



Universidade Federal do Rio de Janeiro

Departamento de Engenharia Química

**DESENVOLVIMENTO DOS BIOPLÁSTICOS SOB A
ÓTICA DA TRANSIÇÃO SÓCIO-TÉCNICA**

Danilo Yoshio Yatabe Franco

Projeto Final de Curso

Orientadores

Flávia Chaves Alves, D.Sc.

Fábio de Almeida Oroski, D.Sc.

Dezembro de 2017

Desenvolvimento dos Bioplásticos sob a Ótica da Transição Sócio-Técnica

Danilo Yoshio Yatabe Franco

Monografia submetida ao Corpo Docente do Programa Escola de Química, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Química.

Aprovado por:

Prof.^a Ana Mehl, D.Sc.

Daniella Fartes dos Santos e Silva, M.Sc.

Leonardo Vieira Teixeira, M.Sc.

Orientado por:

Flávia Chaves Alves, D.Sc.

Fábio de Almeida Oroski, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Dezembro de 2017

Dedico este trabalho aos familiares, mestres e amigos que me apoiaram nesta caminhada.

“Valeu a pena? Tudo vale a pena

Se a alma não é pequena.”

(Fernando Pessoa)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, à minha família, por todo o apoio e incentivo ao longo de minha formação, assim como pela compreensão das longas horas de convivência perdidas por dedicação às atividades acadêmicas.

Aos familiares Assami e Joana, por toda a bondade e acolhimento durante os primeiros momentos de minha trajetória.

À Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), em especial à Escola de Química e seu corpo docente, pelos conhecimentos adquiridos e experiências vividas.

Aos orientadores Fábio e Flávia, pela disposição, paciência, compreensão e auxílio na elaboração deste trabalho, bem como nas disciplinas por eles ministradas, as quais tive a sorte de cursar.

Aos amigos e colegas, por todos os momentos compartilhados ao longo da graduação, dentro e fora das salas de aula.

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

Desenvolvimento dos Bioplásticos sob a Ótica da Transição Sócio-Técnica

Danilo Yoshio Yatabe Franco (danilo_yatabe@yahoo.com.br)

Dezembro, 2017

Orientadores: Prof.^a Flávia Chaves Alves (DEQ/EQ), D.sc.

Prof. Fábio de Almeida Oroski (DEQ/EQ), D.sc.

À medida em que a indústria petroquímica se desenvolveu, os plásticos se tornaram cada vez mais comuns e foram conquistando diferentes mercados, com suas diversas aplicações. Atualmente o plástico está presente em quase todos os produtos industriais e de consumo. Dado o seu intenso consumo e aos métodos de produção mais utilizados, os impactos ambientais e sociais desta indústria também são grandes. Assim, há diversas frentes de pesquisa com foco na produção e utilização de polímeros mais sustentáveis – dentre eles os bioplásticos. Ao longo dos últimos anos, tem-se percebido o crescente desenvolvimento de bioplásticos e sua introdução no mercado como uma alternativa para solucionar os problemas enfrentados pela indústria dos plásticos. No entanto, para que isso ocorra, são necessárias a adaptação e alteração da lógica incumbente dessa indústria para possibilitar a integração dos bioplásticos nesse setor. Desse modo, imagina-se que um processo de transição no sistema sócio-técnico dos plásticos esteja ocorrendo para tal incorporação. Nesse sentido, esta monografia busca contribuir para o melhor entendimento de tal processo de transição e da forma como o mesmo ocorre. Para tanto, analisou-se o desenvolvimento de 3 bioplásticos de diferentes naturezas – PLA, bio-PET e PEF – a partir de suas principais iniciativas de desenvolvimento e utilizou-se como base de análise a perspectiva multinível e dimensões como a natureza do bioplástico, atores e tecnologias envolvidos em seu desenvolvimento. A pesquisa revelou evidências que suportam a ocorrência da transição do sistema sócio-técnico dos plásticos por diferentes caminhos de transição. Nesse sentido, verificou-se que o PLA e o PEF têm se desenvolvido por meio de um caminho diferente daquele trilhado pelo bio-PET para a transição do sistema sócio-técnico dos plásticos. Não obstante, a partir do estudo realizado também é possível notar que durante o desenvolvimento dos bioplásticos pode haver mudanças entre os caminhos percorridos ao longo da transição.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	A INDÚSTRIA DOS PLÁSTICOS	6
2.1.1	HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO	7
2.1.2	MERCADO DE PLÁSTICOS ATUAL	10
2.1.3	CADEIA DE PRODUÇÃO DE PLÁSTICOS	13
2.1.4	IMPACTOS AMBIENTAIS E INICIATIVAS	14
2.2	BIOPLÁSTICOS	16
2.2.1	MERCADO	19
2.3	PERSPECTIVA MULTINÍVEL	22
2.3.1	OS NÍVEIS SOCIOTÉCNICOS	23
2.3.2	TRANSIÇÕES SÓCIO-TÉCNICAS	24
3	METODOLOGIA.....	33
3.1	ESTUDOS DE CASO	33
3.2	COLETA DE DADOS.....	34
3.3	DIMENSÕES DE ANÁLISE	34
4	ESTUDOS DE CASO	38
4.1	PLA	40
4.1.2	INTRODUÇÃO AO PLA.....	40
4.1.3	SÍNTESE DE PLA.....	41

