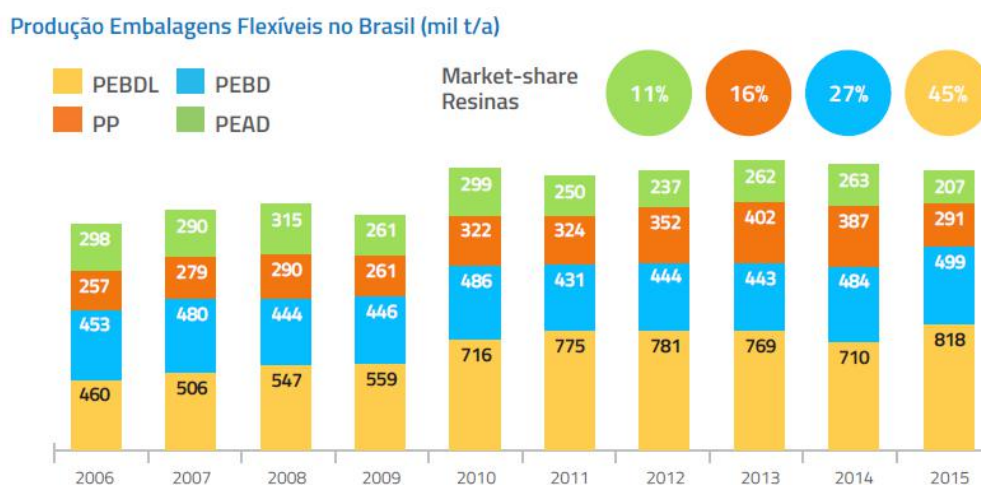


Figura 17: Produção de embalagens flexíveis no Brasil.

Fonte: Associação Brasileira da Indústria de Embalagens Plásticas Flexíveis, 2016.

A retração da economia brasileira acirrou a concorrência durante o ano de 2015 e impactou diretamente na rentabilidade do setor de embalagens plásticas flexíveis. Para voltar a crescer em um cenário ainda de incertezas, o setor deve apostar em novas estratégias. Os produtos brasileiros possuem competitividade fora do país, principalmente em destinos na América do Sul e Europa, o que faz com que a exportação seja uma alternativa interessante para a manutenção de resultados positivos. Já a inovação deve vir de forma colaborativa, envolvendo toda a cadeia em busca de soluções que sejam percebidas pelo consumidor por seu valor agregado. Novas tendências mostram uma demanda por produtos mais sustentáveis, que facilitem a reciclagem ou que tenham outra origem que não fóssil, apontando um cenário positivo para o crescimento da Bioeconomia no Brasil.

## **6.2) Aspectos ambientais**

Embalagens plásticas oferecem diversos benefícios em relação à sustentabilidade quando comparadas com outras formas de embalagens. A produção, distribuição e o uso desses materiais consome menos energia e recursos naturais, emite menos gases do efeito estufa, aumenta a vida útil de produtos e facilita o transporte, usando menos combustível e gerando menor emissões.

Apesar disso, embalagens plásticas são, geralmente, constituídas por mais de um tipo de polímero, o que torna sua reciclagem bastante complexa. No Brasil, estima-se que um quinto do lixo seja composto por embalagens, ou seja, 25 mil toneladas de embalagens são descartadas em depósitos de lixo (MMA, 2019). Atualmente, 68% das embalagens produzidas são de plástico (ABRE, 2018), o que indica um total de, aproximadamente, 17 mil toneladas de embalagens plásticas depositadas no ambiente. Assim, o volume de resíduos plásticos gerados pela utilização e descarte de embalagens é vultoso e o baixo índice de reciclagem desses materiais se destaca como uma fraqueza essencial no modelo de Economia Circular.

A incineração de embalagens plásticas é vista como uma alternativa para o acúmulo de embalagens plásticas no ambiente. Porém, estima-se que, globalmente, a queima dessas embalagens seja responsável pela emissão de 16 milhões de toneladas de GEE ao ar (GAIA, 2019). Novas tecnologias "de plástico para combustível", como a gaseificação e a pirólise, vêm emergindo como estratégias para mitigar as mudanças climáticas, porém, especialistas temem que, em países que não possuem leis ambientais rigorosas, o controle de emissões não seja tão efetivo quanto o prometido (National Geographic, 2019).

Considerando os desafios associados à reciclagem e os efeitos negativos da incineração de embalagens plásticas, a Bioeconomia se apresenta como um modelo promissor, tendo como base a implementação de bioplásticos na cadeia produtiva do setor de embalagens plásticas flexíveis.



## 7) BIOECONOMIA

O conceito de Bioeconomia remete à exploração sustentável de recursos biológicos renováveis e baseia-se em três principais áreas: produção de alimentos, produtos de base biológica e bioenergia, conhecidas como os “três pilares” da Bioeconomia. Tem como objetivo associar avanços da biotecnologia à inovação e ao “*crescimento verde*” através do uso de biomassas e bioprocessos inovadores para produzir produtos sustentáveis, criar empregos e renda, além de combater desafios globais, como mudanças climáticas (OECD, 2013).

Com a crescente preocupação acerca de problemáticas decorrentes das mudanças demográficas e do clima, que já se fazem perceptíveis em todo o planeta, novas estratégias econômicas vêm surgindo com a intenção de trazer menos impactos ao meio ambiente e ofertar, sempre que possível, soluções aos problemas de poluição já enfrentados, considerando a necessidade de preservação e recuperação dos ecossistemas.

Uma dessas estratégias é a Economia Circular, a qual a Fundação Ellen MacArthur define como um modelo que busca “dissociar a atividade econômica do consumo de recursos finitos”. Devido a difusão dessa estratégia econômica mundialmente, é importante discutir sua relação com a Bioeconomia. Vários autores sugerem que ambos os conceitos deveriam ser totalmente integrados, ou que a Bioeconomia é simplesmente uma parte da Economia Circular, porém, Carus & Dammer (2018) desfazem essa interpretação, trazendo a ideia de complementariedade. Segundo os autores, a Economia Circular e a Bioeconomia possuem uma interseção, chamada de “Bioeconomia Circular”, mas a Economia Circular foca no aumento da eficiência dos recursos nos processos e no uso de materiais reciclados para reduzir a utilização de carbono fóssil adicional (incorporado no material ou emitido durante os processos de fabricação/extração), enquanto que a Bioeconomia substitui o carbono fóssil pelo carbono renovável, proveniente da biomassa da agricultura, silvicultura e ambiente marinho (incluindo subprodutos e resíduos).

Além disso, muitos elementos da Bioeconomia ultrapassam os conceitos da economia circular. A Figura 18 demonstra o caminho percorrido pela

biomassa até se tornar um bioproduto. Os itens nas caixas verdes e cinzas descrevem características específicas da Bioeconomia, tais como novos desenvolvimentos na agricultura e silvicultura, novas vias de processamento com menor toxicidade e produtos químicos menos agressivos, biotecnologia, produtos químicos e materiais com novas propriedades e funcionalidades, além produtos de base biológica mais saudáveis e sustentáveis. Subprodutos e resíduos biológicos podem ser reutilizados através da reutilização em cascata e da reciclagem orgânica, que são partes da 'Bioeconomia Circular'. O conceito de cascata fecha a lacuna entre a utilização da biomassa na Bioeconomia e o gerenciamento de resíduos na Economia Circular. Um relatório da Comissão Europeia publicado em março de 2016 define o uso em cascata como sendo o uso eficiente de recursos através da reutilização de resíduos e materiais reciclados para aumentar a quantidade de biomassa total disponível dentro de um determinado sistema, minimizando, assim a demanda por matéria-prima fresca. O uso em cascata da biomassa melhora a sustentabilidade e a circularidade da Bioeconomia, aumentando a quantidade de biomassa disponível e mantendo o carbono incorporado em aplicações materiais por mais tempo.

## Bioeconomia: mais que Economia Circular

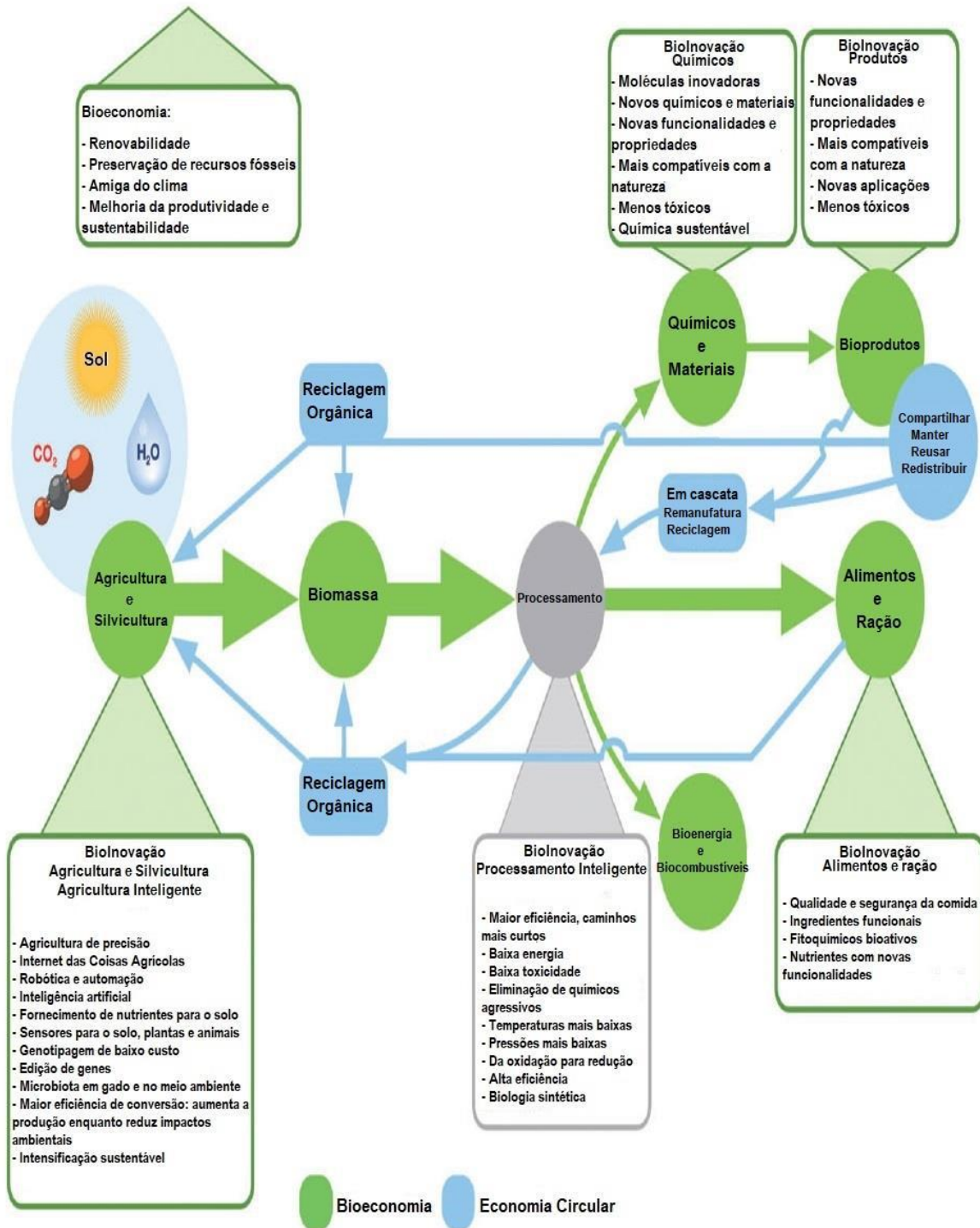


Figura 18: Bioeconomia: mais que uma Economia Circular.  
Fonte: Adaptado de Carus & Dammer, 2018.

O modelo da Bioeconomia surgiu pela primeira vez como um conceito político dentro da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) no início do século XXI e, atualmente, diversos países vem avançando na implementação de estratégias nacionais de bioeconomia. O relatório *“Innovation for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe”*, lançado em 2012, revela uma estratégia a partir da qual a Comissão Europeia espera obter um crescimento significativo proveniente da produção primária sustentável, do processamento de alimentos, da biotecnologia industrial e das biorrefinarias, fatores que podem estimular o aparecimento de novas indústrias de base biológica e a abertura de novos mercados para seus produtos. No mesmo ano, o governo americano divulgou o *“National Bioeconomy Blueprint”*, com dois principais propósitos: estabelecer objetivos estratégicos para ajudar a alcançar todo o potencial da bioeconomia nos EUA e destacar realizações iniciais em relação a esses objetivos. O plano previa a inclusão de novos materiais no mercado, tais como combustíveis líquidos de CO<sub>2</sub> e plásticos biodegradáveis derivados de biomassa renovável.

No Brasil, o Plano de Ação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Bioeconomia (2018, p.12) define a Bioeconomia como sendo “o conjunto de atividades econômicas baseadas na utilização sustentável e inovadora de recursos biológicos renováveis (biomassa), em substituição às matérias-primas fósseis, para a produção de alimentos, rações, materiais, produtos químicos, combustíveis e energia produzidos por meio de processos biológicos, químicos, termoquímicos ou físicos, promovendo a saúde, o desenvolvimento sustentável, o crescimento nacional e o bem-estar da população”. Campanhas e leis vêm sendo criadas no país a fim de se atingir uma economia mais sustentável, tais como a Lei nº 8006 de 25 de junho de 2018, do Rio de Janeiro, que proíbe estabelecimentos comerciais de distribuir sacos ou sacolas plásticas descartáveis no estado, trazendo a obrigatoriedade da utilização de sacolas confeccionadas a partir de fontes renováveis. Além disso, o país possui uma longa história de uso de biocombustíveis como fonte de energia. O bioetanol tem sido comercialmente produzido por mais de 75 anos, o que permitiu o desenvolvimento de tecnologias de ponta e operações altamente eficientes em destilarias (OECD, 2013). Sendo assim, o etanol brasileiro proveniente da cana de açúcar oferece claras vantagens de custo e recursos, o que vêm despertando

o interesse de investidores e atraindo a atenção de empresas para a possibilidade de utilização do etanol na fabricação de produtos além de combustíveis (OECD, 2013). A produção de bioplásticos no Brasil é muito atrativa devido à competitividade em termos de custo de produção e a fatores de demanda positivos, como o aumento do interesse do consumidor em embalagens ecológicas e maior ênfase em sustentabilidade por parte dos fabricantes de produtos em todo o mundo (Morales et al., 2009).

O rápido crescimento populacional, a escassez de recursos, o aumento da proteção e regulamentação ambiental e os ciclos econômicos cada vez mais voláteis têm servido como catalisadores para a Bioeconomia (Golden e Handfield, 2014). No âmbito da indústria de polímeros, esse modelo se aplica através da substituição de materiais de origem fóssil por materiais de base biológica, conhecidos como bioplásticos. Atualmente, o volume de plásticos produzido é 20 vezes maior do que há 50 anos atrás (OECD, 2013) e, apesar dos benefícios inerentes a esses materiais, os mesmos geram resíduos de longa duração que se acumulam no meio ambiente, afetando a flora e a fauna. Além disso, sua produção libera gases do efeito estufa para a atmosfera, que podem contribuir para as mudanças climáticas.

Os bioplásticos não são conceitualmente novos, mas a descoberta, após a Segunda Guerra Mundial, do petróleo bruto interrompeu o avanço do seu desenvolvimento, uma vez que não podiam competir em preço com produtos derivados de combustíveis fósseis. Sendo assim, o volume total de produção de bioplásticos ainda é pequeno em comparação com os petro-plásticos, porém, devido aos fatores expostos anteriormente, essa produção vem aumentando com o passar dos anos.

## **8) BIOPLÁSTICOS**

Bioplásticos são materiais que possuem estruturas e funcionalidades similares aos plásticos de origem fóssil, porém, são de base biológica ou biodegradáveis, podendo, também, apresentar as duas características. Materiais de base biológica são total ou parcialmente derivados de fontes renováveis, sendo o milho, a cana de açúcar e a celulose as mais utilizadas na produção dos

bioplásticos. Já a biodegradação consiste em um processo químico no qual microorganismos disponíveis no ambiente convertem os materiais em substâncias naturais, como água e dióxido de carbono. Esse processo depende das condições ambientais, do material e da sua aplicação. A biodegradabilidade de um material depende da sua estrutura química, e, sendo assim, um material de base totalmente biológica não necessariamente é biodegradável. Os plásticos são, então, divididos como demonstrado na Figura 19.

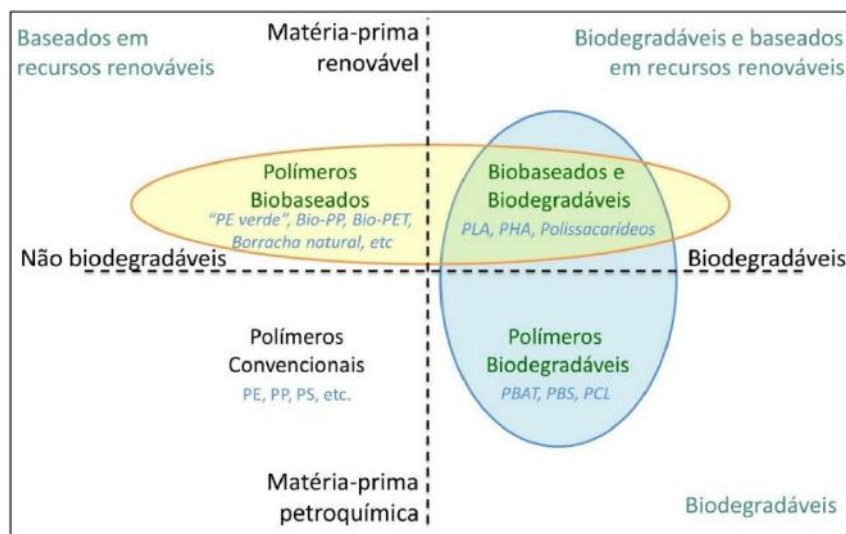


Figura 19: Diferença entre polímeros convencionais e bioplásticos.  
 Fonte: Afinko Polímeros, 2018.

Plásticos de origem biológica economizam recursos fósseis, pois são produzidos a partir de biomassa, que se regenera anualmente, e podem fornecer o potencial único de neutralidade de carbono, visto que a biomassa utiliza CO<sub>2</sub> para o seu desenvolvimento. Para isso, o carbono deve ser mantido em um ciclo fechado, configurando uma bioeconomia circular, de forma a manter os efeitos positivos. Se, por exemplo, um material de base biológica for incinerado no final da sua vida útil, o carbono entra novamente na atmosfera em forma de CO<sub>2</sub>, contribuindo para o efeito estufa. A Figura 20 ilustra a emissão de gases do efeito estufa relacionada a bioplásticos e a plásticos de origem fóssil.

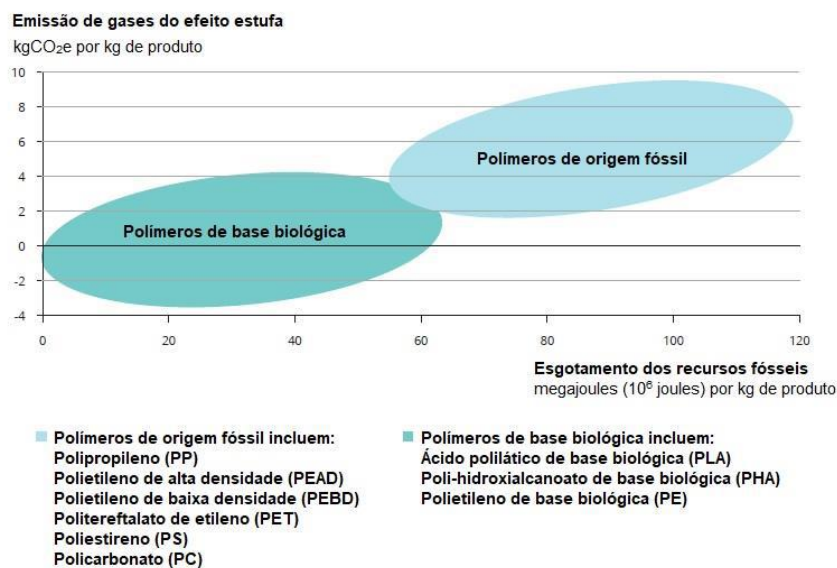


Figura 20: Emissões de gases do efeito estufa para bioplásticos e petro-plásticos.

Fonte: Adaptado de The circular economy and the bioeconomy: Partners in sustainability, 2018.

Sendo assim, os possíveis benefícios da substituição de produtos fósseis por produtos de base biológica dependem, principalmente, da sustentabilidade de práticas agrícolas/florestais, do prolongamento da vida útil dos produtos e da escolha de opções sustentáveis para o tratamento de resíduos.

Os bioplásticos não biodegradáveis apresentam os mesmos problemas relacionados aos polímeros petroquímicos no que tange a geração de resíduos e, sendo assim, não serão analisados no presente trabalho.

## 8.1) O ciclo de vida dos bioplásticos

Devido ao potencial dos bioplásticos biodegradáveis em substituir os plásticos convencionais na fabricação de embalagens flexíveis, é importante analisar o seu ciclo de vida, de forma a se determinar suas reais possibilidades de implementação no mercado e os reais benefícios que esses materiais trazem ao meio ambiente.

### 8.1.1) Escolha da biomassa

Bioplásticos são, geralmente, produzidos a partir de açúcares, que podem ser facilmente extraídos da cana de açúcar, da beterraba e do milho. Culturas

lignocelulósicas também são capazes de gerar açúcar, porém, a extração é tecnicamente mais difícil. Alguns fatores devem ser analisados a fim de se determinar a biomassa que será utilizada na fabricação dos bioplásticos, tais como a emissão de gases do efeito estufa. Diferentes tipos de biomassa liberam diferentes quantidades de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. A Figura 21 apresenta a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida durante a produção de dois biopolímeros bastante populares, o ácido polilático (PLA) e o polihidroxicanoato (PHA), comparando-a com a emitida durante a produção de petro-plásticos comuns.

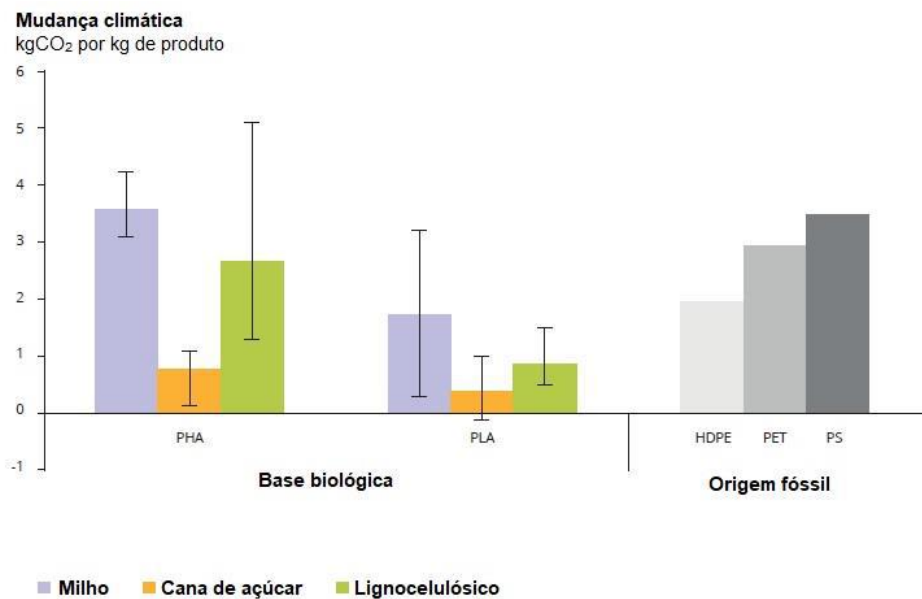


Figura 21: Mudanças climáticas causadas por bioplásticos e petro-plásticos.  
Fonte: Adaptado de The circular economy and the bioeconomy: Partners in sustainability, 2018.

Os produtos de base biológica possuem potencial para superar o desempenho de seus equivalentes de origem fóssil em termos de impactos nas mudanças climáticas. Ainda assim, é perceptível que o tipo de biomassa influencia significativamente na quantidade de CO<sub>2</sub> liberada durante a fabricação de um mesmo produto, o que demonstra a importância da escolha da matéria-prima a ser utilizada.