4.1.4	PROCESSAMENTO DE PLA.....	46
4.1.5	PROPRIEDADES DO PLA.....	47
4.1.6	APLICAÇÕES DO PLA.....	48
4.1.7	HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DO PLA.....	50
4.2	BIO-PET.....	58
4.2.1	INTRODUÇÃO AO BIO-PET.....	58
4.2.2	SÍNTESE DE BIO-PET.....	60
4.2.3	PROPRIEDADES, APLICAÇÕES E PROCESSAMENTO DO BIO-PET.....	66
4.2.4	RECICLAGEM DE BIO-PET.....	67
4.2.5	HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DO BIO-PET.....	69
4.3	PEF.....	74
4.3.1	INTRODUÇÃO AO PEF.....	74
4.3.2	SÍNTESE DE PEF.....	74
4.3.3	PROPRIEDADES, APLICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE PEF.....	76
4.3.4	RECICLAGEM DE PEF.....	77
4.3.5	HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DO PEF.....	77
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	82
5.1	PLA.....	84
5.2	BIO-PET.....	91
5.3	PEF.....	99
5.4	SIMILARIDADES E DIFERENÇAS ENTRE OS CASOS ESTUDADOS.....	104

6	CONCLUSÃO.....	112
7	REFERÊNCIAS.....	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Quantitativo da produção mundial de resinas termoplásticas nos últimos 70 anos.	11
Figura 2. Maiores produtores de resinas termoplásticas no mundo.	12
Figura 3. Distribuição de resinas termoplásticas por setores.	12
Figura 4. Esquema da cadeia de produção de produtos plásticos.	14
Figura 5. Exemplos de bioplásticos e distinção entre bioplásticos de base biológica e biodegradáveis.	17
Figura 6. Produção global de bioplásticos dividida por região.	20
Figura 7. Utilização de bioplásticos de acordo com o mercado.	21
Figura 8. Dinâmica da perspectiva multinível.	25
Figura 9. Quatro contextos de transição e processos de transformação.	26
Figura 10. Caminho de transformação.	28
Figura 11. Caminho de desalinhamento e realinhamento.	29
Figura 12. Caminho de substituição tecnológica.	30
Figura 13. Caminho de reconfiguração.	31
Figura 14. Possíveis espécies de ácido láctico e lactídeos formadores de PLA.	42
Figura 15. Esquema ilustrativo dos métodos de produção de PLA de alta massa molar.	45
Figura 16. Esquema ilustrativo das diferentes rotas de produção de ácido tereftálico de base renovável.	61
Figura 17. Esquema ilustrativo das diferentes rotas de produção de etileno glicol de base renovável.	61

Figura 18. Esquema ilustrativo da principal rota de produção de etileno glicol de base renovável.....	62
Figura 19. Esquema ilustrativo da rota de produção de bio-p-xileno desenvolvida e utilizada pela Virent.....	64
Figura 20. Esquema ilustrativo da rota de produção de bio-p-xileno a partir do hidroximetilfurfural (HMF).....	65
Figura 21. Esquema ilustrativo da rota de produção de bio-p-xileno a partir de isobutanol.....	65
Figura 22. Diferentes métodos possíveis para a reciclagem de PET.....	69
Figura 23. Síntese de PEF a partir de açúcares vegetais.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização dos caminhos de transição.	37
Tabela 2. Propriedades funcionais do PLA vs Aplicações.	50
Tabela 3. Exemplos de aplicações de PLA até 2005.	52
Tabela 4. Exemplos de aplicação de PLA após 2005.	54
Tabela 5. Requisitos mínimos necessários para o correto reprocessamento do PET na cadeia de reciclagem.	68
Tabela 6. Quadro descritivo para o desenvolvimento do PLA.	88
Tabela 7. Quadro descritivo para o desenvolvimento do bio-PET.	94
Tabela 8. Quadro descritivo para o desenvolvimento do PEF.	101
Tabela 9. Quadro analítico para o desenvolvimento do PLA, bio-PET e PEF.	106