O custo é outro fator importante a ser analisado. A Figura 22 ilustra a diferença relativa no custo do biorrefino da beterraba, na Europa, e da cana de açúcar, no Brasil, sendo a maior proporção dessa diferença, o custo da matéria-prima.



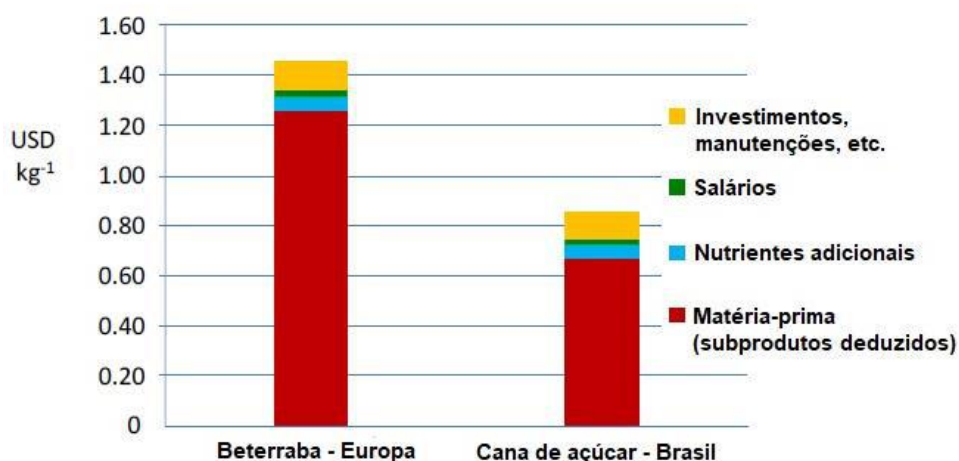


Figura 22: Custos relativos do biorrefino da beterraba europeia e da cana-de-açúcar brasileira.

Fonte: Adaptado de OECD, baseado em Delcourt (2012) no Fórum Europeu de Biotecnologia Industrial.

Os custos de produção ainda representam uma barreira para o crescimento do setor de bioplásticos, visto que a produção de plásticos de base biológica ainda é mais cara do que a produção de seus petro-equivalentes, o que resulta em preços de mercado mais altos. Apesar disso, os bioplásticos apresentam grande potencial de redução de preços devido ao avanço da engenharia de processos e do surgimento de novas tecnologias de bioprocessamento.

#### 8.1.2) Requerimentos de área agrícola para a produção de bioplásticos

A biomassa é renovável, porém, sua produção depende de recursos limitados, tais como água, terra e nutrientes. Sendo assim, para que o uso da biomassa traga benefícios reais para o meio ambiente, esses recursos devem ser utilizados de maneira sustentável, evitando seu uso excessivo e garantindo que a produção não gere impactos negativos, como exploração excessiva de reservas florestais e perda de biodiversidade. De acordo com o Relatório Global de Riscos, publicado pelo World Economy Forum (WEF, 2016), os maiores riscos ambientais relacionados a Bioeconomia são a falha na mitigação das mudanças climáticas, perda de biodiversidade, colapso de ecossistemas e crises globais de água e alimentos, que estão diretamente relacionados com as exigências de

terra para o cultivo das matérias-primas utilizadas na fabricação dos bioplásticos.

A produção de alimentos, rações para animais e produtos de base biológica, atualmente, é amplamente dependente da agricultura, o que originou um debate público, político e industrial sobre a competição entre matérias-primas agrícolas. Apesar disso, as terras usadas para a produção de bioplásticos totalizaram, aproximadamente, 0,79 milhões de hectares em 2019, o que representou menos de 0,02% da área agrícola global de 4,8 bilhões de hectares. Apesar do crescimento de mercado previsto nos próximos cinco anos, a participação no uso da terra para bioplásticos permanecerá em torno de 0,02%, o que mostra claramente que não há concorrência entre a matéria-prima renovável para alimentos, rações e a produção de bioplásticos (European Bioplastics, 2019). A Figura 23 ilustra a distribuição de área agrícola global.

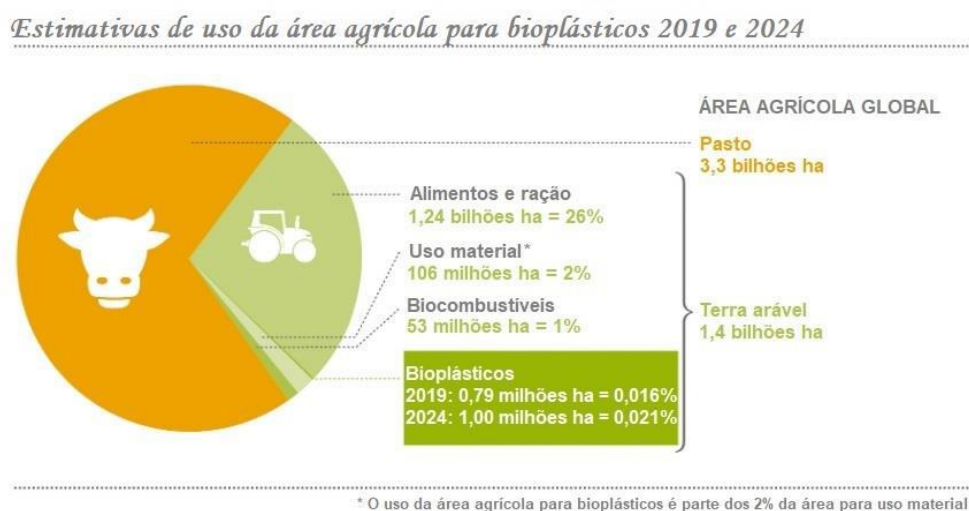


Figura 23: Uso da área agrícola global.  
Fonte: Adaptado de European Bioplastics, 2019.

Ainda que a produção de bioplásticos ocupe uma parcela mínima da área agrícola global, soluções já vêm sendo pensadas para reduzir o impacto ambiental causado pelo cultivo de biomassa, possibilitando assim, o crescimento e desenvolvimento da Bioeconomia. A Indústria 4.0, discutida anteriormente, traz o conceito de Agricultura 4.0 (Agro 4.0), que emprega métodos computacionais de alto desempenho a fim de contribuir para a elevação dos índices de produtividade, a eficiência do uso de insumos, a redução de custos com mão de obra, a melhoria da qualidade do trabalho e da segurança dos trabalhadores e

para a diminuição dos impactos ao meio ambiente (Massruhá e Leite, 2017), possibilitando um maior rendimento por hectare e reduzindo os custos de produção.

Além disso, recursos marinhos, apesar de serem explorados há bastante tempo para fins alimentícios, ainda não são efetivamente utilizados para a extração de materiais de base biológica. Organismos marinhos, como microalgas têm múltiplas vantagens. Elas removem CO<sub>2</sub> da atmosfera e contém um teor lipídico maior, em peso, do que outras plantas. As algas podem ser produzidas em terras não aráveis, em água do mar ou em águas residuais, reduzindo o consumo de água doce e eliminando a concorrência com a produção de alimentos (Trivedi et al., 2015). Avanços recentes na ciência e na biotecnologia vêm expandindo as possibilidades de uso da biotecnologia marinha.

Por fim, aplicando-se os princípios da economia circular na Bioeconomia, pode-se criar oportunidades para produzir maiores quantidades de produtos de base biológica dentro dos limites ecológicos planeta. A reutilização de resíduos orgânicos não só fornece matéria-prima para novos bioprodutos, como, também, contém nutrientes que podem ser reinseridos no ecossistema para enriquecimento do solo, de forma a permitir novos cultivos.

### 8.1.3) Produção de bioplásticos

Os bioplásticos vêm sendo apontados como substitutos para plásticos de origem fóssil devido aos grandes impactos ambientais causados pelos mesmos. Entretanto, as empresas ainda se deparam com perspectivas incertas. A preferência do consumidor pelo plástico tradicional, já conhecido e consolidado, ainda é uma realidade e o custo de produção dos bioplásticos é muito superior quando comparado ao custo dos produtos de origem fóssil, o que dificulta novos investimentos. Altos níveis de investimento inicial, alto custo de transporte da biomassa e consideráveis variabilidades da composição e suprimento de biomassa ao longo do ano são barreiras chaves para o desenvolvimento dos biopolímeros.

Apesar disso, é interessante ressaltar que, segundo a European Bioplastics (2016), pesquisa e desenvolvimento constituem grande parte do

custo associado aos bioplásticos e, sendo assim, o mercado de bioplásticos ainda encontrará grandes avanços tecnológicos que possibilitarão a redução dos custos de produção. Além disso, plásticos renováveis, geralmente, demonstram boa adaptabilidade aos métodos utilizados no processamento de plásticos de origem fóssil, exigindo pouco ou nenhum ajuste nas plantas industriais (Bevanda et al., 2017).

#### 8.1.4) Fim de vida dos bioplásticos

Para um estudo mais completo acerca do fim da vida dos bioplásticos, deve-se, primeiramente, distinguir os conceitos de ciclo técnico e ciclo biológico. De acordo com a Fundação Ellen MacArthur, “o ciclo técnico envolve a gestão dos estoques de materiais finitos. O uso substitui o consumo. Os materiais técnicos são recuperados e, em sua maior parte, restaurados no ciclo técnico”, enquanto que “o ciclo biológico abrange os fluxos de materiais renováveis. O consumo só ocorre no ciclo biológico. Nutrientes renováveis (biológicos) são, em sua maior parte, regenerados no ciclo biológico”. Sendo assim, a Bioeconomia permite a regeneração de recursos materiais, visto que eles fazem parte de um ciclo biológico, que é, inerentemente, fechado; no entanto, apenas os bioplásticos biodegradáveis podem, atualmente, ser reinseridos no ambiente de forma a se completar o ciclo, enquanto que os não-biodegradáveis enfrentam os mesmos desafios de fim de vida que os materiais de origem fóssil, percorrendo o ciclo técnico ao invés do biológico.

Alcançar o maior nível possível de proteção ambiental que os bioplásticos podem fornecer também está ligado ao gerenciamento dos resíduos gerados. Como explicitado anteriormente, o presente trabalho é focado nos bioplásticos biodegradáveis, os quais possuem capacidade de degradação por microrganismos, não se acumulando, assim, no meio ambiente. Apesar disso, em condições não controladas, os bioplásticos biodegradáveis podem não ser totalmente decompostos, gerando rejeitos que, geralmente, são mais prejudiciais ao ambiente do que a coleta e tratamento dos resíduos plásticos (EEA, 2018). Sendo assim, esses materiais devem estar inseridos no ciclo biológico, e, conseqüentemente, em um modelo de negócio baseado na Bioeconomia

Circular.

A inserção desses bioprodutos em uma cadeia circular é uma estratégia crucial para otimizar seus benefícios ambientais, possibilitando um gerenciamento de resíduos adequado. A compostagem e a digestão anaeróbica são capazes de reduzir os impactos ambientais causados por esses materiais, eliminando ou minimizando a disposição de rejeitos no ambiente.

A compostagem e a digestão anaeróbia são processos nos quais micro-organismos são responsáveis pela degradação da matéria orgânica (EEA, 2018). Uma compostagem eficiente dos resíduos biológicos impede emissões de gases de efeito estufa resultantes da decomposição e fornece um aditivo natural ao solo que atua como fonte de carbono e de nutrientes. Produtos da compostagem não só melhoram a estrutura do solo, mas também substituem a necessidade de alguns fertilizantes de base química, porém, é importante ressaltar que nem todo bioplástico biodegradável é compostável (Zeljko et al., 2017). A Figura 24 apresenta esquematicamente o processo de compostagem, que pode ser realizado com propósitos industriais ou domiciliares.

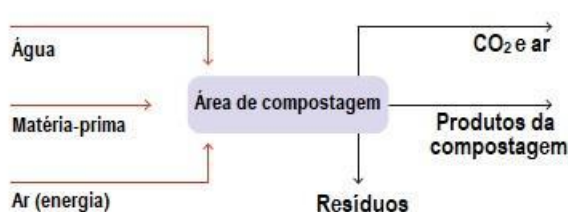


Figura 24: Fluxograma do processo de compostagem.

Fonte: Adaptado de The circular economy and the bioeconomy: Partners in sustainability, 2018.

Já na digestão anaeróbica, o resíduo biológico é convertido em biogás e efluentes sólido e líquido, na ausência de oxigênio (EEA, 2018). O biogás, uma mistura de CO<sub>2</sub>, metano e outros gases vestigiais, pode ser usado para produção de energia ou como um produto químico de base, enquanto que os efluentes, ricos em nutrientes e matéria orgânica, podem ser utilizados como fertilizante de plantas. Os bioplásticos têm um alto peso molecular, o que teoricamente, os tornariam bons candidatos para tratamentos biológicos anaeróbicos (OECD,

2013). O processo está esquematizado na Figura 25.

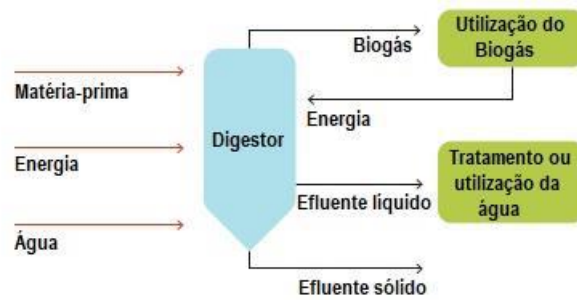


Figura 25: Fluxograma do processo de digestão anaeróbica.

Fonte: Adaptado de The circular economy and the bioeconomy: Partners in sustainability, 2018.

## 8.2) Mercado global e nacional

Atualmente, os bioplásticos representam um percentual de, aproximadamente, 1% da produção global anual de plásticos, que ultrapassa 359 milhões de toneladas (European Bioplastics, 2019). Entretanto, devido ao enorme potencial econômico e ecológico desses materiais, a demanda vem aumentando. Com desenvolvimento de novos biopolímeros e novas aplicações, o setor vem crescendo e se diversificando. De acordo com a European Bioplastics, a capacidade de produção global de bioplásticos é prevista para aumentar de um total de 2,11 milhões de toneladas, em 2019, para um total de 2,43 milhões de toneladas, em 2024, como demonstrado na Figura 26.

### Capacidades globais de produção de bioplásticos



Figura 26: Capacidades globais de produção de bioplásticos.  
Fonte: Adaptado de European Bioplastics, nova-Institute, 2019.

Dentre os biopolímeros novos e inovadores, os PHAs (poli-hidroxialcanoatos) representam uma importante família e sua capacidade global é estimada a mais do que triplicar nos próximos 5 anos. Por serem biodegradáveis e apresentarem uma ampla variedade de propriedades físicas e mecânicas, dependendo de sua composição química, podem ser utilizados em diversas aplicações, justificando seu rápido crescimento. Os plásticos biodegradáveis, incluindo PLA, PHA, misturas de amido e outros, representam mais de 55,5% (mais de 1 milhão de toneladas) das capacidades globais de produção de bioplásticos, que deverá aumentar para 1,33 milhões de toneladas em 2024, especialmente devido às taxas de crescimento significativas dos PHAs (European Bioplastics, 2019).

Os bioplásticos são utilizados em diversos segmentos, e seu uso vem sendo cada vez mais diversificado. O setor de embalagens é o principal consumidor desses materiais, representando mais de 53% do mercado total de bioplásticos em 2019 (European Bioplastics, 2019). A Figura 27 apresenta as principais aplicações de bioplásticos.

### Capacidades de produção global de bioplásticos em 2019 (por segmento)

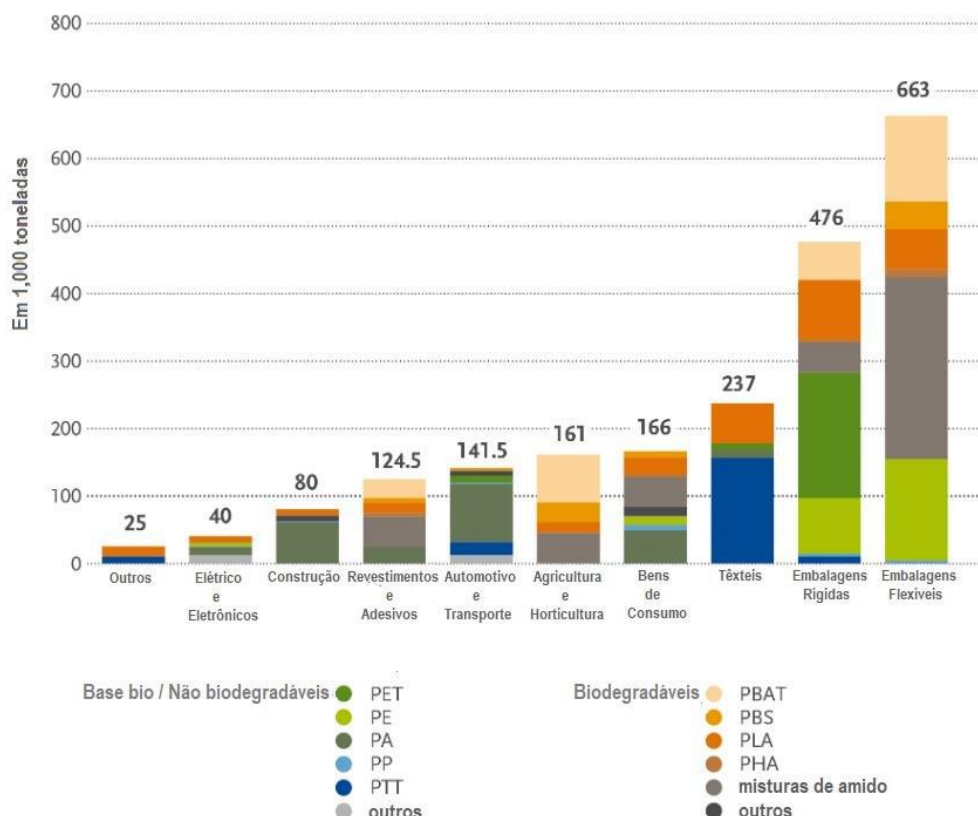


Figura 27: Capacidades globais de produção de bioplásticos por segmento.  
Fonte: Adaptado de European Bioplastics, nova-Institute, 2019.

No que tange à divisão mundial, um quarto da produção global de bioplásticos está localizada na Europa. O continente europeu ocupa a maior posição no campo de pesquisa e desenvolvimento, sendo o maior mercado da indústria desse material em todo o mundo. Entretanto, a Ásia continua sendo o principal centro de produção, representando um total de 45% da produção global de bioplásticos (European Bioplastics, 2019).

A produção nas Américas também aumentou. Especificamente, no Brasil, pode-se destacar a planta de produção de eteno de origem renovável com capacidade anual de 200 mil toneladas (BRASKEM, 2017), porém, ainda não há dados estruturados sobre a quantidade de bioplásticos produzidos ao ano.

### 8.3) Impulsionadores do mercado de bioplásticos

A produção global de biopolímeros ainda é muito pequena quando



comparada à produção de plásticos convencionais, porém, o setor vem demonstrando crescimento ao longo dos últimos anos. Ainda assim, diversas barreiras precisam ser superadas para que os bioplásticos possam se consolidar no mercado, tais como a incerteza dos consumidores, que são mais propícios a investir em materiais já conhecidos, como o plástico convencional; o custo de produção, que constitui uma ameaça à viabilidade de introdução desses materiais no mercado e os desafios relacionados à produção e ao uso da biomassa para fins não alimentícios. Com isso, é necessária a criação de um ambiente mais favorável, com o investimento em ações que incentivem mudanças no comportamento do consumidor, financiamento de pesquisas básicas e aplicadas e com a implementação de políticas de incentivo.

#### 8.3.1) Mudando o comportamento do consumidor

Devido à crescente preocupação com os impactos ambientais causados pelos plásticos convencionais, o consumidor vem desenvolvendo o desejo de investir em produtos sustentáveis. Ainda assim, a falta de informações a respeito desses novos produtos gera inseguranças, fazendo com que os plásticos de origem fóssil ainda sejam preferidos pela população em geral. Uma pesquisa recente foi realizada por Van Winkle et al. (2013) para determinar 1) o nível de conscientização e as percepções dos consumidores sobre os bioprodutos e seus rótulos, 2) as características dos atuais compradores de bioprodutos e 3) a disposição dos consumidores em pagar por bioprodutos. Os resultados indicaram que havia uma imagem um alto nível de incerteza quanto aos benefícios e riscos do uso de produtos agrícolas como alternativa ao petróleo. O fato de os plásticos de base biológica apresentarem vantagens claras sobre os plásticos convencionais os torna atraentes para os clientes ambientalmente conscientes, porém, o uso desses materiais precisa ser explicado e comercializado de forma mais transparente para que se possa atingir um número maior de consumidores. Investir em campanhas de marketing, explicitar os reais benefícios que um determinado bioplástico pode gerar para o meio ambiente e padronizar os rótulos ecológicos são medidas fundamentais para aumentar o percentual de pessoas que utilizam esse tipo de produto.

Além disso, a introdução de diferentes bioplásticos no mercado pode

aumentar significativamente o nível de conhecimento e informação, tornando a qualidade dos materiais aparente e aceita. Grandes marcas como Procter & Gamble, Danone, Puma, Samsung, IKEA, Tetra Pak, Heinz e Toyota já introduziram os primeiros produtos de larga escala na Europa e outras empresas, incluindo Lego, anunciaram planos correspondentes para um futuro próximo.

### 8.3.2) Investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D)

O custo de produção dos bioplásticos ainda é muito alto se comparado ao custo dos plásticos de origem fóssil, o que desencoraja novos investidores. O investimento em P&D é essencial para o crescimento do setor, visto o potencial de desenvolvimento de novos métodos de produção e, consequente, redução dos custos. Na Europa, maior mercado da indústria de bioplástico no mundo, foi anunciado um aumento significativo no financiamento para pesquisas relacionadas a Bioeconomia como parte do programa de pesquisa europeu "*Horizon Europe*", que ocorrerá de 2021 a 2027 (European Bioplastics, 2019).

Embora o aumento do financiamento público seja fundamental, também há espaço para incentivo a investimentos do setor privado através da criação de parcerias público-privadas na área de produtos de base biológica e bioplásticos (OECD, 2013).

### 8.3.3) Produção e uso da biomassa

Além do desenvolvimento de novos métodos de produção, o investimento em P&D também possui papel fundamental na minimização da competição bioplásticos vs alimentos. Através da utilização de biomassas não-alimentícias como matéria-prima para os biopolímeros, o debate não seria mais pertinente, facilitando o crescimento do setor.

Em relação aos impactos ambientais causados pelo uso da terra, várias técnicas podem ser aplicadas a fim de tornar o cultivo de matéria-prima mais sustentável. Apesar de a produção de bioplásticos ocupar menos de 0,2% da área agrícola do planeta, como discutido anteriormente, medidas podem ser tomadas na intenção reduzir ainda mais os impactos ambientais causados por esses materiais, como, por exemplo, o aumento da produtividade através de

métodos da Agricultura 4.0, a reutilização de terras degradadas, a melhor gestão da terra e a exploração de recursos marinhos.

#### 8.3.4) Políticas de incentivo

É essencial, para o desenvolvimento do setor de bioplásticos, que os produtos sejam comercializados com lucro, mesmo nesta fase inicial. Políticas de incentivo, tais como cotas, subsídios e incentivos financeiros e fiscais podem ser utilizadas para estimular esse mercado. O estabelecimento de cotas para biopolímeros é complexo, devido à variedade de materiais existente e à diversidade de áreas de aplicação, porém, bioplásticos específicos usados em determinadas aplicações ou em setores específicos podem ser cotados. Já o oferecimento de subsídios e/ou incentivos fiscais é uma prática comum em diversos países. Em países da Ásia, como Malásia, Japão, Coreia do Sul, Cingapura e China, reduções tributárias são oferecidas a empresas que desejam pesquisar e investir no setor de bioplásticos (OECD, 2013).

A criação e implementação de leis e ações que incentivam o uso de biopolímeros em detrimento de plásticos convencionais também são catalisadores para o crescimento desse setor. Em janeiro de 2018, a European Commission publicou a European Strategy for Plastics in a Circular Economy, que busca restringir os resíduos de plástico de uso único através de ações voltadas para itens reutilizáveis e para redução do uso de sacolas plásticas e garrafas de água, sendo essa última prevista em lei (Castro, 2019).