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

<u>SIGLAS</u>	<u>DESCRIÇÃO</u>
ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
CFC	Clorofluorcarbono
CIS	<i>Commonwealth of Independent States</i>
DMF	2,5-dimetilfurano
EC	Economia Circular
EPBP	<i>European PET Bottle Platform</i>
FDA	<i>Food and Drug Administration</i>
FDCA	Ácido Furandicarboxílico
GEE	Gases de Efeito Estufa
HMF	Hidroximetilfurfural
JV	<i>Joint Venture</i>
MEG	Monoetileno Glicol
MLP	Perspectiva Multinível
ONG	Organização Não Governamental
ONU	Organização das Nações Unidas
PE	Polietileno
PEF	Poli(etileno 2,5 – furandicarboxilato)
PET	Politereftalato de Etileno
PHA	Polihidroxialcanoato

PLA	Poli(ácido láctico)
PP	Polipropileno
PTA	Ácido Tereftálico Purificado
PX	Para-Xileno
SST	Sistema Sócio-técnico
TST	Transição Sócio-técnica
TT	Transições Tecnológicas

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

Há algumas décadas, os polímeros sintéticos são fundamentais para o funcionamento e progresso da sociedade. Ao longo da história, muitos produtos que anteriormente eram produzidos a partir de materiais como madeira, metais e vidro passaram a ser feitos de material polimérico, ou plástico, como foi popularizado. À medida em que a indústria petroquímica se desenvolvia, os plásticos se tornaram cada vez mais comuns e foram conquistando diferentes mercados, com suas diversas aplicações.

Durante o processo de desenvolvimento da indústria dos plásticos, houve a estruturação de uma complexa cadeia de agentes. A lógica desta indústria baseia-se em 6 principais estágios: o refino do petróleo, a produção dos químicos básicos, a produção de polímeros, a transformação do plástico e a utilização pelo mercado consumidor. Após o uso e descarte dos materiais plásticos, há também a reciclagem e destinação final dos resíduos gerados. Assim, para o funcionamento desta cadeia, observa-se a interação entre os agentes de cada um dos estágios, de modo a envolver tanto as empresas em cada um deles, quanto agentes reguladores, formuladores de política e o consumidor final.

Ao longo do tempo, diversos polímeros se tornaram *commodities* e atualmente estão nas mais diversas aplicações. Estima-se que em 2015 a produção global de plásticos esteve em torno de 320 milhões de toneladas anuais, o que representa um faturamento anual de aproximadamente US\$ 600 bilhões para a indústria de plásticos (BROCKHAUS; PETERSEN; KERSTEN, 2015; EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016a; GOURMELON *et al.*, 2015).

Entretanto, devido ao alto consumo de plásticos e, principalmente, ao caráter descartável em grande parte das aplicações, os impactos ambientais e sociais desta indústria também são elevados. O descarte intensivo e a incorreta destinação dos resíduos plásticos são responsáveis por mais de 10% da geração anual de resíduos

nos Estados Unidos e a maior parte do volume de plástico descartado acaba se acumulando em ambientes naturais e afetando a fauna e a flora locais (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2016; GOURMELON *et al.*, 2015; PHILP, 2014).

Além da geração de resíduos pós-uso, a produção de polímeros sintéticos por si só também é prejudicial ao meio ambiente. Os plásticos são atualmente produzidos em grandes quantidades para atender às demandas de mercado e sua principal matéria-prima continua sendo o petróleo. Portanto, além dos Gases de Efeito Estufa (GEE) produzidos e emitidos, a produção dos plásticos também é intensiva em consumo de água e energia (GOURMELON *et al.*, 2015).

Apesar de todos os impactos negativos causados pelo plástico ao meio ambiente e à saúde humana, ele continua tendo um papel fundamental no avanço tecnológico e científico da humanidade, contribuindo também positivamente para melhor qualidade de vida e avanços importantes na medicina. De forma geral, o plástico continua sendo essencial para a vida moderna e está presente em praticamente todos os lugares.