No Brasil, a tendência de substituição de plásticos de origem fóssil também pode ser observada. Além de leis que proíbem a distribuição de sacolas plásticas por estabelecimentos comerciais em alguns estados, como Rio de Janeiro, o país ratificou, em 2016, o acordo firmado durante a 21ª Conferência das Partes (COP21), que ocorreu em 2015. O Acordo de Paris, como ficou conhecido, foi aprovado por 195 países e tem como compromisso manter o aumento da temperatura global dentro de 2°C acima dos níveis pré-industriais, gerando esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais (MMA, 2018).

Para o alcance do objetivo final, cada país é responsável por criar seus próprios compromissos, chamados de Contribuições Nacionalmente

Determinadas (NDC, na sigla em inglês). Ao ratificar o acordo, o Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030 (MMA, 2018).

Apesar da produção de bioplásticos não estar diretamente incluída nas NDCs brasileiras, um dos principais benefícios relativos a esses materiais é a promessa de redução da emissão de gases do efeito estufa, e, sendo assim, a entrada do Brasil nesse acordo também pode ser considerada como uma alavanca para a produção de plásticos a partir de fontes renováveis no país.

## **9) EMBALAGENS BIODEGRADÁVEIS**

Atualmente, o uso de polímeros biodegradáveis em embalagens já pode ser observado ao redor do mundo. Por exemplo, em 2010, uma empresa chamada THE WAY WE SEE THE WORLD apresentou ao mundo o “*Loliware*”, um substituto para os copos plásticos descartáveis. Esse produto é inteiramente feito de ágar-ágar, um extrato de algas marinhas e pode ser descartado na grama, visto que esse extrato estimula o crescimento das plantas, ou comido, pois é um material natural, atóxico e aprovado pela FDA (Food and Drug Administration, agência federal do Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos Estados Unidos, agência reguladora dos EUA). Outro exemplo do uso de bioplásticos pode ser encontrado na empresa Redleaf Water, que desde 2011 iniciou a distribuição da primeira garrafa de água biodegradável e reutilizável. A “Bio Bottle” foi produzida pela ENSO Plastics, LLC, com base no Arizona, e pode ser degradada em ambientes aeróbios e anaeróbios, em até 15 anos (Jovic, 2017).

A indústria alimentícia é a principal consumidora de embalagens plásticas flexíveis e, sendo assim, também é a principal consumidora de embalagens plásticas biodegradáveis. A qualidade e a segurança dos alimentos são as principais preocupações dessa indústria e, assim, o desenvolvimento de revestimentos bioativos baseados em polímeros biodegradáveis combinados com antimicrobianos naturais e/ou compostos antioxidantes aparece como uma das estratégias mais interessantes para o futuro próximo (Rocha et al., 2018).

Geralmente, biopolímeros podem ser processados utilizando as mesmas

tecnologias usadas para plásticos convencionais, como moldagem por injeção, moldagem por sopro, termoformagem, extrusão e formação de filmes (Berkesch, 2005). Os filmes biodegradáveis são bastante utilizados na fabricação de embalagens para a indústria de alimentos e são geralmente obtidos a partir de: (a) matérias-primas naturais, como amido, celulose e proteína; (b) síntese química de monômeros de origem biológica, como o polilactato; e (c) polímeros produzidos naturalmente por microrganismos, como poli-hidroxibutirato e poli-hidroxivalerato (Peterson et al., 1999, apud Wihodo and Moraru, 2013), sendo amido, celulose, quitosano, poliácido láctico (PLA), policaprolactona (PCL) e polihidroxibutirato (PHB), os mais comumente utilizados (Jovic, 2017).

Suas propriedades são definidas pela sua composição, que podem incluir, além dos biopolímeros, plastificantes, agentes de reticulação, agentes antimicrobianos, antioxidantes e agentes de textura (Rocha et al., 2018).

### **9.1) Propriedades dos materiais biodegradáveis**

As embalagens alimentícias devem ser capazes de proteger o produto de agentes químicos e microbiológicos, mantendo seu frescor e seu valor nutricional, além de serem inovadoras, de fácil uso e possuírem designs atraentes.

Sendo assim, é importante determinar se plásticos biodegradáveis são capazes de cumprir essas exigências. Para que um biopolímero possa, efetivamente, substituir seu equivalente petroquímico, deve possuir as mesmas propriedades.

#### **9.1.1) Propriedades de barreira**

A determinação das propriedades de barreira de embalagens biodegradáveis é fator determinante na predição do prazo de validade de um produto. Vapor d'água e oxigênio são os principais agentes permeantes estudados, visto que estão presentes no ambiente externo e podem ultrapassar a barreira imposta pelas embalagens, alterando, assim, as propriedades do produto (Germain, 1997, apud Siracusa et al., 2008). A capacidade dos filmes biodegradáveis de atender as necessidades de barreira de um produto alimentar

é influenciada pela sua natureza e composição e, também, pelas condições ambientais. Portanto, é necessário otimizar as propriedades de barreira dos materiais biopoliméricos utilizados como embalagem de acordo com as características e condições de armazenamento dos produtos embalados (Wihodo and Moraru, 2013 apud Rocha et al., 2018).

#### 9.1.2) Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas dos filmes de biopolímero incluem resistência à tração, alongamento, deformabilidade, e módulo de elasticidade. Essas propriedades são de extrema importância, visto que embalagens devem possuir resistência mecânica adequada para manter a integridade dos produtos durante o manuseio e armazenamento (Wihodo and Moraru, 2013).

Assim como as propriedades de barreira, as propriedades mecânicas de um biopolímero dependem da sua composição e das condições ambientais, podendo depender, também, da sua estrutura molecular. A adição de agentes plastificantes aumenta a mobilidade da cadeia polimérica, aumentando o alongamento e reduzindo a resistência à tração dos filmes plastificados (Wihodo and Moraru, 2013). Da mesma forma, a umidade causa o mesmo efeito, visto que aumenta o efeito plastificante da água em filmes hidrofílicos (Rocha et al., 2018). Adicionalmente, as interações entre o produto e a embalagem também podem afetar o desempenho dos filmes biopoliméricos (Wihodo and Moraru, 2013).

#### 9.1.3) Cor

Embalagens devem ser atrativas para o consumidor e não devem influenciar nas cores dos produtos embalados a longo prazo. A cor dos filmes é diretamente influenciada pelo tipo e pela concentração do material adicionado (Rocha et al., 2018), enquanto que a transparência ou opacidade do polímero é devida à sua morfologia ou estrutura química, que está relacionada ao peso molecular do material (Rocha et al., 2018).

#### 9.1.4) Propriedades microestruturais

As propriedades mecânicas e de barreira de um filme biodegradável estão fortemente relacionadas com suas características microestruturais, que são altamente influenciadas pela formulação do filme e pelo seu processo de manufatura (Hernández-Izquierdo e Krochta, 2008). A observação qualitativa dessas características é, frequentemente, realizada com a utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV), que é capaz de revelar tanto a presença de detalhes, tais como cumes, vales e poros, quanto a de defeitos, como furos e rachaduras, nas estruturas. Essas alterações estruturais causam mudanças nas propriedades dos biomateriais, que podem ser intencionais ou não, e devem ser estudadas caso a caso.

#### **9.2) Mercado global de embalagens plásticas biodegradáveis**

O mercado de embalagens plásticas biodegradáveis é segmentado por tipo (plástico à base de amido, plásticos à base de celulose, poliácido láctico e poli-hidroxialcanoatos), aplicação (alimentos, bebidas, indústria farmacêutica e uso pessoal/assistência domiciliar) e geografia.

De acordo com um relatório da empresa de pesquisa “*Mordor Intelligence*”, o mercado de embalagens plásticas biodegradáveis foi avaliado em US\$ 4,65 bilhões em 2019 e deve atingir um valor de mercado de US\$ 12,06 bilhões até 2025, registrando uma taxa de crescimento anual composta (CAGR, na sigla em inglês) de 17,04% durante o período previsto para 2020-2025.

As crescentes preocupações ambientais relacionadas ao uso do plástico e as regulamentações mais rigorosas impostas por vários governos e agências federais com o objetivo de reduzir o acúmulo de resíduos plásticos e promover o uso de plásticos biodegradáveis vêm alavancando o mercado de embalagens plásticas biodegradáveis. A variabilidade dos preços do petróleo bruto, junto ao aumento da produção de biopolímeros em uma escala global e às questões mencionadas anteriormente, vem impulsionando o setor, porém os altos custos (em comparação com o plástico convencional) estão restringindo seu crescimento (Mordor Intelligence, 2019).

Indústrias de embalagens, agricultura e têxteis tem sido as principais

consumidoras de plásticos biodegradáveis, especialmente em países europeus. A transição para uma economia circular e de baixo carbono, um apoio político mais forte à Bioeconomia e uma maior conscientização do consumidor sobre produtos e embalagens sustentáveis estão impulsionando a expansão desse mercado na Europa e a decisão da União Europeia de reduzir o consumo de sacolas plásticas em cerca de 80% até 2019, em comparação com os níveis de consumo em 2010, deverá criar enormes oportunidades de crescimento para os fabricantes desses materiais nos próximos cinco anos (Mordor Intelligence, 2019). A Figura 28 apresenta as taxas de crescimento esperadas para o mercado de embalagens plásticas biodegradáveis nos próximos cinco anos, por região.



Figura 28: Crescimento do mercado de embalagens plásticas biodegradáveis por região.  
Fonte: Adaptado de Mordor Intelligence, 2019.

O mercado de embalagens plásticas biodegradáveis ainda é altamente fragmentado, à medida que as principais empresas que fazem parte desse mercado estão avançando no desenvolvimento de novas tecnologias para fabricar seus produtos a partir de matérias-primas naturais facilmente disponíveis. Os grandes investimentos em pesquisa e desenvolvimento por parte dessas empresas, com o objetivo de desenvolver produtos inovadores, tornam o mercado de embalagens plásticas biodegradáveis altamente competitivo, sem



a presença de *players*<sup>14</sup> dominantes. Atualmente, os principais são a Tetra Pak International SA, a Plastic Suppliers Inc., a Kruger Inc a Amcor Limited e a Mondi PLC (Mordor Intelligence, 2019).

## **10) BIOPOLÍMEROS SUBSTITUTOS PARA O POLIPROPILENO NA FABRICAÇÃO DE EMBAGALENS FLEXÍVEIS**

Atualmente, as embalagens são indispensáveis para a proteção e prolongação da vida útil dos produtos. De acordo com a Associação Brasileira de Embalagens, “a embalagem não é um instrumento exclusivo da indústria para comercializar seus produtos, mas sim de toda a sociedade para ter acesso a bens de consumo de forma segura, prática e economicamente viável” (ABRE, 2011, p. 7).

Para que possam cumprir suas funções, as embalagens devem ser fabricadas observando-se alguns requisitos técnicos e legais, atentando-se à aspectos técnicos, estéticos, regulatórios, econômicos e ambientais, tal como mostrado na Figura 29.



Figura 29: Aspectos a serem observados para o desenvolvimento de embalagens.  
Fonte: Associação Brasileira de Embalagens (ABRE), 2011.

<sup>14</sup> *Player* é definido como uma empresa ou instituição financeira envolvida em um mercado específico (Longman Business English Dictionary).

As embalagens flexíveis são embalagens cuja forma pode ser alterada quando preenchidas e durante o uso. Tecnicamente, essas embalagens possuem espessura de até 250 micrômetros (American Plastics Council, 1996) e sua estrutura pode ser formada por filmes simples ou complexos (Nonclercq, 2016). Sendo assim, os materiais utilizados na fabricação de embalagens flexíveis devem atender a esses requisitos.

Como discutido anteriormente, o polipropileno é um dos principais materiais utilizados na fabricação de embalagens plásticas flexíveis, principalmente, para a indústria alimentícia. Alguns biopolímeros possuem a capacidade de substituí-lo na fabricação dessas embalagens, e dentre eles, estão o Políácido láctico (PLA) e os Polihidroxialcanoatos (PHAs) (Pradella, 2006), que vêm se mostrando como os mais promissores para esse setor. Esses bioplásticos destacam-se pelas suas propriedades e inovação. Além de ambos apresentarem biodegradabilidade, o PLA possui grande aplicação na produção de embalagens de alimentos, óleos e produtos gordurosos, enquanto que os PHAs podem ser aplicados na fabricação de filmes, sacos, artigos de descarte rápido, dentre outros (Pradella, 2006).

### 10.1) Políácido láctico (PLA)

O PLA é um poliéster termoplástico, linear, alifático, semicristalino ou amorfo, biocompatível e biodegradável, sintetizado a partir do ácido láctico obtido de fontes renováveis (Brito et al., 2011). Sua estrutura molecular é representada na Figura 30.

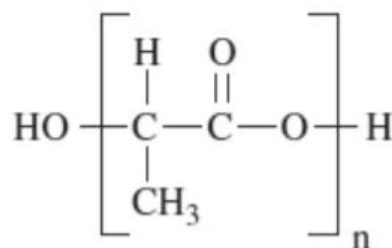


Figura 30: Estrutura molecular do PLA.  
Fonte: Brito et al., 2011.

Foi descoberto por Wallace Carothers (que também inventou o nylon) em

1920, que pretendia produzir um plástico ecológico para a DuPont, porém, seu uso comercial era muito caro. Em 1989, o Dr. Patrick R. Gruber, juntamente com sua esposa Sally, descobriu o processo de produção desse material a partir do milho, o que reduziu o seu custo de fabricação. Assim, o PLA se tornou, atualmente, o termoplástico ecológico mais comumente utilizado em nível global (Plastic Insight, 2019).

As propriedades mecânicas do poliácido láctico (PLA) comercial podem variar, de materiais macios e elásticos à materiais rígidos e de alta resistência, de acordo com diferentes parâmetros, como cristalinidade, estrutura polimérica, peso molecular, formulação de materiais (misturas, plastificantes, compósitos) e orientação (Tin Sin et al., 2012). Geralmente, são comparáveis com as de polímeros de origem fóssil, especialmente, elevado módulo de elasticidade, rigidez, transparência, comportamento termoplástico, biocompatibilidade e boa capacidade de moldagem (Brito et al., 2011). Sendo assim, são considerados biopolímeros promissores para múltiplas aplicações (Nogueira, 2013).

#### 10.1.1) Síntese

A fabricação de PLA requer a produção de dois produtos intermediários: ácido láctico e açúcares (De Matos et al., 2015). O ácido láctico é produzido através da fermentação de açúcares obtidos do processamento de diversos tipos de biomassa. A utilização de amidos e açúcares é mais vantajosa comercialmente, enquanto que o uso de materiais lignocelulósicos aparece como o menos avançado (De Matos et al., 2015).

O ácido láctico é uma molécula quiral existente como dois estereoisômeros, L- e D- ácido láctico, e pode ser produzido biológica ou quimicamente (Brito et al., 2011). Quando sintetizado biologicamente, o ácido láctico produz quase exclusivamente L-ácido láctico, levando à produção de ácido poli-L-láctico, de baixo peso molecular (Brito et al., 2011). Já a rota química, leva à formação de um diéster cíclico, o lactato, como passo intermediário à produção do PLA, que pode, então, ser sintetizado em três formas estereoquímicas: ácido poli-L-láctico (geralmente um polímero semicristalino), ácido poli-D-láctico (geralmente um polímero altamente cristalino) e poli-DL-láctico ácido (um polímero amorfo) (De Matos et al., 2015).

As três estruturas possíveis do lactato são apresentadas na Figura 31.

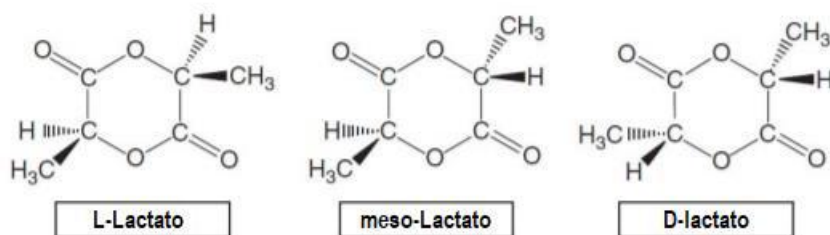


Figura 31: Estruturas químicas para o L-, meso- e D-Lactatos.

Fonte: Brito et al., 2011.

A síntese do PLA ocorre, principalmente, de duas maneiras: a) policondensação direta do ácido láctico e b) polimerização catalítica por abertura de anel do lactato. Enquanto a policondensação direta do ácido láctico produz apenas polímeros de baixo peso molecular, a polimerização catalítica por abertura de anel do lactato é o método mais comum para a produção de PLA de alto peso molecular e envolve a condensação do ácido láctico ao lactato, que é, então, convertido em PLA com a utilização de catalisadores metálicos (De Matos et al., 2015; Plastics Insight, 2017).

A polimerização catalítica por abertura de anel permite a produção das três formas estereoquímicas do PLA, em proporções variadas. Dessa forma, esse tipo de polimerização permite o controle das propriedades finais do polímero através do ajuste dessas proporções e das sequências das unidades de L- e D- ácido láctico (Brito et al., 2011). A Figura 32 mostra a cadeia de produção do PLA, enquanto que a Figura 33 apresenta suas etapas de produção a partir das biomassas mais comumente utilizadas.

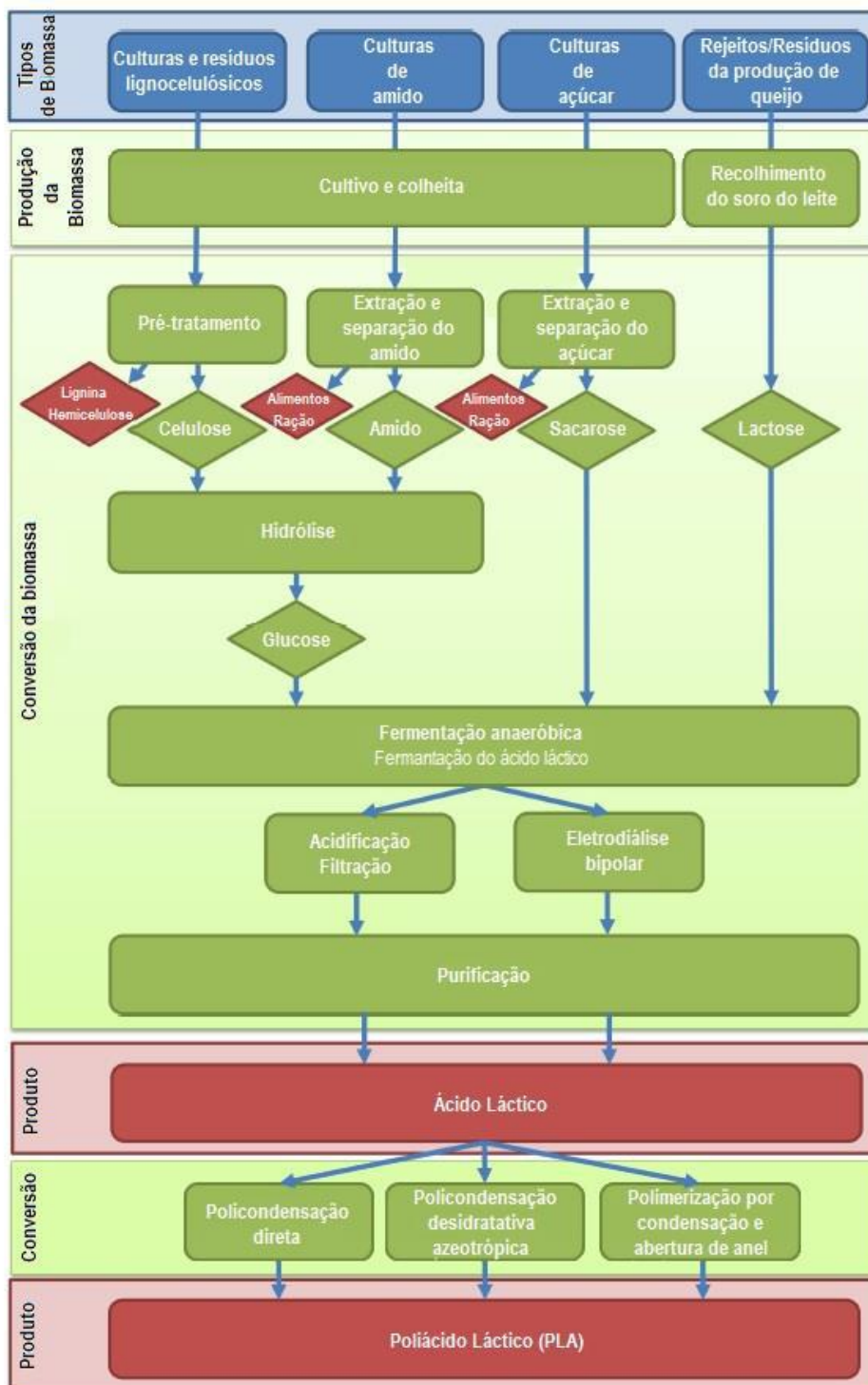


Figura 32: Cadeia de produção do PLA.  
 Fonte: Adaptado de De Matos et al., 2015.

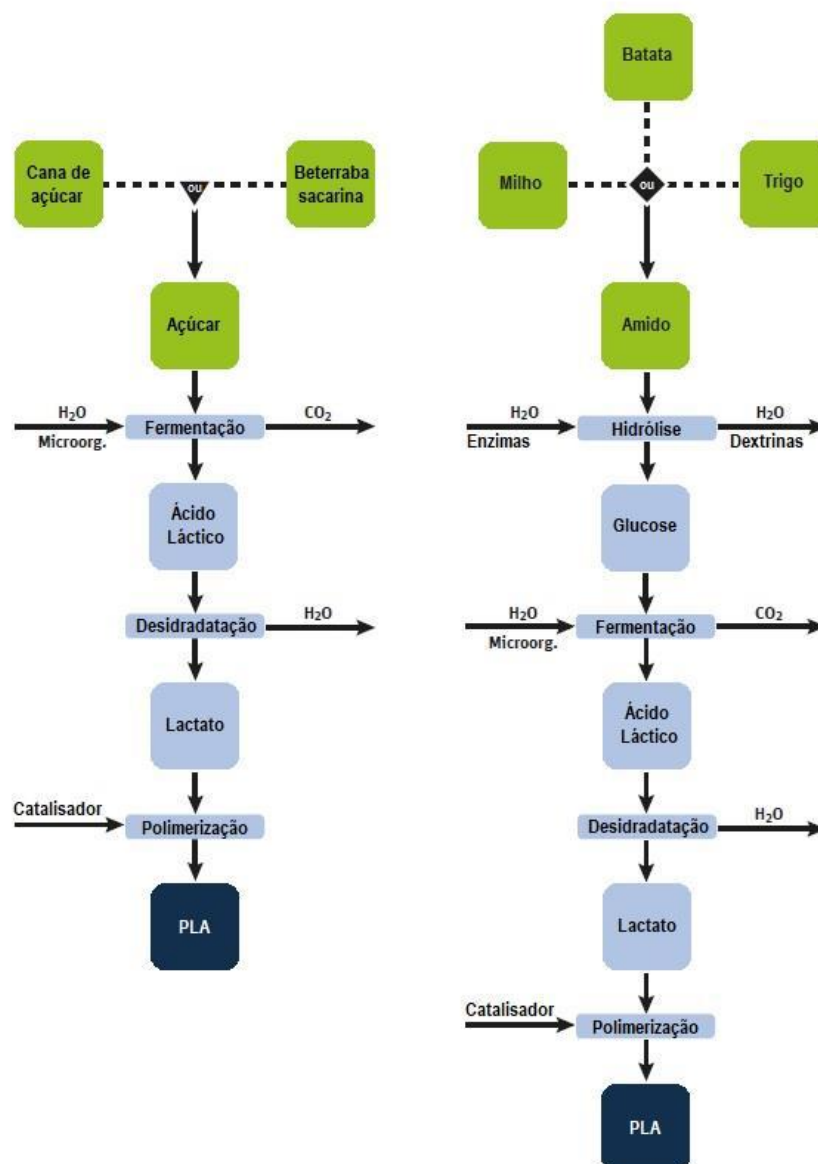


Figura 33: Etapas de produção do PLA a partir das biomassa mais utilizadas.  
 Fonte: Adaptado de Institute for Bioplastics and Biocomposites, 2019.

Pesos moleculares mais altos podem, também, ser obtidos com a utilização de agentes de acoplamento de corrente (após a policondensação direta) ou através de policondensação desidratante azeotrópica do ácido láctico, usando solventes azeotrópicos. Além destes, a policondensação por fusão/solidificação também foi proposta para aumentar o peso molecular do PLA. Esse processo inclui duas etapas de polimerização realizadas em diferentes temperaturas: acima e abaixo do ponto de fusão, sem solventes (De Matos et al., 2015). A Figura 34 apresenta os níveis das tecnologias disponíveis para a produção de PLA.



Figura 34: Níveis das tecnologias disponíveis para a produção do PLA.  
Fonte: Adaptado de De Matos et al., 2015.

### 10.1.2) Processabilidade

Por ser um material de alta transparência e taxa de cristalização relativamente baixa, o PLA apresenta amplas possibilidades de processamento, sendo um candidato proeminente à fabricação de filmes orientados biaxialmente, embalagens termoformadas e garrafas moldadas por injeção por sopro (Nogueira, 2013). Suas classes comerciais típicas são amorfas ou semi-cristalinas, possuindo clareza e brilho e pouco ou nenhum odor. Os filmes feitos com PLA têm altas taxas de transmissão de umidade, e taxas de transmissão de oxigênio e CO<sub>2</sub> muito baixas. Além disso, possuem boa resistência química a hidrocarbonetos, óleos vegetais e similares (Polymer Database, 2019).

O PLA é frágil, e, por isso, agentes plastificantes são, geralmente, adicionados para melhorar sua processabilidade e propriedades tais como flexibilidade, resistência ao rasgo e resistência ao impacto. Sua resistência a impactos é comparável à do polipropileno (Polymer Database, 2019), o que torna esse biopolímero um forte candidato para substituí-lo em diversas aplicações, incluindo, na fabricação de embalagens flexíveis.

### 10.1.3) Custos de produção e mercado

O PLA é um dos biopolímeros mais eficientes, gerando 1kg de produto

por 1,6 kg de açúcar fermentado, enquanto outros materiais requerem 2-3 vezes mais matéria-prima para sua produção (Plastics Insight, 2017). Apesar disso, ainda apresenta um alto custo de produção, quando comparado com vários produtos petroquímicos, o que pode impedir seu uso em aplicações de baixo valor (De Matos et al., 2015). Embora os preços estejam caindo à medida que a produção global aumenta, o ritmo da queda ainda é incerto (Bastos, 2007). A Figura 35 apresenta a tendência de preços do PLA em países desenvolvidos durante o ano de 2017, demonstrando que os maiores custos desse biopolímero ocorreram na China, enquanto que os menores, nos Estados Unidos.

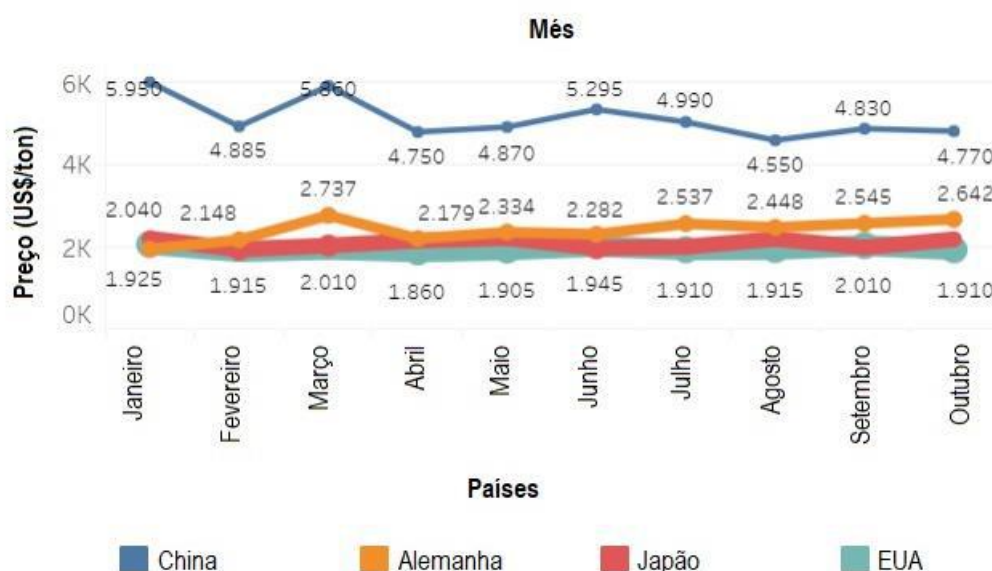


Figura 35: Tendência de preços do PLA em países desenvolvidos, em 2017.  
Fonte: Adaptado de Plastics Insight, 2017.

O PLA é um dos principais biopolímeros produzidos no mundo, representando um total de 10,3% de toda a matéria-prima utilizada na produção de bioplásticos. Devido ao aumento no uso desse material em aplicações como embalagens, cuidados pessoais e têxteis, o mercado do PLA deve apresentar altas taxas de crescimento nos próximos anos, chegando a valer mais de US\$ 5 bilhões até 2020 (Plastics Insight, 2017). A Figura 36 mostra as previsões de crescimento para a indústria global do ácido polilático, realizadas por duas empresas de pesquisa de mercado: *Mordor Intelligence* e *Allied Market Research*.





Figura 36: Previsões para a indústria global do PLA.

Fonte: Adaptado de Plastics Insight, 2017.

A indústria de embalagens é uma das maiores consumidoras de PLA. A produção de filmes de PLA vem ganhando espaço no mercado mundial, sendo prevista para crescer a uma taxa de crescimento anual (CAGR) de 14,5% entre 2017 e 2023 e alcançar um valor de US\$ 910 milhões em 2023 (Allied Market Research, 2017). Devido às vantagens apresentadas por esse material em relação à polímeros petroquímicos, sua utilização na indústria alimentícia vem aumentando continuamente. Indicadores positivos de crescimento nesse setor, o aumento da demanda por embalagens de alimentos para preservação prolongada e a crescente conscientização do consumidor a respeito de sustentabilidade impulsionam o mercado de filmes de PLA (Allied Market Research, 2017).

O mercado de ácido poliláctico é consolidado. As principais empresas atuantes nesse mercado incluem NatureWorks LLC, Zhejiang Hisun Biomaterials Co. Ltd, Synbra Technology BV, Futerro, e Sulzer Ltd, entre outras. A Tabela 1 apresenta, de maneira resumida, os maiores *players* dessa indústria, bem como as tecnologias utilizadas para a produção do PLA e os principais eventos mercadológicos relacionados a esses *players*.

Tabela 1: Empresas produtoras de PLA e seus principais eventos mercadológicos e tecnológicos.

Tipo de bioplástico	Estrutura/ Método de produção	Aplicações	Empresa/ Origem	Principais eventos mercadológicos e tecnológicos
PLA	Ácido láctico produzido por fermentação seguido de polimerização. Possui duas rotas de produção: Policondensação de ácidos lácticos e por polimerização por abertura de anel (ROP).	Embalagens: Alimentos, óleos e produtos gordurosos. Fibras e tecidos: Uso em interiores de automóveis, tapetes, carpetes e tecidos para roupa.	Nature Works (criada em 1989 pela Cargil)	1997: joint venture (Dow e Cargil); 2005: saída da Dow; 2007: entrada da Teijin; 2011: entrada da PTT Chemicals da Tailândia.
			Purac (maior produtora mundial de ácido láctico)	Parcerias com empresas transformadoras para produção do PLA como a Synbra.
			Futerra Galactic, produtora de ácido láctico e pertencente à Fincasure, importante produtora de açúcar na Europa.	2007: Joint Venture Galactic e Total (petroquímica).

Fonte: Amaral et al., 2019.

A China é esperada para dominar o mercado de PLA nos próximos anos, visto o amplo desenvolvimento dos setores de embalagens e medicina, que vêm sendo apoiados pelo crescimento da economia do país (Mordor Intelligence, 2018). A Europa também ocupa uma posição de destaque nesse mercado, principalmente, devido a normas regulatórias sobre o uso de bioplástico em vários segmentos. Essas normas e regulamentos governamentais restringem o uso de plásticos petroquímicos, encorajando sua substituição por bioplásticos em diversas indústrias, incluindo alimentos e bebidas, cosméticos e produtos farmacêuticos, aumentando a demanda por esses materiais de origem biológica na região (Plastics Insight, 2017).

#### 10.1.4) Aspectos ambientais

Para a determinação dos benefícios ambientais trazidos pela utilização de bioplásticos e da sua real viabilidade para substituir plásticos petroquímicos, sua cadeia produtiva deve ser analisada desde a produção da biomassa a ser utilizada, visto que são necessárias grandes quantidades de área agrícola e água

para a produção das matérias-primas. A Figura 37 exibe a cadeia de produção do PLA e os impactos ambientais associados.

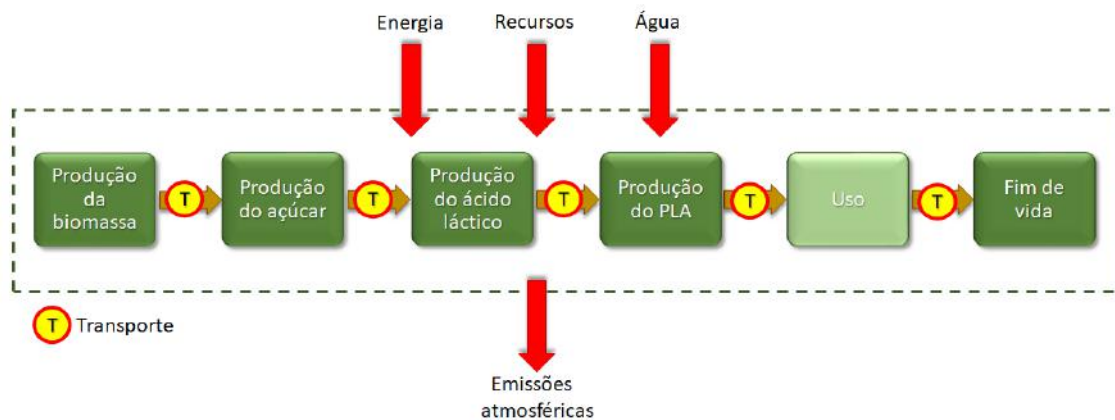


Figura 37: Cadeia de produção do PLA e os impactos ambientais associados.  
Fonte: Adaptado de Matos et al., 2015.

As quantidades de matéria-prima, área agrícola e água necessárias para a produção de uma tonelada de PLA a partir de diferentes tipos de biomassa é apresentada na Figura 38.

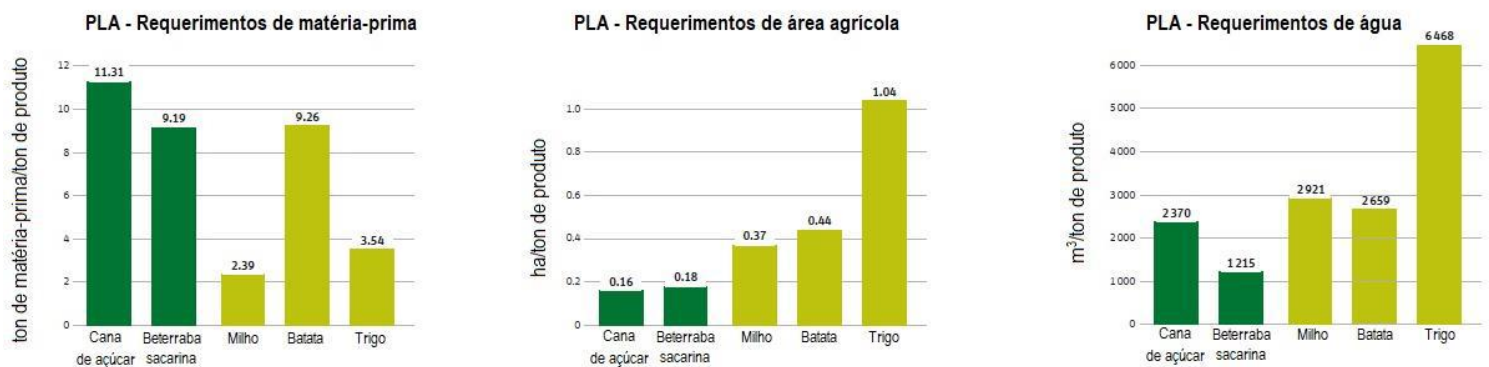


Figura 38: Requerimentos de matéria-prima, área agrícola e água para a produção de uma tonelada de PLA.  
Fonte: Adaptado de Institute for Bioplastics and Biocomposites, 2019.

A partir das figuras acima, pode-se observar que os cultivos de açúcar requerem as menores quantidades de área agrícola e água para a produção de PLA. Apesar disso, sua produção a partir desses materiais necessita de maiores quantidades de matéria-prima, o que dificulta o transporte e gera maiores quantidades de emissões atmosféricas.

Por outro lado, os cultivos de amido possuem padrões bastante distintos

entre si. Enquanto o milho se apresenta como uma boa opção para a fabricação desse biopolímero, necessitando de pouca matéria-prima, área agrícola e água, o trigo demanda quantidades extremamente altas de recursos para o seu cultivo, não sendo, assim, a matéria-prima ideal para a produção do PLA, em termos de sustentabilidade.

A análise do fim de vida do PLA é essencial para a determinação do seu potencial de acúmulo no meio ambiente. A maior parte dos filmes comerciais fabricados a partir desse biopolímero são 100% biodegradáveis e compostáveis, porém, sua biodegradabilidade depende de diversos fatores, sendo eles:

- Fatores associado à estrutura de primeira ordem, como estrutura química, peso molecular e distribuição do peso molecular;
- Fatores associados à estrutura de ordem superior, tais como temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), temperatura de fusão ( $T_m$ ), cristalinidade, estrutura cristalina e módulo de elasticidade;
- Fatores relacionados às condições da superfície do material, tais como área de superfície e propriedades hidrofílicas e hidrofóbicas (Tokiwa e Calabia, 2006).

Diversos estudos mostraram que a parte cristalina do PLA é mais resistente à degradação do que a parte amorfa, e que a taxa de degradação diminui com o aumento da cristalinidade do material (McDonald et al., 1996; Cai et al., 1996; Iwata and Doi, 1998; Tsuji and Miyauchi, 2001). Sendo assim, estruturas com maiores teores de L-lactato tendem a se degradar mais rapidamente (Li and MacCarthy, 1999).

A biodegradabilidade do PLA depende, também, das condições ambientais. Acredita-se que seja, inicialmente, degradado por hidrólise, e que os oligômeros solúveis formados sejam, então, metabolizados pelas células (Tokiwa e Calabia, 2006). Quando descartado no meio ambiente, o PLA é hidrolisado em oligômeros de baixo peso molecular que são, em seguida, mineralizados em  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  pelos microrganismos presentes no solo (Lunt, 1998 apud Tokiwa e Calabia, 2006), porém, essa degradação é lenta e pode levar longos períodos de tempo para iniciar. Por outro lado, esse biopolímero pode ser degradado em um ambiente de compostagem, onde é hidrolisado em moléculas menores (oligômeros, dímeros e monômeros) após 45-60 dias, a temperaturas de 50-60 °C. Essas moléculas menores são então degradadas em

CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O por microorganismos presentes no composto (Tokiwa e Calabia, 2006).

#### 10.1.5) Matriz SWOT

A matriz SWOT para o PLA é apresentada na Figura 39.

	Fatores Positivos	Fatores Negativos
Fatores internos	<p><u>Forças</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Independência do petróleo</li> <li>- Propriedades comparáveis aos polímeros petroquímicos</li> <li>- Biodegradabilidade e biocompatibilidade</li> <li>- É um dos biopolímeros mais produzidos no mundo, tendo um mercado consolidado</li> <li>- Possibilidade de substituir diversos polímeros de origem fóssil, tal como o PP</li> </ul>	<p><u>Fraquezas</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Altos custos de produção e métodos ainda não consolidados</li> <li>- Altos custos relacionados ao transporte da biomassa</li> <li>- Utilização de recursos naturais limitados, como área agrícola e água</li> </ul>
Fatores externos	<p><u>Oportunidades</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Desenvolvimentos de novos processos de polimerização e catalisadores podem reduzir os custos de produção</li> <li>- A possibilidade de produzir ácido láctico a partir de resíduos pode diminuir os custos de produção</li> <li>- Políticas regulamentais e aumento da conscientização ambiental do consumidor</li> </ul>	<p><u>Ameaças</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Disponibilidade de biomassa para a produção de PLA devido à concorrência com outros usos</li> <li>- Altos custos do ácido láctico, que podem ameaçar o uso do PLA em determinadas aplicações</li> <li>- Competição com o mercado de plásticos convencionais</li> </ul>

Figura 39: Matriz SWOT para o PLA.

Fonte: Fabricação própria.

##### *10.1.5.1) Forças*

O PLA é um polímero de origem biológica, ou seja, é produzido a partir de fontes renováveis. Sendo assim, esse biopolímero não é dependente do petróleo, não estando sujeito às variações de preço desse insumo, que pode ser influenciada por diversos fatores econômicos e geopolíticos (EIA, 2018).

Apesar de não ser proveniente do petróleo, o PLA possui propriedades químicas e físicas comparáveis aos polímeros petroquímicos, e pode ser

utilizado para substituí-los em diversas aplicações. Esse biomaterial também apresenta amplas possibilidades de processamento, mostrando boa adaptabilidade aos métodos utilizados no processamento de plásticos convencionais, exigindo pouco ou nenhum ajuste nas plantas industriais.

O ácido polilático é um polímero biodegradável e biocompatível. Sendo assim, se apresenta como uma possível solução para a problemática do acúmulo de resíduos plásticos no ambiente. No fim de sua vida útil, esse biopolímero pode ser biodegradado em aterros sanitários ou em ambientes de compostagem, gerando biogás que pode ser utilizado na geração de energia.

Devido a sua ampla gama de aplicações e pelas vantagens ambientais, o PLA é um dos biopolímeros mais produzidos no mundo, tendo um mercado já consolidado. O fato de ser produzido em escala comercial por empresas bem estabelecidas caracteriza uma força, pois promove a difusão do material em diversos mercados, tornando o produto cada vez mais conhecido e visado pelos consumidores finais.

Pelas vantagens já mencionadas e pela resistência ao impacto comparável à do polipropileno, o PLA se mostra como um forte candidato para substituí-lo em diversas aplicações, inclusive na fabricação de embalagens flexíveis.

#### *10.1.5.2) Fraquezas*

Apesar das boas propriedades e da ampla aplicabilidade em diversas indústrias, o alto custo de produção do PLA ainda é uma barreira para o crescimento do seu mercado. As tecnologias para a produção desse biopolímero ainda estão em desenvolvimento, com muitos processos ainda em escala-piloto (De Matos et al., 2015).

Por ser um polímero de base biológica, o PLA é produzido a partir de biomassa. Alguns tipos de biomassa precisam ser utilizados em grandes quantidades, o que torna o transporte dessas matérias-primas difícil e oneroso.

Além dos altos custos associados, a produção de biomassa necessita da utilização de recursos naturais limitados, como área agrícola e água. Isso pode causar grandes impactos ambientais, como a perda de biodiversidade e a exploração excessiva de áreas florestais. Sendo assim, o cultivo das matérias-

primas necessárias à produção do PLA deve ser realizado de maneira sustentável para que suas vantagens ambientais se concretizem.

#### *10.1.5.3) Oportunidades*

Visto que as tecnologias de produção do PLA ainda não são comercialmente consolidadas, há grandes oportunidades nessa área. O desenvolvimento de novos catalisadores metálicos e de processos de polimerização menos onerosos pode reduzir drasticamente os custos de produção desse biopolímero.

O ácido láctico é o componente básico para a produção de PLA (Tin Sin et al., 2012). A produção de ácido láctico a partir de resíduos, como o soro do leite, está em fase de protótipo (De Matos et al., 2015) e, quando implementada, também pode contribuir fortemente para a diminuição dos seus custos de produção. Além da possível redução de custos, políticas regulamentais se mostram como uma oportunidade de crescimento para o mercado de biopolímeros, inclusive do PLA. Ao redor de todo o mundo, e, principalmente, na Europa, diversas leis vêm sendo aplicadas na intenção de diminuir a utilização de plásticos de origem fóssil, favorecendo o uso de bioplásticos.

Ao mesmo tempo, a consciência ambiental dos consumidores vem aumentando nos últimos anos. A preocupação com os impactos ambientais negativos gerados pelos plásticos convencionais tem impulsionado a busca por materiais alternativos, dando destaque para os plásticos de origem biológica, principalmente, os biodegradáveis.

#### *10.1.5.4) Ameaças*

Uma das principais ameaças ao desenvolvimento de bioplásticos como o PLA é a disponibilidade de biomassa devido à concorrência com outras possibilidades de uso, principalmente, como alimentos. Apesar de a produção de biopolímeros ser responsável por apenas 0,016% da ocupação da área agrícola global (European Bioplastics, 2018), o debate “comida vs combustíveis” vem se estendendo para os bioplásticos (Zhang et al., 2010 apud OECD, 2013).

Além disso, ainda que processos que visam reduzir o custo da produção

do ácido láctico estejam em desenvolvimento, aqueles comercialmente disponíveis atualmente são bastante custosos. Ao mesmo tempo, o mercado dos plásticos convencionais se encontra mais estruturado e estabelecido, com a implementação de avanços tecnológicos capazes de baratear ainda mais os custos desses materiais (Castro, 2019), o que ainda dificulta a competição.

## 10.2) Polihidroxialcanoatos (PHAs)

Os poli(hidroxialcanoatos) (PHAs) são poliésteres termoplásticos produzidos por uma ampla variedade de microrganismos a partir de fontes diversas de carbono, como milho, cana de açúcar e óleos vegetais extraídos de soja e palma (Nogueira, 2013). Estão presentes no citoplasma das células sob a forma de grânulos rodeados por uma membrana (SERAFIM; LEMOS; REIS, 2000 apud Fonseca, 2014) e possuem a estrutura molecular apresentada na Figura 40.

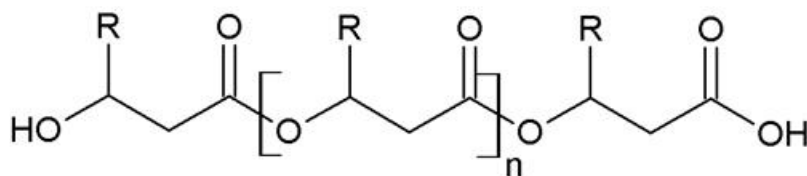


Figura 40: Estrutura geral dos PHAs.  
Fonte: ACRRES, 2017.

O monômero hidroxialcanoato é mostrado entre parênteses. O 'R' indica a presença de um grupo residual, que pode variar e, assim, formar diferentes PHAs. O tipo de PHA depende da estrutura e do comprimento da cadeia principal e das cadeias laterais (ACRRES, 2017).

Os tipos de monômeros, polímeros e copolímeros produzidos dependem da fonte de carbono e do metabolismo do microrganismo atuante. Mais de cem tipos de variantes de PHA são conhecidos, entretanto o principal polímero da família dos PHAs é o polihidroxibutirato (PHB), ou P[3HB] (Brito et al., 2011; Peelman et al., 2013), apresentado na Figura 41.



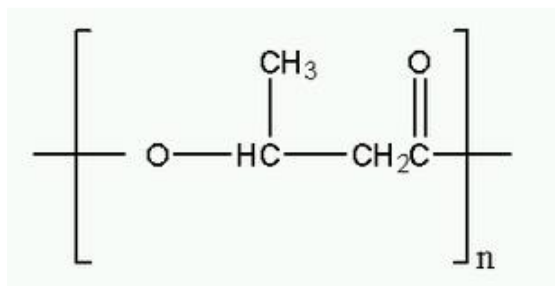


Figura 41: Estrutura do polihidroxibutirato (PHB).  
Fonte: ACRRES, 2017.

Outros copoliésteres conhecidos são:

- poli(hidroxibutirato-co-hidroxivalerato) – PHBV;
- poli (hidroxibutirato-co-hidroxihexanoato) – PHBHx;
- poli(hidroxibutirato-co-hidroxi octanoato) – PHBO;
- poli(hidroxibutirato-co-hidroxi octadecanoato) – PHBod (BRITO et al., 2011).

Os membros da família de PHAs podem apresentar uma vasta gama de propriedades, visto que, devido à facilidade de modificação dos seus grupos funcionais, existe uma ampla variedade de copolímeros que podem ser produzidos (Nogueira, 2013; Fonseca, 2014).

Os grânulos de PHB encontrados dentro das células dos microorganismos são amorfos, porém, após seu isolamento, se tornam cristalinos, apresentando percentuais de cristalinidade acima de 50% (Brito et al., 2011; Nogueira, 2013). Possuem ponto de fusão, graus de cristalinidade e temperatura de transição vítrea semelhantes à do polipropileno, o que faz com que esses dois materiais apresentem propriedades mecânicas similares (Nogueira, 2013). A Tabela 2 apresenta um comparativo entre as propriedades do PHB e do PP.

Tabela 2: Comparação entre as propriedades do PHB e do PP.

Propriedade	PHB	PP
Temperatura de Fusão (°C)	175	176
Cristalinidade (%)	80	70
Peso molecular (Daltons)	5x10 <sup>5</sup>	2x10 <sup>5</sup>
Temperatura de transição vítrea (°C)	4	-10
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,25	0,905
Módulo de flexão (GPa)	4	1,7
Resistência à tração (MPa)	48	38
Alongamento (%)	6	400
Resistência à ultravioleta	boa	ruim
Resistência à solventes	ruim	boa

Fonte: Adaptado de Markl et al., 2018.

Embora tenha propriedades interessantes, o PHB é um polímero duro e quebradiço, o que lhe confere uma fragilidade inerente que restringe suas aplicações (Ray e Bousmina, 2005). Além disso, é instável e sofre degradação em altas temperaturas, próximas ao seu ponto de fusão.

Para solucionar esses problemas, copolímeros de PHB podem ser formados pela adição simultânea de outros substratos, como ácido propiônico, à glicose, podendo resultar na formação de polímeros contendo os monômeros 3-hidroxicaproato (3HV), 3-hidroxihexanoato (HHx) ou 4-hidroxibutirato (4HB) (Fonseca, 2014). A incorporação de 3HV na cadeia de PHB resulta no polímero poli(3-hidroxibutirato-co-3-hidroxicaproato) ([P(3HB-3HV)], ou (PHBV), que apresenta melhores propriedades químicas e físicas, capazes de atender uma ampla gama de aplicações. As propriedades de processamento e as propriedades mecânicas do PHBV são superiores em relação às do PHB, no entanto, esse copolímero ainda apresenta algumas desvantagens, como baixa taxa de cristalização, condições de processamento relativamente mais complexas e baixo alongamento na ruptura, que precisam ser sanadas para permitir sua aplicabilidade em larga escala (Ray e Bousmina, 2005).

Amplas possibilidades de modificações dos PHAs são possíveis, tanto em relação à utilização de diferentes microrganismos, quanto à utilização de diferentes tipos de biomassa como fonte de carbono. O benefício de modular

racionalmente as características do polímero no biorreator oferece a oportunidade de gerar produtos com diversas propriedades, ainda em potencial de descoberta (Nogueira, 2013).

#### 10.2.1) Síntese

Os PHAs podem ser obtidos por três vias: pela polimerização por abertura de anel da  $\beta$ -butirolactona racêmica (via sintética), pela fermentação de fontes renováveis e não renováveis por microrganismos e pela produção por plantas geneticamente modificadas (Fonseca, 2014). A síntese por microrganismos é o meio mais utilizado para a obtenção de PHB para fins industriais ou para pesquisa (TADA, 2009), e, por isso, será o único abordado no presente trabalho.

Os PHAs podem ser sintetizados por diversos microrganismos a partir da fermentação de açúcares, ácidos graxos e resíduos desses produtos. Os microrganismos produtores são, geralmente, bactérias encontradas na natureza (Byron, 1987 apud Fonseca, 2014) e a capacidade de realizar este processo de polimerização é dependente da presença de uma enzima conhecida como PHA sintase (Brito et al., 2011). As fontes de carbono assimiladas são bioquimicamente transformadas em unidades de hidroxialcanoatos, polimerizadas e armazenadas na forma de inclusões insolúveis em água no citoplasma da célula (Brito et al., 2011).

Grande parte dos custos associados à produção de PHAs é relacionada à escolha do microrganismo ideal. É desejável que as cepas tenham velocidades específicas de crescimento e de produção elevadas, que possam utilizar substratos de baixo custo e que tenham alto fator de conversão de substrato em produto (Ramsey, 1994 apud Fonseca, 2014). O processo de extração do polímero também representa um alto percentual do custo de produção desse biopolímero e, sendo assim, para que essa produção seja rentável, a cepa produtora deve ter capacidade de acumular pelo menos 60% de sua massa celular em polímero (Byron, 1987; Viegas, 2005). A Tabela 3 apresenta alguns microrganismos produtores de PHA e suas respectivas capacidades de acumulação desse polímero.

Tabela 3: Microrganismos produtores de PHAs.

<b>Microrganismo</b>	<b>% de acúmulo</b>
Ralstonia eutropha	96
Rhodobacter	80
Azospirillum	75
Azobacter	73
Baggiatoa	57
Leptothrix	67
Melhyocystis	70
Pseudomonas	67
Rhizobium	57

Fonte: Viegas 2005 apud Fonseca, 2014.

A *Ralstonia eutropha* (previamente conhecida por *Alcaligenes eutrophus*) é um dos microrganismos mais estudados e aplicados na produção dos PHAs, podendo crescer em grandes reatores fermentativos (Ray e Bousm, 2005 apud Nogueira 2013). A produção desse biopolímero com a utilização de *R.eutropha* é realizada em duas etapas, sendo a primeira etapa de crescimento não limitado, visando o aumento de massa celular, e a segunda, de acúmulo do polímero, em condições de excesso de carbono e limitação de pelo menos um nutriente necessário à multiplicação das células (N, P, Mg, Fe) (Byron, 1987; Brito et al., 2011). Quando o estado de equilíbrio é atingido, o material polimérico é extraído com a utilização de solventes, tais como clorofórmio, cloreto de metileno ou cloreto de propileno (Chiellini e Solaro, 1996; Peelman et al., 2013).

O tipo de microrganismo utilizado e as condições de operação influenciam no peso molecular do polímero obtido, que pode variar de  $2 \times 10^5$  a  $3 \times 10^6$  Da. A maior parte dos PHAs produzidos comercialmente são sintetizados por culturas puras de bactérias, com a utilização de fontes de carbono simples, como açúcares e ácidos graxos. A Figura 42 mostra a cadeia de produção desse biopolímero, enquanto que a Figura 43 apresenta suas etapas de produção a partir das biomassas mais comumente utilizadas.

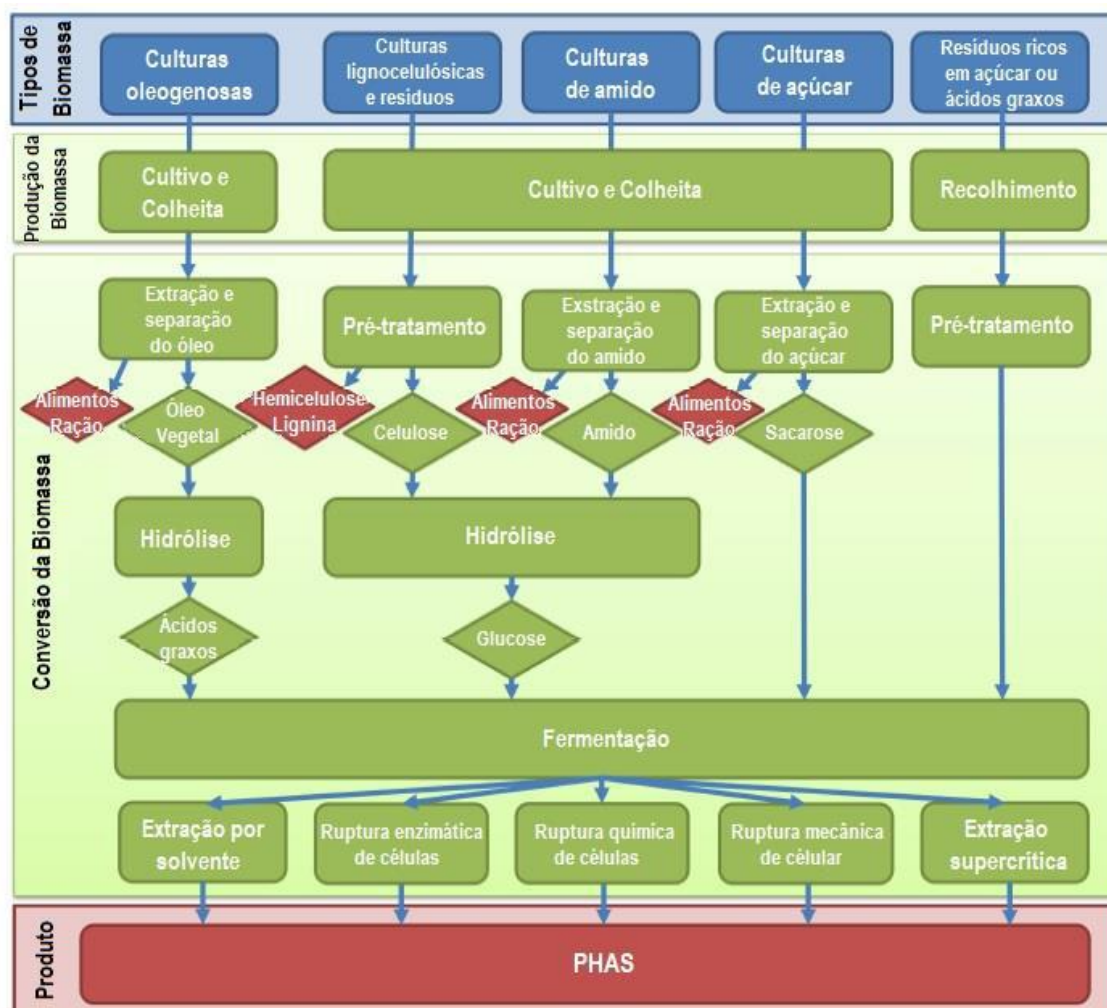


Figura 42: Cadeia de produção dos PHAs.  
Fonte: Adaptado de Matos et al., 2015.

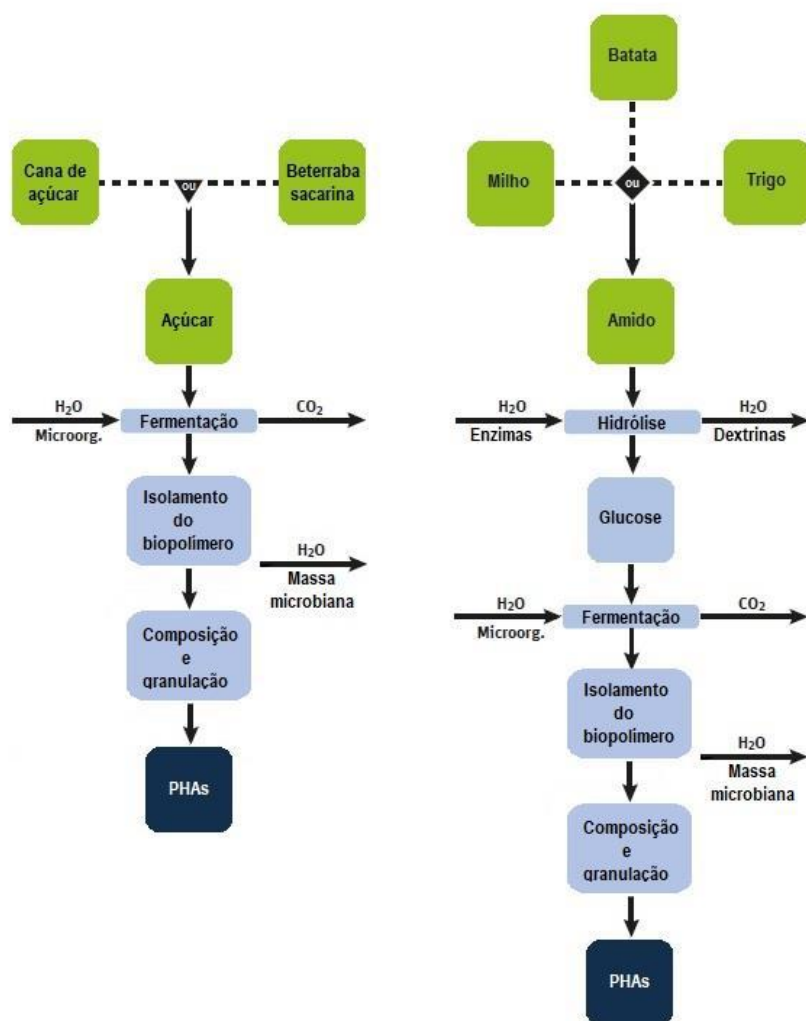


Figura 43: Etapas de produção de PHAs a partir das biomassas mais utilizadas.  
 Fonte: Adaptado de Institute for Bioplastics and Biocomposites, 2019.

Os custos de produção dos PHAs são bastante elevados e, por isso, pesquisas vêm sendo realizadas visando o desenvolvimento de novos processos que utilizem matérias-primas mais baratas, tais como resíduos ou materiais não refinados; culturas bacterianas mistas e novas soluções para a obtenção de rendimentos mais altos (De Matos et al., 2015). A extração do biopolímero é, geralmente, realizada com a utilização de solventes orgânicos, porém, grandes quantidades de solvente são necessárias, reduzindo o desempenho ambiental e aumentando os custos de produção dos PHAs. Alternativas para os métodos convencionais de extração vêm sendo estudadas, tais como a extração em fluidos supercríticos, na qual o CO<sub>2</sub> supercrítico atua como solvente a altas pressões; a ruptura enzimática, química e mecânica de células para a liberação do biopolímero e o uso de microrganismos geneticamente modificados que

Uma possibilidade de avanço para a produção de PHAs reside na aplicação da engenharia genética, com a utilização de microorganismos selvagens e recombinantes, processos *in vitro* e plantas transgênicas. O sucesso dessas plantas, que são capazes de produzir grandes quantidades de PHA, pode, eventualmente, tornar o preço desse biopolímero comparável com o dos plásticos convencionais (Nogueira, 2013; De Matos et al., 2015).

[illegible]

### 10.2.2) Processabilidade

Assim como o PLA, PHAs também são sensíveis às condições de processo, sendo, da mesma forma, necessária a adição de agentes plastificantes para a melhora da sua processabilidade. O PHB é instável em altas

temperaturas e, sendo assim, tempos de processamento reduzidos são mais indicados. O percentual de hidroxivalerato (HV) nos copolímeros melhoram as condições de processo, aumentando a resistência ao impacto do material e reduzindo sua temperatura de fusão, temperatura de transição vítrea, cristalinidade, permeabilidade à água e resistência à tração (Reddy et al, 2013; Wessler, 2007 apud Fonseca, 2014).

A produção de blendas de PHB com outros polímeros também pode melhorar suas propriedades físicas e, conseqüentemente, sua processabilidade. Essas blendas podem ou não ser biodegradáveis, de acordo com o polímero utilizado, e apresentam baixos custos em relação ao PHB puro (Quental et al., 2010 apud Fonseca, 2014).

Apesar de a instabilidade térmica do PHB dificultar bastante o seu processamento, com a utilização de parâmetros adequados é perfeitamente viável processar esse material sem comprometer suas propriedades (Quental et al., 2010).

#### 10.2.3) Custos de produção e mercado

O alto custo de produção dos PHAs é visto como uma das principais barreiras para a utilização desses materiais como substitutos para os polímeros de origem fóssil (Fonseca, 2014). Até o momento, seu preço é, em geral, muito mais alto quando comparado a outros biopolímeros, como o PLA, devido aos altos custos relacionados à matéria-prima, à extração e purificação do fermentado e à baixa produtividade (Wolf et al, 2005 apud ACRRES, 2017).

O preço de mercado do PHA em 2014 era de €4-5 por kg do biopolímero, sendo que um percentual entre 40% e 50% desse valor é relativo ao custo da matéria-prima, já que, aproximadamente, 5kg de biomassa são necessários para a produção de 1 kg de produto (ACRRES, 2017). Sendo assim, a utilização de fontes de carbono baratas e plantas geneticamente modificadas, além do desenvolvimento de novas formas de aumentar as taxas de produtividade, devem levar à redução do custo desse material.

O mercado global de PHAs foi estimado em US\$ 57 milhões em 2019 e está projetado para alcançar um valor de US\$ 98 milhões em 2024, apresentando uma taxa de crescimento composta (CAGR) de 11,2% nesse



período (Markets and Markets, 2019; Markets Insider, 2019). Esse mercado é segmentado em PHAs copolimerizados e lineares. O segmento de PHAs copolimerizados é responsável pela maior parte da geração de receita devido a suas propriedades eficientes, como melhor flexibilidade, maior tenacidade e maior facilidade de processamento (Allied Market Research, 2020).

As aplicações dos PHAs são diversas, tais como na área de agricultura, embalagens, biomédica, entre outras. O setor de embalagens e alimentos é o maior consumidor desses materiais, e a previsão é de que esse domínio continue a crescer com o aumento da demanda por bioplásticos e plásticos biodegradáveis para embalagens, como sacolas plásticas e filmes (Markets and Markets, 2019; Allied Market Research, 2020).

Assim como para outros bioplásticos, como o PLA, as tendências regulatórias e as mudanças no comportamento do consumidor são fatores que impulsionam o mercado dos PHAs (Markets and Markets, 2019). A Europa, seguida pela Ásia, domina esse mercado, devido, principalmente, a fatores como o aumento relativo da renda disponível do consumidor e a presença de grande quantidade de indústrias produtoras de PHAs, resultando em maior capital para investimentos em P&D (Allied Market Research, 2020).

O mercado de PHAs está em crescimento. As principais estratégias adotadas pelas empresas para expandir esse mercado são lançamentos, fusões e aquisições de produtos, além de acordos e colaborações e seus principais *players* incluem Kaneka Corporation (Japão), Danimer Scientific. (EUA), Shenzhen Ecomann Biotechnology Co., Ltd (China), Bio-On Srl (Itália), Newlight Technologies, LLC (EUA) e TianAn Biological Materials Co. Ltd. (China) (Markets and Markets, 2019; Allied Market Research, 2020).

A Danimer Scientific (EUA) é, atualmente, o maior *player* no mercado de PHAs e vem desenvolvendo seus negócios por meio de expansões em países na região Ásia-Pacífico e na América do Norte e de parcerias com várias empresas de uso final. Sua versátil tecnologia e sua experiência em formulação de polímeros permitem o desenvolvimento de PHAs de cadeia média, que podem ser empregados em diversas aplicações. Com a divisão Frito-Lay da PepsiCo, a Danimer vem desenvolvendo um material para a confecção dos filmes utilizados em lanches, que, atualmente, são feitos com polipropileno (Tullo, 2019). Isso demonstra a capacidade dos PHAs de substituir esse polímero

na fabricação de embalagens flexíveis.

No Brasil, a produção de PHB foi beneficiada pela presença e abundância de substratos de baixo custo fornecidos pela indústria sucroalcooleira (TADA, 2009 apud Fonseca, 2014). As vantagens fornecidas por essas usinas, tais como substratos de baixo custo, energia e solventes para extração, permitiram que o custo de produção do PHB pela PHB Industrial seja o menor do mundo (Fonseca, 2014).

#### 10.2.4) Aspectos ambientais

Como explicitado anteriormente, toda a cadeia produtiva de um bioplástico deve ser analisada a fim de se determinar seus reais benefícios ambientais e viabilidade. A cadeia produtiva do PHAs, assim como os impactos ambientais associados, é mostrada na Figura 45.

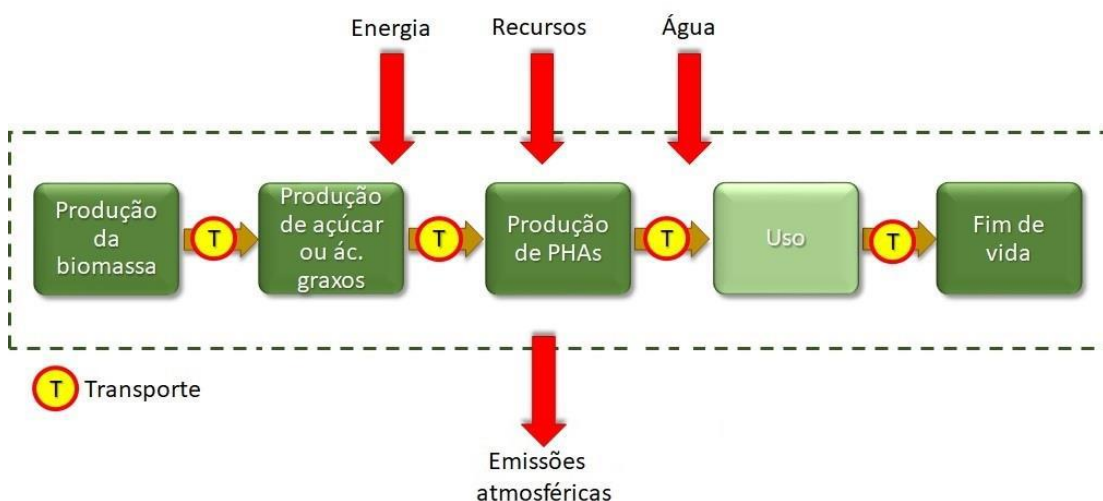


Figura 45: Cadeia de produção de PHAs e os impactos ambientais associados.  
Fonte: Adaptado de De Matos et al., 2015.

As quantidades de matéria-prima, área agrícola e água necessárias para a produção de uma tonelada de PLA a partir de diferentes tipos de biomassa é apresentada na Figura 46.

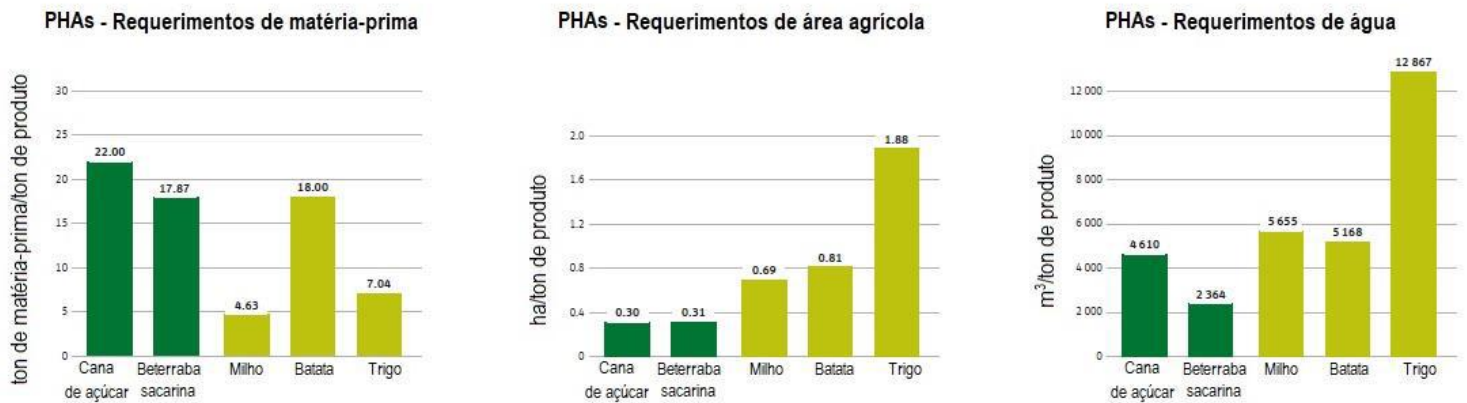


Figura 46: Requerimentos de matéria-prima, área agrícola e água para a produção de uma tonelada de PHA.

Fonte: Adaptado de Institute for Bioplastics and Biocomposites, 2019.

A produção de PHA necessita de mais recursos naturais quando comparada à produção do PLA e os cultivos de açúcar e do milho continuam se mostrando como as biomassas mais promissoras, dentre as analisadas, em termos de sustentabilidade.

Devido às altas quantidades de matéria-prima necessárias para a produção desses biopolímeros, as emissões atmosféricas geradas pelo transporte desses materiais podem ser significativas, enquanto que a utilização de grandes quantidades de água pode trazer reações adversas ao meio ambiente, visto que esse insumo representa um recurso natural limitado.

A Figura 47 representa a inserção do PHA no ciclo biológico, atendendo assim, aos princípios da Bioeconomia Circular. Ao ser biodegradado, esse material libera CO<sub>2</sub> e água, que podem ser utilizados no cultivo da biomassa, reduzindo, assim, os impactos ambientais causados pela produção das suas matérias-primas.

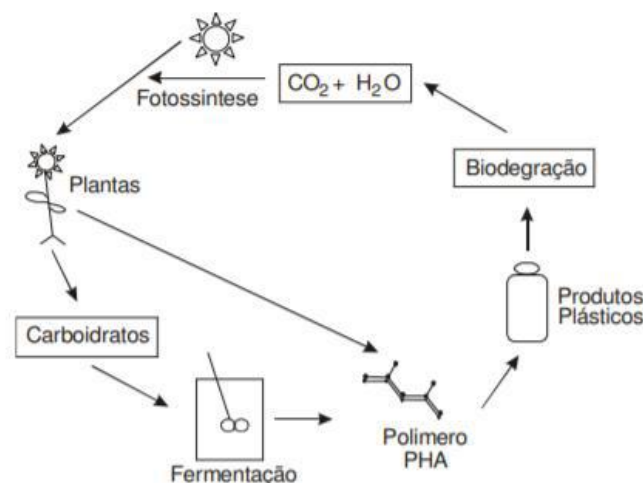


Figura 47: Ciclo biológico dos PHAs.  
Fonte: Bucci, 2013.

A biodegradabilidade dos PHAs faz com que seu uso em embalagens, principalmente alimentícias, seja uma boa solução para a diminuição da quantidade de resíduos plásticos no meio ambiente (Bucci, 2003). Sua biodegradação pode ocorrer em diversos meios que apresentam alta atividade microbiana, tais como solos, lagos, ambientes marinhos e, até mesmo, lodo de esgotos (Ong et al., 2017). Esse processo ocorre através de enzimas conhecidas como *PHA depolymerase*, que são secretadas por microrganismos para hidrolisar o PHA insolúvel em água, produzindo moléculas solúveis que podem ser, então, utilizadas por esses agentes microbiológicos (Ong et al., 2017).

Além da atividade enzimática, as condições ambientais, como temperatura, população microbiana, suprimento de nutrientes, pH, disponibilidade de oxigênio e nível de umidade, bem como as propriedades dos PHAs, incluindo sua área superficial, sua composição e cristalinidade, também exercem grande influência sobre a taxa de biodegradação desses polímeros (Bucci, 2003; Ong et al., 2017).

O PHB e o PHBV podem ser degradados tanto em meios aeróbios, quanto anaeróbios, gerando dióxido de carbono, água e biomassa ou dióxido de carbono, água, metano e biomassa, respectivamente (Bucci, 2003). A degradação desses PHAs por microrganismos pode ser realizada de duas maneiras: intracelular e extracelular.

A degradação intracelular ocorre em condições limitantes de carbono, nas quais os grânulos de PHA acumulados nas células são hidrolisados como fontes

de carbono e energia. Esse processo é realizado por organismos capazes de acumular PHB e PHBV e, sendo assim, degrada somente grânulos em estado nativo ou amorfo (Bucci, 2003; Ong et al., 2017). A degradação intracelular de PHB resulta na liberação do ácido 3-hidroxibutírico, que é oxidado por uma desidrogenase em acetoacetyl-CoA, que é, então, convertido em acetyl-CoA pela enzima  $\beta$ -cetotiolase. Esses produtos são naturalmente encontrados em animais e, assim, a biodegradação do PHA em células vivas não causa a formação de compostos tóxicos, sendo esse material, portanto, classificado como um material biocompatível (Ong et al., 2017).

Por sua vez, a degradação extracelular é realizada por algumas bactérias e fungos, sendo a *PHB depolymerase* extracelular capaz de degradar PHB em estados altamente cristalinos (Bucci, 2003).

#### 10.2.5) Matriz SWOT

A matriz SWOT para os PHAs é apresentada na Figura 48.

	Fatores Positivos	Fatores Negativos
Fatores internos	<p><u>Forças</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Independência do petróleo</li> <li>- Existência de copolímeros</li> <li>- Possibilidade de blends</li> <li>- Biodegradabilidade e biocompatibilidade</li> <li>- Possibilidade de substituir o PP</li> </ul>	<p><u>Fraquezas</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Altos custos de produção</li> <li>- Altos volumes de biomassa necessários</li> <li>- Utilização de grandes quantidades de água</li> <li>- Altos custos e impactos ambientais relacionados ao transporte da biomassa</li> </ul>
Fatores externos	<p><u>Oportunidades</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Novos desenvolvimentos na extração e produção de PHAs</li> <li>- Aplicação de engenharia genética</li> <li>- Políticas regulamentais e aumento da conscientização ambiental do consumidor</li> </ul>	<p><u>Ameaças</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Disponibilidade de biomassa para a produção de PHAs devido à concorrência com outros usos</li> <li>- Altos custos de matéria-prima</li> <li>- Competição com o mercado de plásticos convencionais</li> </ul>

Figura 48: Matriz SWOT para os PHAs.  
Fonte: Fabricação própria.

#### 10.2.5.1) Forças

Assim como o PLA, PHAs são polímero de origem biológica, não sendo dependentes do petróleo e, por consequência, não estando sujeitos às variações de preço desse insumo, que pode ser influenciada por diversos fatores econômicos e geopolíticos (EIA, 2018).

A estrutura molecular dos PHAs permite a formação de diversos copolímeros. Atualmente, cerca de 150 composições monoméricas desse polímero são conhecidas (De Matos et al., 2015), apresentando uma alta variedade de propriedades e aplicações. Além disso, a produção de blends de PHAs com outros polímeros, que podem ou não ser biodegradáveis, também pode melhorar suas propriedades físicas e, conseqüentemente, sua processabilidade, aumentando a aplicabilidade desses biopolímeros em diversos setores (Quental et al., 2010.).

Os PHAs são polímeros biodegradáveis. Sua degradação pode ocorrer nos mais variados meios, tais como solos, lagos, ambientes marinhos e lodo de esgotos (Ong et al., 2017). A degradação desses biopolímeros em células vivas gera produtos naturalmente encontrado em animais e, portanto, esses materiais podem ser classificados como biocompatíveis (Ong et al., 2017).

O PHB e o PHBV podem ser biodegradados tanto em ambiente aeróbios, quanto anaeróbios, o que os tornam polímeros passíveis de compostagem e digestão anaeróbia. Essa propriedade facilita o gerenciamento dos resíduos desses materiais, visto que os agentes biológicos, tais como bactérias e fungos, consomem o polímero como tipo de alimento, fazendo com que o material original desapareça sem deixar resíduos perigosos ou tóxicos para o meio ambiente (Bucci, 2003).

Pelas vantagens já mencionadas, os PHAs demonstram boas possibilidades de substituir o polipropileno na fabricação de embalagens flexíveis, com processos já em desenvolvimento para a fabricação de filmes para embalar lanches (Tullo, 2019).

#### 10.2.5.2) Fraquezas

Apesar da sua ampla gama de propriedades, os PHAs ainda se

apresentam como um dos tipos de biopolímeros mais caros. Seus altos custos de produção são devidos, principalmente, às altas demandas de matéria-prima para sua fabricação, aos processos de extração necessários para a retirada do produto das células e às baixas taxas de produtividade (ACRRES, 2017).

Devido às baixas taxas de conversão, cerca de 5kg de biomassa são necessários para a produção de 1 kg de PHAs (ACRRES, 2017), o que torna sua fabricação dependente de grandes quantidades de biomassa e água.

A água é um recurso natural limitado e sua utilização em excesso é altamente prejudicial ao planeta, podendo afetar diversos biomas. Além disso, necessidade de grandes quantidades de biomassa não só encarecer o processo de fabricação dos PHAs, como torna o transporte dessas matérias-primas mais complicado, aumentando as emissões atmosféricas, e, conseqüentemente, os impactos ambientais gerados pela produção desses materiais.

#### *10.2.5.3) Oportunidades*

Visto que a principal barreira à ampliação da utilização de PHAs é o alto custo de produção, as principais oportunidades relacionadas a esse material se encontram no desenvolvimento de métodos para o barateamento da sua fabricação.

Novos métodos focados na utilização de matérias-primas mais baratas, na possibilidade de utilização de culturas bacterianas mistas e na elevação das taxas de produtividade vêm sendo desenvolvidos (De Matos et al., 2015).

A aplicação da engenharia genética também se configura como uma grande possibilidade de avanço para o mercado dos PHAs, principalmente, com a utilização de plantas transgênicas, que são capazes de produzir grandes quantidades desse polímero e, eventualmente, tornar o seu preço desse comparável com o dos plásticos convencionais (Nogueira, 2013; De Matos et al., 2015).

Assim como para o PLA, a implementação de políticas regulamentais e o aumento da consciência ambiental do consumidor também caracterizam oportunidades para os PHAs. Leis que favorecem o uso de bioplásticos em detrimento dos polímeros de origem fóssil vêm sendo criadas em diversos países ao redor do mundo, ao mesmo tempo que os impactos negativos causados pelo

descarte de plásticos petroquímicos no ambiente vêm gerando grandes preocupações por parte do consumidor, que começa a buscar materiais substitutos, mostrando preferência pelos biodegradáveis.

#### *10.2.5.4) Ameaças*

O debate “comida vs combustíveis”, que vem se estendendo, também, para os bioplásticos (Zhang et al., 2010 apud OECD, 2013), caracteriza uma ameaça para o crescimento do mercado dos PHAs Apesar de a produção de biopolímeros ser responsável por apenas 0,016% da ocupação da área agrícola global (European Bioplastics, 2018), a preocupação com a produção de biomassa para a fabricação de bioplásticos em detrimento de alimentos ainda é uma realidade.

O custo da matéria-prima representa um percentual entre 40% e 50% do custo total de produção dos PHAs (ACRRES, 2017). Novas formas de baratear esses custos, como a produção a partir de resíduos ricos em açúcar ou ácidos graxos e a utilização de plantas transgênicas, vêm sendo desenvolvidos, porém, os métodos atuais de fabricação ainda são vistos como empecilhos para novos investimentos.

O mercado dos plásticos convencionais é estruturado e estabelecido, com a implementação de avanços tecnológicos capazes de baratear ainda mais os custos desses materiais (Castro, 2019). Sendo assim, a capacidade dos PHAs de competirem com esse mercado é fortemente dependente da redução dos seus custos de produção.

## **11) CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A utilização de embalagens plásticas flexíveis vem crescendo ao redor do mundo e o polipropileno é um dos materiais mais utilizados, atualmente, para a confecção desses produtos. Apesar das vantagens intrínsecas ao uso desse polímero, o descarte inadequado de plásticos de origem fóssil se apresenta como um dos principais geradores de impactos ambientais, visto os grandes volumes gerados por itens de descarte rápido, tais como embalagens flexíveis,



e os longos tempos de degradação desses materiais.

Nesse contexto, o conceito de Bioeconomia ganha cada vez mais força, com a substituição do polipropileno por biopolímeros biodegradáveis na fabricação de embalagens plásticas flexíveis, que é vista como uma possível solução para o acúmulo desses produtos no meio ambiente.

Os biopolímeros biodegradáveis se apresentam como uma alternativa aos plásticos convencionais e prometem diminuir a quantidade de resíduos depositados na natureza. Entretanto, em condições não controladas, esses materiais podem não ser totalmente decompostos, gerando rejeitos que podem ser tão ou mais prejudiciais do que os rejeitos plásticos. Sendo assim, a inserção desses produtos em um modelo de Bioeconomia Circular é fundamental para a otimização dos seus benefícios ambientais, possibilitando um gerenciamento de resíduos adequado.

A produção de biopolímeros ainda encontra alguns obstáculos que precisam ser perpassados, sendo a utilização de recursos naturais limitados e os seus custos de produção, os principais. Apesar de serem produzidos a partir de fontes biológicas renováveis, a fabricação das biomassas utilizadas como matérias-primas demandam áreas agrícolas e água, que devem ser utilizados de maneira sustentável, evitando seu uso excessivo e garantindo que a produção não gere impactos negativos. Além disso, bioplásticos ainda apresentam custos elevados quando comparados aos plásticos de origem fóssil.

Apesar de ainda possuírem pequenas fatias do mercado, a produção de bioplásticos vêm crescendo a altas taxas ao longo dos últimos anos. Diante disso, dois dos principais biopolímeros cotados para substituir o polipropileno na produção de filmes para embalagens flexíveis, o políácido láctico (PLA) e os polihidroxialcanoatos (PHAs), foram analisados em termos de suas propriedades, processos produtivos, aspectos ambientais, econômicos e de mercado.

As análises SWOT realizadas para cada um dos materiais analisados possibilitaram uma melhor visualização dos fatores que influenciam a produção e os impactos ambientais gerados por cada um desses materiais, facilitando a predição da real viabilidade de aplicação dos mesmos na indústria de embalagens flexíveis. O polipropileno ainda se apresenta como o principal plástico utilizado por essa indústria, visto suas propriedades, baixo custo e

processos de fabricação otimizados, que contribuem para a consolidação desse material no mercado. Esse polímero ainda apresenta oportunidades de crescimento, principalmente, com novos métodos de produção *on-purpose* e investimentos na indústria de reciclagem, que tornariam a utilização do PP mais sustentável. Por outro lado, os grandes danos ambientais causados pelo acúmulo desse material no ambiente, unidos à sua dependência do petróleo, abrem espaço para o surgimento de biopolímeros passíveis de substituí-lo.

O PLA se apresenta como um dos biopolímeros mais produzidos no mundo e, sendo assim, já possui um mercado relativamente consolidado. Por ser produzido a partir de fontes renováveis, não depende do petróleo e sua biodegradabilidade torna possível a eliminação de resíduos que poderiam ser tóxicos ao ambiente. Novos métodos de síntese prometem baratear os custos de produção desse material, tornando-o mais atraente para novos investidores. Suas propriedades, comparáveis às dos polímeros petroquímicos, e a sua boa processabilidade contribuem para as altas taxas de crescimento esperadas ao longo dos próximos anos, com a permanência da indústria de embalagens como uma das suas maiores consumidoras.

Já os PHAs, possuem vantagens, como a possibilidade de modificação controlada de suas estruturas, visando a melhoria de suas propriedades, e a possibilidade de utilização em blendas, que os tornam bastante promissores. Apesar disso, o seu preço ainda é muito mais alto quando comparado a outros biopolímeros e, dessa forma, novas tecnologias precisam ser desenvolvidas para que esse material se torne mais competitivo. Os altos custos relacionados à matéria-prima e à extração do polímero das células, além das baixas taxas de produtividade, fazem com que o mercado de PHAs ainda seja pequeno se comparado ao mercado do PLA.

Diante das análises iniciais, observou-se que, apesar dos altos custos de produção quando comparados ao polipropileno, o PLA e os PHAs vêm sendo estudados intensamente com o objetivo de baratear esses custos através do desenvolvimento de novas tecnologias que permitam a otimização de seus processamentos, a otimização da conversão de matéria prima em produto e a utilização de fontes de baixo custo e mais ecologicamente sustentáveis.

A tendência do mercado de plásticos de substituir polímeros de origem fóssil por biopolímeros vem sendo impulsionada pela implementação, em todo o

mundo, de políticas regulamentais que favorecem a utilização de bioplásticos em detrimento de plásticos convencionais e pelo aumento da consciência ambiental dos consumidores. Dessa forma, os biopolímeros biodegradáveis, tais como o PLA e os PHAs, apresentam um papel de destaque e têm a entrada no mercado facilitada.

Ainda assim, é notável que, apesar de a produção e o mercado de PLA estarem mais avançados do que a produção e o mercado dos PHAs, nenhum dos dois biopolímeros possui, atualmente, capacidade para substituir totalmente o polipropileno, que se encontra consolidado no mercado de embalagens plásticas flexíveis. Apesar disso, tendências demonstram um aumento na capacidade global desses biopolímeros.

A diminuição dos custos de produção caracteriza um fator determinante para o sucesso do PLA e dos PHAs. Dessa forma, o apoio e financiamento dos órgãos governamentais, unidos à grandes empresas e à centros de pesquisa, é imprescindível para a obtenção de capital para investimentos que permitam a busca por novas tecnologias capazes de viabilizar a produção em larga escala desses materiais.

Vale ressaltar que, apesar da produção mais barata, os verdadeiros custos dos plásticos de origem fóssil vão além desse aspecto. O acúmulo desses materiais vem afetando o meio ambiente, introduzindo os microplásticos na cadeia alimentar e contaminando os solos, impactando negativamente a saúde dos animais e dos seres humanos. O manejo eficiente de todo o lixo plástico gerado seria muito caro e, caso fosse realizado, o custo desses materiais aumentaria de forma considerável. Além disso, se no seu preço fosse incluído um imposto para cobrir os custos ambientais e de saúde, eles deixariam de ser tão baratos, fazendo com que empresas e consumidores começassem a substituí-los por outras alternativas.

Futuras pesquisas, como avaliações dos ciclos de vida do PLA e dos PHAs, devem ser realizadas para análise de todos os impactos ambientais associados à cadeia produtiva desses biopolímeros. Esses dados são essenciais para se determinar os reais benefícios ambientais que a substituição do polipropileno por esses materiais na fabricação de embalagens flexíveis pode trazer ao planeta.

## 12) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIEF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS PLÁSTICAS FLEXÍVEIS. Guia 2016/2017. São Paulo: ABIEF, 2016.

ABIEF – FLEX TENDÊNCIAS. Disponível em:  
<<http://www.abief.org.br/noticias>>. Acesso em: 19 dez. 2019.

ABIPLAST – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. Perfil 2017. São Paulo: ABIPLAST, 2017.

ABIPLAST – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. Perfil 2018. São Paulo: ABIPLAST, 2018.

ABRE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM. Diretrizes de Sustentabilidade para a Cadeia Produtiva de Embalagens e Bens de Consumo. 3ª ed. São Paulo: ABRE, 2011.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017. São Paulo: ABRELPE, 2018.

ABI-RAMIA, N. M. *Modelagem, Simulação e Otimização da Polimerização em Suspensão do PVC*. 2012. 177f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

ACRRES – APPLICATION CENTRE FOR RENEWABLE RESOURCES. PHA's (Polyhydroxyalkanoates): General information on structure and raw materials for their production. Lelystad: ACRRES – Wageningen UR, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2018. Rio de Janeiro: ANP, 2018.

ALLIED MARKET RESEARCH. Bio-polylactic Acid (PLA) Films Market. Disponível em: <<https://www.alliedmarketresearch.com/bio-polylactic-acid-PLA-films-market>>. Acesso em: 14 jan. 2020.

ALLIED MARKET RESEARCH. World Polyhydroxyalkanoate (PHA) Market - Opportunities and Forecasts, 2020-2027. 2020. Disponível em: <<https://www.alliedmarketresearch.com/polyhydroxyalkanoate-market>>. Acesso em: 13 jan. 2020.

AMARAL, M. A.; BORSCHIVER, S; MORGADO, C. R. V. Análise do segmento de bioplásticos: prospecção tecnológica em “plásticos verdes”, PHA e PLA. ENGEVISTA, v. 21, n.2, p.228-241, 2019.

AMERICAN PLASTIC COUNCIL. Understanding Plastic Films: Its Uses, Benefits and Waste Management Options. Estados Unidos: American Plastics

Council, Inc., 1997.

ANDRADY, A. L.; NEAL, M. A. Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 364, p. 1977-1984, 2009.

ARIZTON ADVISORY & INTELLIGENCE. Global Flexible Packaging Market to Reach Revenues of Over \$186 Billion by 2024. Disponível em: <<https://www.prnewswire.com/news-releases/global-flexible-packaging--market-to-reach-revenues-of-over-186-billion-by-2024--market-research-report-by-arizton-300915990.html>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

ASSIS, E. C. *Embalagens alimentícias produzidas em polihidroxido butirato (PHB), como alternativa ao gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos*. 2009. 96f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Produção) – Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, São Paulo, 2009.

AUMILLER, A. et al. Análise do Processo Produtivo de Filmes Poliméricos Utilizando a Metodologia de Produção Mais Limpa. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET/UFMS*, v. 18, n.2, p. 887-907, 2014.

BASTOS, V. D. Biopolímeros e Polímeros de Matérias-Primas Renováveis Alternativos aos Petroquímicos. *Revista do BNDES*, v. 14, n.28, p. 201-234, 2007.

BERKESCH, S. *Biodegradable Polymers: A Rebirth of Plastic*. Michigan State University, 2015.

Brasil tem bom índice de coleta plástica, mas recicla pouco. Bluevision. Disponível em: <<https://bluevisionbraskem.com/inteligencia/brasil-tem-bom-indice-de-coleta-de-lixo-plastico-mas-recicla-pouco/>>. Acesso em: 12 dez. 2019.

BRASKEM. *O Plástico no Planeta: O uso consciente torna o mundo mais sustentável*. São Paulo: Braskem, 2012.

BRASKEM. *Relatório Anual 2018*. São Paulo: BRASKEM, 2018.

BRAZEL, C. S.; ROSEN, S. L. *Fundamental Principles of Polymeric Materials*. 3ª ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012.

BRITO, G. F. et al. Biopolímeros, Polímeros Biodegradáveis e Polímeros Verdes. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v.6.2, p. 127-139, 2011.

BUCCI, D. Z. *Avaliação de embalagens de PHB (Poli(ácido 3-hidroxibutírico)) para alimentos*. 2003. 166f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

BYRON, D. Polymer synthesis by microorganisms: technology and economics. *Trends in Biotechnology*, v. 5, p. 246-250. 1987.

CAI H. et al. Effects of physical aging, crystallinity, and orientation on the enzymatic degradation of poly(lactic acid). J Polym Sci B Polym Phys, v. 34, p. 2701-2708, 1996.

CANEVAROLO JUNIOR, S. B. Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006.

CARUS, M.; DAMMER, L. The Circular Bioeconomy – Concepts, Opportunities, and Limitations. MARY ANN LIEBER T, INC., v. 14, n.2, 2018.

CARVALHO, L. B. *Produção de Polipropileno Bi-Orientado (BOPP): Tecnologia e Aplicações*. 2008. 44f. Dissertação de Mestrado – Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança, Bragança, 2008.

CARVALHO, L. M.; RIBEIRO, F. J. S. P. IPEA - INDICADORES DE CONSUMO APARENTE DE BENS INDUSTRIAIS. 2012. Disponível em: <[http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/4263/1/Carta\\_Conjuntura\\_n17\\_indicadores.pdf](http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/4263/1/Carta_Conjuntura_n17_indicadores.pdf)>. Acesso em: 11 fev. 2020.

CASTRO, T. H. M. OS BIOPLÁSTICOS: IMPACTOS AMBIENTAIS E PERSPECTIVAS DE MERCADO. 2019. 83f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Cenário é positivo para indústria de embalagens flexíveis em 2018. 2018. Disponível em: <<http://tecnologiademateriais.com.br/portaltm/cenario-e-positivo-para-industria-de-embalagens-flexiveis-em-2018/>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

CERESANA. Polypropylene Market Report. Disponível em: <<https://www.ceresana.com/en/market-studies/plastics/polypropylene/>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

CHIELLINI, E.; SOLARO, R. Biodegradable polymeric materials. Adv. Mater. (Weinheim, Ger.) FIELD Full Journal Title:Advanced Materials (Weinheim, Germany), v. 8, n.4, p. 305-313, 1996.

COELHO, P. M. N. *Rumo à Indústria 4.0*. 2016. 65f. Dissertação de Mestrado – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016.

Confira o que significa BOPP e cinco dicas de reutilização. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/5438-bopp>>. Acesso em: 12 dez. 2019.

DANTAS, N. G. S.; MELO, R. S. O método de análise SWOT como ferramenta para promover o diagnóstico turístico de um local: o caso do município de Itabaiana/PB. Caderno Virtual de Turismo, v. 8, n.1, p. 118-130, 2008.

DENZIN E LINCOLN. The Sage Handbook of Qualitative Research. 3ª ed. Estados Unidos: Sage Publications, Inc., 2005.

DE MATOS et al, 2015. EUROPEAN COMMISSION. Environmental Sustainability Assessment of Bioeconomy Products and Processes – Progress

Report 1. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015.

DE PAULA, G. B. Matriz SWOT ou Matriz FOFA: utilizando a Análise SWOT para conhecer as cartas do jogo e aumentar as chances de vitória de sua empresa. 2015. Disponível em: <<https://www.treasy.com.br/blog/matriz-swot-analise-swot-matriz-fofa/>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

DIAS, J. C. ROTAS DE DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS PLÁSTICOS E SEUS ASPECTOS AMBIENTAIS: UMA ANÁLISE DA POTENCIALIDADE DA BIODEGRADAÇÃO. 2016. 88f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

DIETRICH, K. et al. Producing PHAs in the bioeconomy — Towards a sustainable bioplastic. *Sustainable Production and Consumption*, v. 9, p. 58-70, 2017.

DUARTE E BARROS. Métodos e Técnicas de Pesquisa em Comunicação. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2005.

EIA – U.S. Energy Information Administration. What drives crude oil prices?. Disponível em: <<https://www.eia.gov/finance/markets/crudeoil/>>. Acesso em: 14 jan. 2020.

EIRIZ, D. N. *Plano de Negócios: Polipropileno*. 2017. 22f. Trabalho da Disciplina Petroquímica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. RUMO À ECONOMIA CIRCULAR: O RACIONAL DE NEGÓCIO PARA ACELERAR A TRANSIÇÃO. Reino Unido: Ellen MacArthur Foundation, 2015.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. The New Plastics Economy – Catalysing action. Reino Unido: Ellen MacArthur Foundation, 2017.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. UMA ECONOMIA CIRCULAR NO BRASIL: Uma abordagem exploratória inicial. Reino Unido: Ellen MacArthur Foundation, 2017.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Overview of Greenhouse Gases. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>>. Acesso em: 12 dez. 2019.

EPE- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Panorama do Refino e da Petroquímica no Brasil. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

EUROPEAN COMMISSION. Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. The circular economy and the

bioeconomy: Partners in sustainability. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018.

EUROPEAN COMMISSION. Vis M., U. Mantau, B. Allen (Eds.) (2016) Study on the optimised cascading use of wood. No 394/PP/ENT/RCH/14/7689. Final report. Brussels 2016. 337 pages.

Everything You Need To Know About Polypropylene (PP) Plastic. Creative Mechanisms. 2016. Disponível em: <<https://www.creativemechanisms.com/blog/all-about-polypropylene-pp-plastic>>. Acesso em: 31 out. 2019.

FABRIS, S.; FREIRE, M. T. A.; REYES, F. G. R. Embalagens plásticas: tipos de materiais, contaminação de alimentos e aspectos de legislação. Revista Brasileira de Toxicologia, v. 9, n.2, p. 57-60, 2006.

FERREIRA, M. I. S. *Projeto Preliminar de Uma Unidade de Produção de Polipropileno*. 2015. 132f. Dissertação de Mestrado – Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, 2015.

FONSECA, C. C. *Produção e utilização do biopolímero poli(hidroxibutirato) (PHB) em embalagens alimentícias*. 2014. 64f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

FPA - FLEXIBLE PACKAGING ASSOCIATION. A Holistic View of the Role of Flexible Packaging in a Sustainable World. Estados Unidos: FPA, 2019.

FRANCHETTI, S. M. M.; MARCONATO, J. C. Polímeros Biodegradáveis – Uma Solução Parcial para Diminuir a Quantidade de Resíduos Plásticos. Quim. Nova, v. 29, n.4, p. 811-816, 2006.

FUTURE MARKET INSIGHTS. Flexible Plastic Packaging Market. 2019. Disponível em: <<https://www.futuremarketinsights.com/reports/flexible-plastic-packaging-market>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

GERHARDT E SILVEIRA. Métodos de Pesquisa. 1ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, v. 3, 2017.

GIL, A. C. Como Elaborar Projetos de Pesquisa. 4ª ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2002.

GIL, A. C. Métodos e Técnicas de Pesquisa Social. 6ª ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2008.

Global plastic packaging Market. Plastics News. 2018. Disponível em: <<https://www.plasticsnews.com/article/20190128/FYI/190129903/global-plastic-packaging-market>>. Acesso em: 19 dez. 2019.



GOLDEN, J. S.; HANDFIELD, R. The Emergent Industrial Bioeconomy. MARY ANN LIEBER T, INC., v. 10, n.6, 2014.

GOLDEN, J. S.; HANDFIELD, R. B. Why Biobased? Opportunities in the Emerging Bioeconomy. 2014. U. S. Department of Agriculture, Office of Procurement and Property Management. Washington, DC, 2014.

HERNÁNDEZ-IZQUIERDO, V. M.; KROCHTA, J. M. Thermoplastic processing of proteins for film formation: a review. Food Sci., v. 73, p. R30-R39, 2008.

ILSI – INTERNATIONAL LIFE SCIENCES INSTITUTE. Polypropylene as a Packaging Material for Foods and Beverages. Washington DC: ILSI Press, 2002.

INDUSTRY ARC. Flexible Packaging Market – Forecast (2020-2025). Disponível em: <<https://www.industryarc.com/Report/15186/flexible-packaging-market.html>>. Acesso em: 19 dez. 2019.

INSTITUTE FOR BIOPLASTICS AND BIOCOMPOSITES. Biopolymers facts and statistics 2019: Production capacities, processing routes, feedstock, land and water use. Alemanha: IfBB, 2019.

IVANKOVIC et al. Biodegradable packaging in the food industry. Journal of Food Safety and Food Quality, v. 68, n.2, p. 23-52, 2017.

IWATA T.; DOI Y. Morphology and enzymatic degradation of poly(L-lactic acid) single crystals. Macromolecules, v. 31, p. 2461-2467, 1998.

JOVIC, M. For a Greener Future: Biodegradable Packaging Materials. 2017. Disponível em: <<https://www.prescouter.com/2017/04/biodegradable-packaging-materials/>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

KIRCHER, M. The Emerging Bioeconomy: Industrial Drivers, Global Impact, and International Strategies. MARY ANN LIEBER, INC., v. 10, n.1, 2014.

KISSIN, Y., Isospecific Polymerization of Olefins with Heterogeneous Ziegler-Natta Catalysts. New York, Springer: 1985.

LANDIM, A. P. M. et al. Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 26, p.82-92, 2016.

LIMA, A. F. *Síntese e Caracterização de Polipropilenos Modificados com Diolefinas*. 2015. 225f. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Li S., MCCARTHY. Influence of crystallinity and stereochemistry on the enzymatic degradation of poly(lactide)s. Macromolecules, v. 32, p. 4454-4456, 1999.

LOPES, M. S. G. *Produção de plásticos biodegradáveis utilizando hidrolisado*

*hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar*. 2010. 24f. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LUCCA, E. A. *Modelagem e Simulação de Reatores Industriais em Fase Líquida do Tipo Loop para Polimerização do Polipropileno*. 2007. 114f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

LUNT, J. Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers. *Polymer Degradation and Stability*, v. 59, p. 145-152, 1998.

MACHADO, F.; PINTO, J. C. Uma Revisão sobre Polimerização de Olefinas Usando Catalisadores Ziegler-Natta Heterogêneos. *Polímeros [online]*, v. 21, n.4, pp.321-334, 2011.

MACDONALD R. T.; MCCARTHY S.; GROSS R. A. Enzymatic degradability of poly(lactide): effects of chain stereochemistry and material crystallinity. *Macromolecules*, v. 29, p. 7356-7361, 1996.

MAIER, C.; CALAFUT, T. *Polypropylene: The Definitive User's Guide and Databook*. Reino Unido: Elsevier Inc., 1998.

MANO, E.B., MENDES, L.C. *Introdução a Polímeros – 2ª Edição revisada e ampliada*. Editora Eddgard Blucher Ltda, p. 5-8, 1999.

MARKET RESEARCH FUTURE. *Flexible Packaging Market Research Report – Global Forecast to 2023*. 2020. Disponível em: <<https://www.marketresearchfuture.com/reports/flexible-plastic-packaging-market-4845>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

MARKETS AND MARKETS. *Polyhydroxyalkanoate (PHA) Market*. Disponível em: <<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/pha-market-395.html>>. Acesso em: 13 jan. 2020.

MARKETS INSIDER. *Polyhydroxyalkanoate (PHA) Market Forecast Report 2019-2024*. Disponível em: <<https://markets.businessinsider.com/news/stocks/polyhydroxyalkanoate-pha-market-forecast-report-2019-2024-key-players-are-kaneka-danimer-scientific-shenzhen-ecomann-biotechnology-bio-on-newlight-technologies-and-tianan-biological-materials-1028551304>>. Acesso em: 13 jan. 2020.

MARKET WATCH. *Flexible Packaging Market 2019 Size | Global Industry Analysis, Segments, Top Key Players, Drivers and Trends to 2024*. 2019. Disponível em: <<https://www.marketwatch.com/press-release/flexible-packaging-market-2019-size-global-industry-analysis-segments-top-key-players-drivers-and-trends-to-2024-2019-08-13>>. Acesso em: 19 dez. 2019.

MARKL, E.; GRÜNBICHLER, H.; LACKNER, M. PHB - Bio Based and Biodegradable Replacement for PP: A Review. Disponível em:

<<https://crimsonpublishers.com/ntnf/fulltext/NTNF.000546.php>>. Acesso em: 13 jan. 2020.

MARTINS, A. D. O. *Indústria de Transformação de Plásticos*. 2014. 19f. Relatório do ETENE – ESCRITÓRIO TÉCNICO DE ESTUDOS ECONÔMICOS DO NORDESTE – BANCO DO NORDESTE, 2014.

MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. A. AGRO 4.0 – RUMO À AGRICULTURA DIGITAL, 2017.

MENEZES, I. D. R. *Revisão da Literatura Empírica Acerca das Variáveis que Impactam a Precificação de Commodities Agrícolas: Soja, Milho, Café e Boi Gordo*. 2015. 33f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

MIGUEL, P. A. C. et al. Desdobramento da Qualidade no Desenvolvimento de Filmes Flexíveis para Embalagens. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 13, n.2, p. 87-94, 2003.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Acordo de Paris. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Qual é o impacto das embalagens no meio ambiente?. 2019. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/producao-e-consumo-sustentavel/consumo-consciente-de-embalagem/impacto-das-embalagens-no-meio-ambiente.html>>. Acesso em: 12 dez. 2019.

MINTEL. Global Packaging Trends 2019. Reino Unido: Mintel, 2019.

MOON, D. The Hidden Climate Polluter: Plastic Incineration. Gaia. Disponível em: <<https://www.no-burn.org/hiddenclimatepolluter/>>. Acesso em: 12 dez. 2019.

MOORE, E.P. Polypropylene Handbook. Estados Unidos: Hanser Publishers, 1996.

MORALES et al. The Brazilian bioplastics revolution. 2009. Disponível em: <<https://knowledge.wharton.upenn.edu/article/the-brazilian-bioplastics-revolution/>>. Acesso em: 10 dez. 2010.

MORDOR INTELLIGENCE. BIODEGRADABLE PLASTIC PACKAGING MARKET - GROWTH, TRENDS, AND FORECAST (2020-2025). Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/biodegradable-plastic-packaging-solutions-market-industry>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

MORDOR INTELLIGENCE. BIO-POLYLACTIC ACID (PLA) MARKET - GROWTH, TRENDS, AND FORECAST (2020 - 2025). Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/bio-polylactic-acid-pla>>

market>. Acesso em: 14 jan. 2020.

MORDOR INTELLIGENCE. PLASTIC PACKAGING MARKET - GROWTH, TRENDS, AND FORECAST (2020-2025). Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/plastic-packaging-market>>. Acesso em: 19 dez. 2019.

National Bioeconomy Blueprint: Federal Bioeconomy Strategic Objectives. Disponível em: <[https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/national\\_bioeconomy\\_blueprint\\_april\\_2012.pdf](https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/national_bioeconomy_blueprint_april_2012.pdf)>. Acesso em 03 dez. 2019.

NATIONAL GEOGRAPHIC. Para os bichos, o plástico transforma o oceano em um campo minado. 2018. Disponível em: <<https://www.nationalgeographicbrasil.com/2018/05/animais-plastico-uso-unico-oceanos-lixo>>. Acesso em: 14 nov. 2019.

NK WOOD RESEARCH. GLOBAL FLEXIBLE PLASTIC PACKAGING MARKET FORECAST 2018-2026. Disponível em: <<https://www.inkwoodresearch.com/reports/flexible-plastic-packaging-market/>>. Acesso em: 19 dez. 2019.

NOGUEIRA, C. F. O. Estudo de polímeros biodegradáveis e compostáveis de fontes renováveis como alternativa aos polímeros tradicionais. 2013. 73f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de São Paulo, Lorena, 2013.

NONCLERQ, A. Mapping flexible packaging in a Circular Economy: Final Report. Holanda: Delft University of Technology, 2016.

OECD (2013-10-28), "Policies for Bioplastics in the Context of a Bioeconomy", OECD Science, Technology and Industry Policy Papers, No. 10, OECD Publishing, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/5k3xpf9rrw6d-en>.

Oil Consumption. BPF – British Plastics Federation. 2019. Disponível em: <[https://www.bpf.co.uk/press/Oil\\_Consumption](https://www.bpf.co.uk/press/Oil_Consumption)>. Acesso em: 11 fev. 2020.

ONG, S. Y.; SUDESH, K.; CHEE, J., Y. Degradation of Polyhydroxyalkanoate (PHA): a Review. Journal of Siberian Federal University, v. 10 n.2, p. 211-225, 2017.

O Setor Petroquímico. Braskem. Disponível em: <<http://www.braskem-ri.com.br/o-setor-petroquimico>>. Acesso em: 31 out. 2019.

PARKER, L. NATIONAL GEOGRAPHIC - HERE'S HOW MUCH PLASTIC TRASH IS LITTERING THE EARTH. 2018. Disponível em: <[nationalgeographic.com/news/2017/07/plastic-produced-recycling-waste-ocean-trash-debris-environment/](https://nationalgeographic.com/news/2017/07/plastic-produced-recycling-waste-ocean-trash-debris-environment/)>. Acesso em: 13 nov. 2019.

PEELMAN, N. et al. Application of bioplastics for food packaging. Trends. Food Science & Technology, v. 32, n.2, p. 128-141, 2013.

PETRY, A. *Mercado Brasileiro de Polipropileno com Ênfase no Setor Automobilístico*. 2011. 35f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

PHILP J. C.; RITCHIE R. J.; GUY K. Biobased plastics in a bioeconomy. Forum: Science & Society: Trends in Biotechnology, v. 31, n.2, p. 65-67, 2013.

PITT, F. D.; BOING, D.; BARROS, A. A. C. Desenvolvimento Histórico, Científico e Tecnológico de Polímeros Sintéticos e de Fontes Renováveis. Revista da UNIFEBE, [S.l.], v. 1, 2011.

Plano de Ação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Bioeconomia. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2018.

Plásticos verdes, biopolímeros, bioplásticos, polímeros biodegradáveis e biobasedos... Entenda de uma vez por todas!. Afinko. Disponível em: <<https://afinkopolimeros.com.br/bioplasticos-entenda-de-uma-vez-por-todas/>>. Acesso em: 10 dez. 2019.

PLASTICSEUROPE – ASSOCIATION OF PLASTICS MANUFACTURES. Plastics – the Facts 2018. Bélgica: PlasticsEurope, 2018.

PLASTICSEUROPE. PLASTICS – HELPING TO CREATE AND SAVE ENERGY. Disponível em: <<https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/energy>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

PLASTIVIDA – INSTITUTO SÓCIO-AMBIENTAL DOS PLÁSTICOS. Monitoramento dos índices de reciclagem mecânica de plásticos no Brasil. São Paulo: Plastivida, 2012.

Polipropileno. Mais Polímeros. Disponível em: <<http://www.maispolimeros.com.br/2019/02/11/polipropileno-o-que-e/>>. Acesso em: 31 out. 2019.

Polipropileno: motivos para aplicar na produção de embalagem. Mundo do Plástico. Disponível em: <<https://mundodoplastico.plasticobrasil.com.br/gest-o/polipropileno-motivos-para-aplicar-na-produ-o-de-embalagem>>. Acesso em: 31 out. 2019.

POLIPROPILENO: O LADO BOM DOS PRODUTOS DE PLÁSTICO. Lar Plásticos. Disponível em: <<https://www.larplasticos.com.br/polipropileno-o-lado-bom-dos-produtos-de-plastico>>. Acesso em: 31 out. 2019.

Polipropileno: o que é, características e aplicações. Plastbrinq. 2018. Disponível em: <<https://plastbrinq.com.br/polipropileno/>>. Acesso em: 31 out. 2019.

Polipropileno: o que é e o que você não pode deixar de saber. Mais Polímeros. 2019. Disponível em:

<<http://www.maispolimeros.com.br/2019/02/11/polipropileno-o-que-e/>>. Acesso em: 25 nov 2019.

Polipropileno. Portal São Francisco. Disponível em: <<https://www.portalsaofrancisco.com.br/meio-ambiente/polipropileno>>. Acesso em: 31 out. 2019.

Polypropylene (PP). BPF – British Plastics Federation. Disponível em: <<https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/pp.aspx>>. Acesso em: 31 out. 2019.

Polipropileno (PP). Tudo sobre Plásticos. Disponível em: <<https://www.tudosobreplasticos.com/materiais/polipropileno.asp>>. Acesso em: 31 out. 2019.

Polylactic Acid Properties, Production, Price, Market and Uses. Disponível em: <<https://www.plasticsinsight.com/resin-intelligence/resin-prices/polylactic-acid/#production>>. Acesso em: 14 jan. 2020.

Polymer Properties Database: POLYLACTIC ACID FILMS. 2019. Disponível em: <<http://polymerdatabase.com/Films/PLA%20Films.html>>. Acesso em: 14 jan. 2020.

Polypropylene. Britannica Academic. Disponível em: <<https://academic-eb-britannica.ez29.capes.proxy.ufrj.br/levels/collegiate/article/polypropylene/9890>>. Acesso em: 31 out. 2019.

Potencializando o planejamento estratégico com a Matriz SWOT. SCOPI. Disponível em: <<https://www.scopi.com.br/blog/planejando-com-matriz-swot/>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

PP – Polipropileno. Poliversal. Disponível em: <<http://www.poliversal.pt/pt/landing-pages/tipos-de-plasticos/pp---polipropileno-36.html>>. Acesso em: 31 out. 2019.

PRADELLA, J. G. C. Biopolímeros e Intermediários Químicos. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. São Paulo, 2006.

QUENTAL, A. C. et al. Blendas de PHB e seus copolímeros: Miscibilidade e Compatibilidade. Química Nova, v. 33, n.2, p. 438-446, 2010.

RAY, S. S.; BOUSMINA, M. Biodegradable polymers and their layered silicate nanocomposites: In greening the 21st century materials world. Progress in Materials Science, v. 50, n.8, p. 962-1079, 2005.

Reciclagem de Plásticos. Portal Resíduos Sólidos. 2013. Disponível em: <<https://portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-plasticos-polimeros/>>. Acesso em: 31 out. 2019.

REDDY, M. M. et al. Biobased plastics and bionanocomposites: Current status

and future opportunities. *Progress in Polymer Science*, v. 8, p. 1653-1689, 2013.

REGINATO, A. S. *Modelagem e Simulação dos Reatores de Polimerização em Fase Líquida do Processo Spheripol*. 2001. 163f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

REIßMANN, D; THRÄN, D.; BEZAMA, A. Techno-economic and environmental suitability criteria of hydrothermal processes for treating biogenic residues: A SWOT analysis approach. *Journal of Cleaner Production*, v. 200, p. 293-304, 2018.

RESO AMBIENTAL. Polipropileno – Embalando o Mundo com Eficiência e Praticidade. 2015. Disponível em: <  
<http://resoambiental.com/2015/06/polipropileno-embalando-o-mundo-com-eficiencia-e-praticidade/>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

RIZZO, A. S.; KIM, G. J. A SWOT Analysis of the Field of VR Rehabilitation and Therapy. *Presence Teleoperators & Virtual Environments*, v. 14, n.2, p. 119-146, 2005.

ROCHA, M.; SOUZA, M. M.; PRENTICE, C. Food packaging and Preservation – Capítulo 9: Biodegradable Films: An Alternative Food Packaging. Reino Unido: Elsevier Inc., 2018.

ROYTE, E. NATIONAL GEOGRAPHIC - Is burning plastic waste a good idea?. 2019. Disponível em: <  
<https://www.nationalgeographic.com/environment/2019/03/should-we-burn-plastic-waste/>>. Acesso em: 11 fev. 2020.

SAMRUK-KAZYNA. Global Polypropylene Market Outlook. Cazaquistão: SAMRUK-KAZYNA, 2017.

SASTRI, V. R. *Plastics in Medical Devices: Properties, Requirements and Applications*. 2ª ed. Reino Unido: Elsevier Inc., 2014.

SERAFIM, L. S.; LEMOS, P. C.; REIS, M. A. M. Produção de Bioplásticos por Culturas Microbianas Mistas. *Boletim de Biotecnologia*, p. 16-21, 2016.

SIRACUSA, V. et al. Biodegradable polymers for food packaging: a review. *Trends in Food Science & Technology*, v. 19, p. 634-643, 2008.

SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. A tecnologia da reciclagem de polímeros. *Química nova*, v. 28, n.1, p. 65-72, 2005.

SOUZA, T. G. S. *Compostos Organometálicos*. 2014. 31f. Dissertação de Mestrado (Apresentação) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2014.

TADA, E. S. *Blendas com poli(3-hidroxibutirato) (PHB) e copolímeros aleatórios:*

*comportamentos de fases e cinética de cristalização*. 2009. 247f. Dissertação de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

TIN SIN, L.; RAHMAT, A. R.; RAHMAN, W. A. W. A. *Polylactic Acid: PLA Biopolymer Technology and Applications*. Reino Unido: Elsevier Inc., 2012.

TOKIWA, Y.; CALABIA, B. P. Biodegradability and biodegradation of poly(lactide). *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, v. 72, p. 244-251, 2006.

TRIVEDI, J. et al. Algae based biorefinery—How to make sense?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 47, p. 295-307, 2015.

TROMBETTA, E. *Utilização da Fibra Natural de Pinus (Serragem) como Reforço em Componentes Automotivos Compostos de Polipropileno*. 2010. 104f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

TSUJI H.; MIYAUCHI S.; Poly(L-lactide) 6. Effects of crystallinity on enzymatic hydrolysis of poly(L-lactide) without free amorphous region. *Polym Degrad Stab*, v. 71, p. 415-424, 2001.

TULLO, A. H. PHA: A biopolymer whose time has finally come. 2019. Disponível em: <<https://cen.acs.org/business/biobased-chemicals/PHA-biopolymer-whose-time-finally/97/i35>>. Acesso em: 13 jan. 2020.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT. Plastic recycling: an underperforming sector ripe for a remake. 2019. Disponível em: <<https://www.unenvironment.org/news-and-stories/story/plastic-recycling-underperforming-sector-ripe-remake>>. Acesso em: 14 nov. 2019.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT. This World Environment Day, it's time for a change. 2018. Disponível em: <<https://www.unenvironment.org/interactive/beat-plastic-pollution/>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

VIEGAS, C. P. R. *Estudo da Produção de Polihidroxialcanoatos (PHAs) por Chromobacterium violaceum*. 2005. 85f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

WAGNER JUNIOR, J. R. *Multilayer Flexible Packaging: Polypropylene*. 2ª ed. Reino Unido: Elsevier Inc., 2016.

What are bioplastics?. Disponível em: <<https://www.european-bioplastics.org/market/market-drivers/>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

WHITELEY, K. S. et al. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry: Polyolefins*. Weinheim: Wiley, 2000.

WIHODO, M.; MORARU, C. I. Physical and chemical methods used to enhance the structure and mechanical properties of protein films: A review. *Journal of Food Engineering*, v. 114, p. 292-302, 2013.



WILSON, A. Breakthrough Process Decontaminates Polypropylene for Food Use As a Result of Plastic Packaging Research. 2013. Disponível em: <<https://www.plasticpackagingfacts.org/blog/breakthrough-process-decontaminates-polypropylene-food-2/>>. Acesso em: 10 jan. 2020.

WORLD BANK GROUP. Annual Report 2018. Washington, DC: International Bank for Reconstruction and Development, 2018.

WORLD BANK GROUP. What a waste 2.0. Washington, DC: International Bank for Reconstruction and Development, 2018.

WORLD ECONOMIC FORUM. The New Plastics Economy – Rethinking the future of plastics. Geneva: World Economic Forum, 2016.

WORLD PACKAGING ORGANISATION. Market Statistics and Future Trends in Global Packaging. Disponível em: <<https://www.worldpackaging.org/>>. Acesso em 19 dez. 2019.

ZHANG Z. et al. Food versus fuel: what do prices tell us?. Energy Policy, v. 38, p. 445-451, 2010.

## APÊNDICE A – MÉTODOS DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL DO POLIPROPILENO

### A.1) Polimerização em suspensão

A polimerização em suspensão é conduzida em gotículas de monômeros suspensas em um meio aquoso e é caracterizado por um sistema heterogêneo onde coexistem uma solução aquosa e uma fase orgânica insolúvel na água. O monômero e o iniciador são dispersos na fase aquosa através de uma agitação vigorosa e da adição de agentes de suspensão. Devido às partículas estarem suspensas durante toda a polimerização, a viscosidade do meio é diminuída, favorecendo, assim, a troca térmica durante a reação.

A polimerização em lama (slurry) é um tipo específico de polimerização em suspensão na qual são utilizados solventes orgânicos ao invés de água. Os solventes mais comuns são hidrocarbonetos inertes leves, como hexano, heptano e tolueno (Lima *et al.*, 2015). Esse tipo de polimerização é comumente utilizado na produção de homopolímeros, que podem ser produzidos em um ou mais reatores CSTR em série. Cada reator pode ser operado em diferentes condições de reação, o que permite a fabricação de diferentes grades de polímeros ao mesmo tempo. Um dos processos de polimerização *slurry* mais conhecidos é o *Hercules*, da Shell. Na forma original, utiliza o querosene como solvente e a desativação do catalisador é feita com álcool. A produção de polipropileno através desse processo possui duas grandes desvantagens: a necessidade de separação do solvente e a necessidade de separação da fração de polipropileno atático. A Figura A-1 apresenta um esquema do processo *Hercules* para a produção industrial do polipropileno.

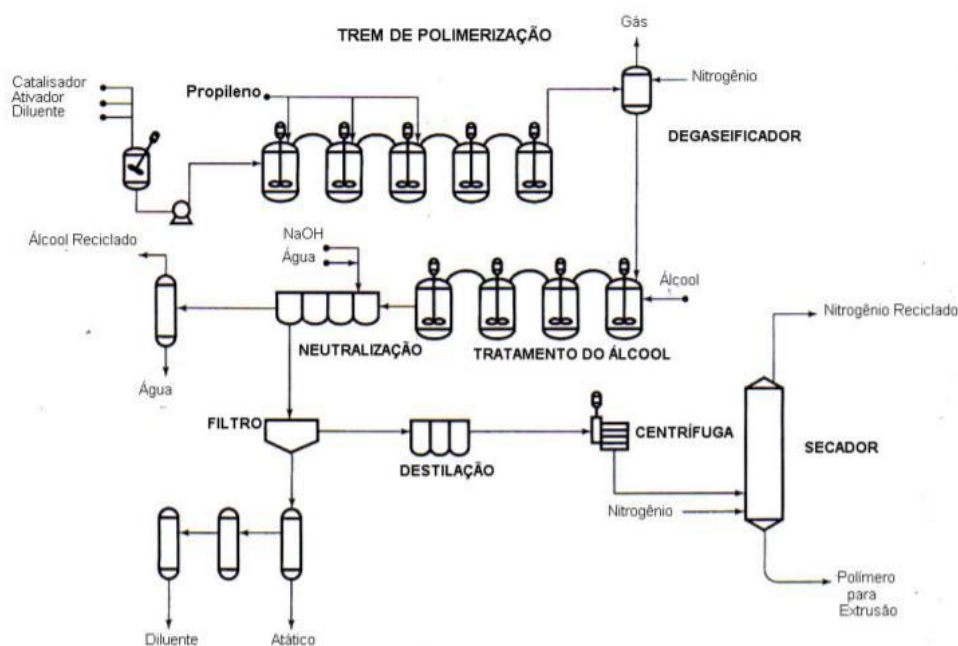


Figura A-1: Produção do polipropileno através do processo Hercúles.  
Fonte: Moore, 1996.

## A.2) Polimerização em massa (*bulk*)

A polimerização em massa é o método mais simples e direto de converter monômeros em polímeros (Brazel e Rosen, 2012). Ela consiste na utilização de monômero líquido e, sendo assim, monômeros gasosos em condições normais de temperatura e pressão (CNTF) devem ser condensados. Devido ao meio de polimerização ser constituído de monômero líquido, altas taxas de polimerização são atingidas. As condições de reação devem ser tais que mantenham o monômero líquido e, por isso, na produção do polipropileno, são utilizadas pressões de cerca de 30 bar e temperaturas de 70°C (Reginato *et al.*, 2001). O polipropileno isotático não é solúvel em seu monômero, logo, são precipitados assim que se formam, facilitando a separação. Existem diversos processos que utilizam a polimerização em massa, tais como *Rexall* (da El Paso), *Exxon* (da Sumitomo), *Hypol* (da Mitsui) e *Spheripol* (da Montell).

O processo *Spheripol* é um dos mais utilizados na produção industrial do polipropileno e é constituído por reatores em *loop* (Reginato *et al.*, 2001). Nos processos típicos de polimerização em massa, o controle da temperatura do

meio reacional pode ser dificultado e, como os sistemas orgânicos possuem baixa capacidade calorífica, a temperatura pode aumentar descontroladamente. Junto a isso, o aumento da viscosidade do meio desfavorece a transferência de calor, tornando difícil a remoção do calor gerado pela reação (Brazel e Rosen, 2012). O processo *Spheripol* utiliza bombas axiais acopladas à base dos reatores, as quais recirculam a mistura reacional, garantindo a ausência de gradientes de concentração e favorecendo a troca térmica no reator. Além disso, as vantagens do processo consistem, principalmente, na possibilidade de se trabalhar com altas concentrações de monômero, e, conseqüentemente, de se obter altas taxas de polimerização, na eliminação de etapas de recuperação de solvente e de separação da fração de polipropileno atático e nas condições mais brandas de temperatura e pressão, que barateiam os custos operacionais. A Figura A-2 apresenta, esquematicamente, a produção industrial do polipropileno pelo processo *Spheripol*.

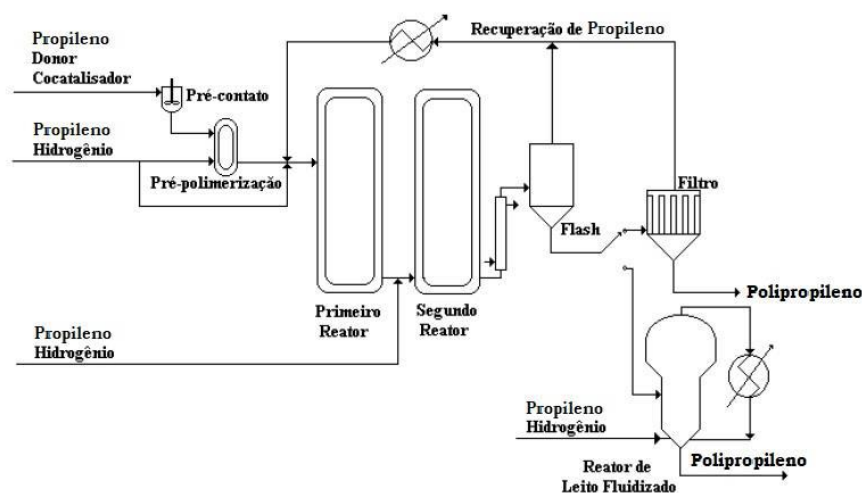


Figura A-2: Produção do polipropileno através do processo Spheripol.

Fonte: Adaptado de Modelagem e Simulação dos Reatores de Polimerização em Fase Líquida do Processo Spheripol, 2001.

### A.3) Polimerização em fase gasosa

O que caracteriza o processo de polimerização em fase gasosa é o fato de que não envolve fase líquida na zona de reação (Xie *et al.*, 1994), sendo o meio reacional constituído por catalisador, polímero em pó e monômero gasoso.

A reação ocorre na interface entre o catalisador sólido e a matriz polimérica, ocorrendo a difusão do reagente gasoso através dos poros (Lima *et al.*, 2015). A fase gasosa é responsável por manter o fornecimento de monômero, ao mesmo tempo em que agita as partículas do polímero e dissipa calor gerado pela reação e, o polímero gerado como produto pode ser facilmente separado do monômero não reagido com a utilização de um vaso *flash*.

A polimerização em fase gasosa foi, inicialmente, aplicada pela *BASF*, com a utilização do processo *Novolen*, na década de 60. Nele, a reação ocorre em reator de leito agitado, com pressões entre 30 e 40 bar e temperaturas entre 70 e 80°C (Whiteley *et al.*, 2000).

Os processos em fase gás baseados na utilização de catalisadores Ziegler-Natta têm apresentado um grande crescimento na última década (Brazel e Rosen, 2012). Atualmente, o processo *Unipol*, que combina tecnologias da Union Carbide e da Shell (Whiteley *et al.*, 2000), tem sido o mais utilizado para a produção do polipropileno através da polimerização em fase gasosa. Esse processo ocorre em um reator de leito fluidizado que opera com pressões entre 7 e 20 bar e temperaturas abaixo de 100°C. Os reagentes são alimentados ao reator, que possui uma seção de desengajamento na parte superior. Essa seção é responsável pela diminuição da velocidade do monômero, mantendo a cadeia polimérica que está se formando na zona de reação inferior. A remoção do calor da polimerização se dá através da circulação de uma corrente de monômeros através de um trocador de calor. A maior vantagem do processo Unipol é em relação aos custos de operação (Brazel e Rosen, 2012). Durante a polimerização, solventes não são utilizados, e, devido às baixas pressões de operação, os custos associados a equipamentos e compressão são baixos. O processo emprega catalisadores modernos que, além eliminar a etapa de separação do catalisador do produto, gera frações de polipropileno isotático tão altas que a remoção da fração de polipropileno atático se torna desnecessária. A Figura A-3 apresenta um esquema para a produção do polipropileno através do processo *Unipol*.

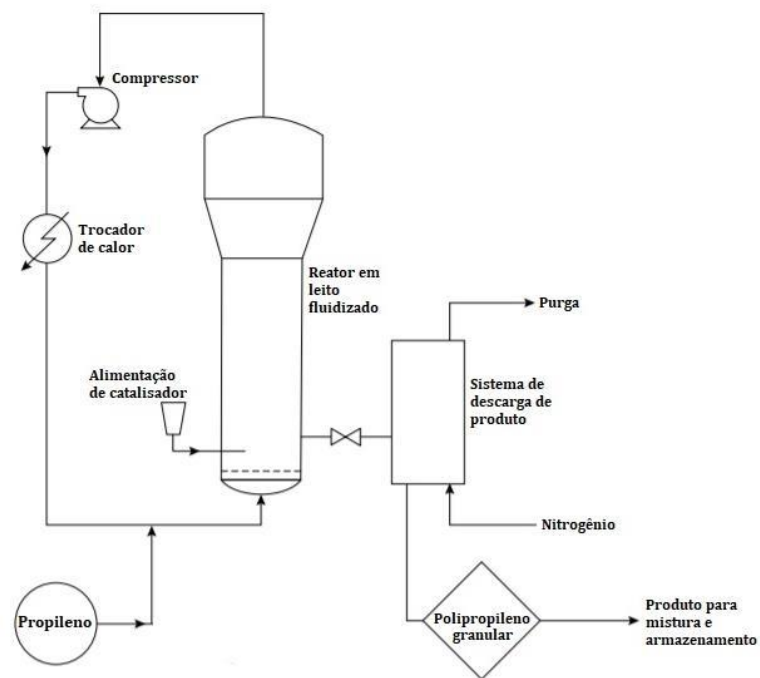
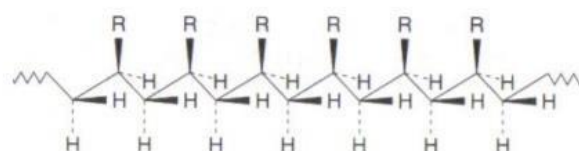


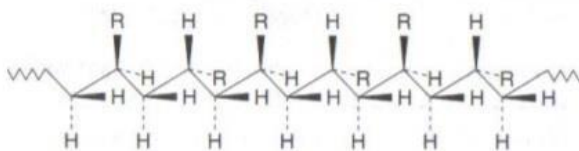
Figura A-3: Produção do polipropileno através do processo Unipol.  
 Fonte: Adaptado de Fundamental Principles of Polymeric Materials, 3º ed.

#### A.4) Catalisadores

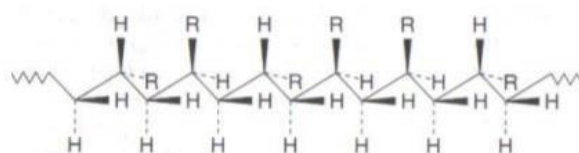
A reação de polimerização do polipropileno é estereoespecífica, isto é, forma cadeias poliméricas com elevado grau de orientação interna (Machado e Pinto, 2011). O polipropileno pode ser classificado de acordo com o posicionamento dos seus grupamentos metil em: isotático, sindiotático e atático. As três estruturas são apresentadas na Figura A-4.



Polímero Isotático



Polímero Sindiotático



Polímero Atático

Figura A-4: Classificações de taticidade dos polímeros.  
Fonte: Adaptado de Mano, 1999.

O polipropileno isotático apresenta todos os seus grupos laterais metil do mesmo lado da cadeia polimérica principal, apresentando alto grau de cristalinidade, enquanto que a forma sindiotática apresenta alternância desses grupos laterais. Já no polímero atático, os grupos laterais não seguem nenhum padrão regular e, por isso, o polipropileno atático é um produto amorfo.

O sistema catalítico empregado durante a polimerização possui grande influência na configuração estereoquímica do produto formado. O polipropileno mais utilizado para fins comerciais é isotático, visto que, por possuir a estrutura mais cristalina, apresenta as melhores propriedades mecânicas. Catalisadores Ziegler-Natta são mais comumente utilizados na produção do polipropileno isotático (Sastri, 2013).

Esses catalisadores são definidos como compostos de metal de transição<sup>15</sup> capazes de inserir unidades monoméricas em uma cadeia polimérica (Moore, 1996).

<sup>15</sup> Metais de transição são elementos cujo átomo possui um subnível d incompleto ou que possa vir a formar cátions com um subnível d incompleto (IUPAC). São representados na tabela periódica pela família B (grupo 3 ao 12).

São, geralmente, formados por um sal de metal de transição e um composto organometálico<sup>16</sup>, responsável pela ativação dos sítios.

Durante o desenvolvimento dos sistemas catalíticos Ziegler-Natta, 5 gerações são, normalmente, identificadas, sendo que cada geração apresenta melhorias em relação à anterior. Moore (1996) apresentou uma comparação entre cada geração de catalisadores, baseada em testes em reatores de laboratório (Tabela A-1).

Tabela A-1: Comparação entre catalisadores Ziegler-Natta, da primeira à quinta geração.

Geração	Composição	Produtividade <sup>a</sup> (kg PP / g cat)	Isotaticidade (%)	Controle morfológico
1º	$\delta$ -TiCl <sub>3</sub> .0.33AlCl <sub>3</sub> + DEAC	0,8 - 1,2	90 - 94	Impossível <sup>b</sup>
2º	$\delta$ -TiCl <sub>3</sub> + DEAC	3 - 5 (10 - 15)	94 - 97	Possível
3º	TiCl <sub>4</sub> / Ester / MgCl <sub>2</sub> + AlR <sub>3</sub> / Ester	5 - 10 (15 - 30)	90 - 95	Possível
4º	TiCl <sub>4</sub> / Diester / MgCl <sub>2</sub> + TEA / Silano	10 - 25 (30 - 60)	95 - 99	Possível
5º	TiCl <sub>4</sub> / Diéter / MgCl <sub>2</sub> + TEA	25 - 35 (70 - 120)	95 - 99	Possível

<sup>a</sup>Polimerização slurry em hexano, pressão de monômero 0.7 MPa, 4h, hidrogênio para controle molecular. (Valores entre parêntesis são para polimerização em massa durante 2h a 70°C com H<sub>2</sub>).

<sup>b</sup>Possível com a utilização de TiCl<sub>3</sub> reduzido com alquil-Al com tamanho de partícula de 200-300µm.

Fonte: Moore, 1996.

Para ilustrar as melhorias obtidas através do desenvolvimento de novas gerações de catalisadores, a Figura A-5 ilustra as etapas envolvidas na produção de polipropileno com a utilização de cada geração de catalisadores.

<sup>16</sup> Organometálico é um composto que possui, pelo menos, uma ligação carbono-metal (Souza e Cestari, 2014).



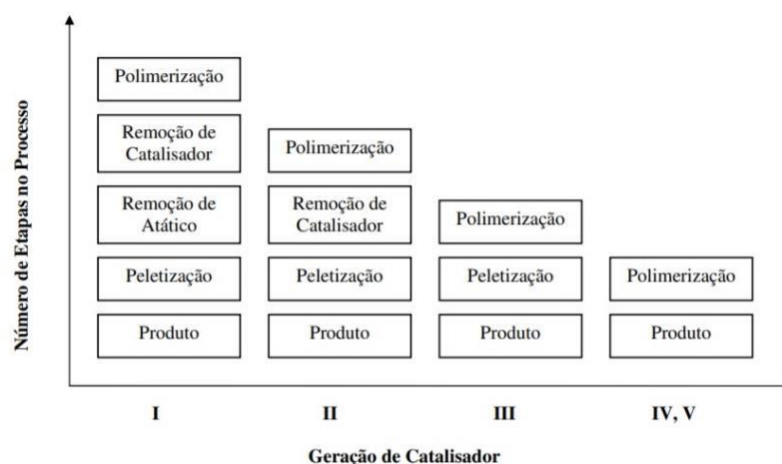


Figura A-5: Etapas no processo de produção de polipropileno para cada geração de catalisadores.

Fonte: Reginato, 2001.

O polipropileno sindiotático é menos rígido do que o isotático, mas tem melhor resistência ao impacto e clareza (Marie e Calafut, 1998). Sendo assim, surgiu a necessidade de catalisadores capazes de sintetizar esse tipo de estrutura. Catalisadores metallocênicos foram desenvolvidos para produzir os vários tipos de polipropilenos (atático, isotático, sindiotático) com grande controle e estereoespecificidade. São compostos de ciclopentadieno, ou outros compostos poliaromáticos, e um metal, tipicamente zircônio ou háfnio (Sastri, 2013). Os catalisadores metallocênicos  $Cp_2ZrCl_2$  ativados por metilaluminoxano (MAO), ficaram conhecidos como a sexta geração de catalisadores Ziegler-Natta (Kissin, 2008) e demonstram alta seletividade e reatividade na polimerização de olefinas. A Figura A-6 apresenta exemplos de catalisadores metallocênicos utilizados na produção de polipropileno atático, isotático e sindiotático, respectivamente.

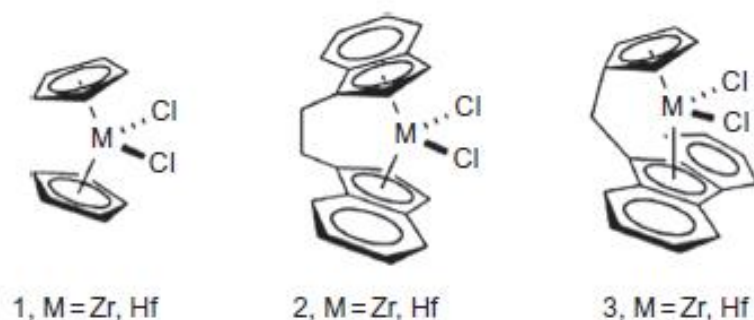


Figura A-6: Catalisadores metalocênicos para a produção de polipropileno 1: atático, 2: isotático e 3: sindiotático.

Fonte: Plastics in Medical Devices, 2nd Edition.

## APÊNDICE B – MANUFATURA DE FILMES BOPP PARA A FABRICAÇÃO DE EMBALAGENS FLEXÍVEIS

O polipropileno é um polímero extremamente adaptável e pode ser processado de diversas maneiras, como injeção, extrusão, termoformagem e sopro (Mais Polímeros, 2019). Filmes flexíveis de polipropileno biorientado (BOPP) se diferem dos convencionais por serem submetidos a um estiramento tanto no sentido longitudinal quanto no sentido transversal à extrusão e são muito utilizados na fabricação de embalagens para as indústrias alimentícias e de cosméticos. Embalagens que contêm filmes BOPP são, normalmente, coloridas por fora e metalizadas por dentro, porém, também podem ser transparentes, opacas ou foscas.

Os desafios associados ao uso de polipropileno na produção de filmes são relacionados ao fato de ele ser um material intrinsecamente instável, que sofre degradações, principalmente, via processos termo-oxidativos. Sendo assim, fabricantes dessas resinas geralmente utilizam aditivos estabilizantes para que o polímero suporte as condições de processamento.

Os filmes BOPP utilizam o homopolímero de polipropileno, para o substrato do filme, e o copolímero de polipropileno, para a capa superficial. São produzidos, principalmente, através de três tecnologias: processo por estiramento simultâneo ou bi-direcional, processo por sopro em dupla camada e processo de estiramento plano em duas fases, sendo a última a mais utilizada (Carvalho, 2008).

O processo de estiramento plano em duas fases é realizado em duas

etapas e corresponde a 90% da produção de polipropileno bi-orientado (Carvalho, 2008). As matérias-primas do processo consistem em homopolímeros de polipropileno, aditivos e polipropileno reutilizado de filmes que não atingiram as especificações requeridas, e são armazenadas em silos, a partir dos quais são conduzidas a um dosador, que envia as quantidades exatas para um misturador que alimenta, continuamente, a extrusora. Na unidade de extrusão fundem-se essas matérias-primas, que são plastificadas pelos extrusores, filtradas e laminadas. A linha BOPP possui duas unidades de extrusão, a unidade principal e a unidade de coextrusão. A unidade principal é responsável pela fabricação da camada central do filme, formada por homopolímeros, aditivos e polipropileno reciclado, enquanto as coextrusoras dão origem às capas exteriores de copolímeros.

Em seguida, o filme laminado segue para a unidade de conformação e refrigeração (*Chill Roll*), onde é solidificado ao entrar em contato com um rolo de refrigeração, e é conduzido às zonas de estiramento. A zona de estiramento longitudinal (MDO) é responsável pelo estiramento longitudinal do filme, enquanto que a zona de estiramento transversal (TDO) estira transversalmente o filme proveniente da zona MDO.

Após as etapas de estiragem, o filme recebe tratamentos superficiais de acordo com as especificações requeridas, segue para as unidades de enrolamento (*Winder*), responsável por bobinar continuamente, e é enviado ao corte. Os cortes de borda, restos ou filmes fora da especificação são enviados à reciclagem. A Figura B-1 apresenta um esquema do processo descrito.

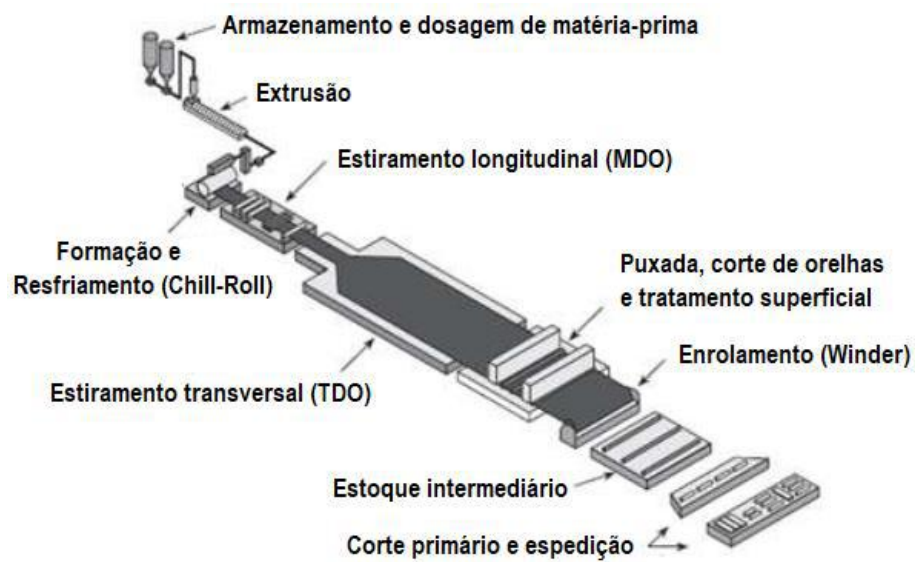


Figura B-1: Processo de estiramento plano em duas fases para a produção de filmes de polipropileno bi-orientado.  
Fonte: Miguel, 2003.