Portanto, há diversas frentes de pesquisa com foco na produção e utilização de polímeros sintéticos de formas mais seguras e sustentáveis. Algumas correntes buscam alternativas para otimizar a eficiência de reciclagem do plástico, outras buscam a implementação de um sistema de Economia Circular (EC)¹ para o máximo (re)aproveitamento de recursos antes da destinação final de um produto. Há ainda o desenvolvimento de diferentes tipos dos chamados bioplásticos, com diferentes características, propriedades e aplicações (HOPEWELL; DVORAK; KOSIOR, 2009; SONG *et al.*, 2009).

Os bioplásticos podem ser definidos como sendo plásticos produzidos a partir de matéria-prima biológica e/ou plásticos que sejam biodegradáveis. Neste sentido, o bioplástico pode ser somente de base biológica, somente biodegradável ou apresentar ambas as características. Apesar de serem propriedades independentes uma da outra, podem estar presentes em um mesmo material (DIVISION, 2016; EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016a).

¹ Segundo a fundação Ellen MacArthur, Economia Circular é um sistema restaurativo e regenerativo com o intuito de aproveitar ao máximo os produtos e seus componentes e materiais antes de serem inutilizados. Fonte: Ellen MacArthur Foundation (2017).

Devido ao uso de matéria-prima renovável para a produção de plásticos de base biológica, estes podem contribuir para a redução de GEE na atmosfera, seja por meio da captura de CO₂ durante o crescimento da matéria-prima, seja em substituição ao uso de plásticos de origem fóssil - também tratados como plásticos convencionais. Dessa forma, os bioplásticos geralmente apresentam menor pegada de carbono até a produção do produto final, quando comparados aos plásticos convencionais, diminuindo o potencial agravante de aquecimento global (DIVISION, 2016; EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016a).

Atualmente, os bioplásticos representam apenas cerca de 1% das 320 milhões de toneladas de plástico produzidas anualmente. Todavia, com a crescente demanda e com a evolução dos bioplásticos, e considerando-se o surgimento de novos produtos e aplicações para estes materiais, é estimado que este mercado cresça entre 20 e 100% anualmente (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016a).

De acordo com o último levantamento realizado pela *European Bioplásticos* – organização internacional voltada para o estudo e desenvolvimento dos bioplásticos – a capacidade de produção global de biopolímeros está prevista para crescer em 50% no médio prazo, aumentando de 4,2 milhões de toneladas em 2016 para aproximadamente 6,1 milhões de toneladas até 2021² (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016a).

O aumento na utilização de bioplásticos em todos os segmentos de mercado é guiado pela crescente demanda por produtos sustentáveis, uma vez que a consciência sobre os impactos ambientais tem aumentado, assim como as regulações ambientais têm se tornado mais severas. Além disso, a utilização de matérias-primas de base renovável na produção de plásticos diminui a dependência do setor em relação ao petróleo e à volatilidade de seu preço.

Apesar da tendência de aumento de produção e consumo dos bioplásticos, observa-se que estes representam ainda uma pequena parcela do mercado global de plásticos. Isso pode ser justificado pelas dificuldades de difusão dos novos produtos a nível

² Neste levantamento também foram considerados biopolímeros poliuretanos, que não haviam sido considerados nos levantamentos realizados pela *European Bioplásticos* anteriores.

global, que podem ocorrer tanto por questões tecnológicas quanto por questões de competitividade e aplicações de mercado.

Quanto à natureza dos bioplásticos, alguns possuem características *drop-in*³, exigindo pouca ou nenhuma adaptação do sistema de produção e processamento de plásticos convencionais. No entanto, grande parcela dos bioplásticos está enquadrada na categoria não *drop-in*⁴, exigindo investimentos para transformações e adaptações dos métodos produtivos, de processamento e reciclagem tradicionais. Tais alterações necessárias consolidam um grande obstáculo para maior adoção dos bioplásticos: o custo de produção mais alto que para plásticos derivados fósseis (OROSKI; ALVES; BOMTEMPO, 2014; EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016a; PHILP, 2014).

Como mencionado anteriormente, a indústria do plástico encontra-se atualmente bem estruturada em uma cadeia dinâmica de agentes diversos, inter-relacionados e orientados para o funcionamento da lógica de produção e consumo vigentes. O crescente desenvolvimento dos bioplásticos nos últimos anos, no entanto, tem mostrado indícios de que grandes esforços estão sendo feitos para a aceleração da produção destes e sua difusão no mercado dos plásticos. Há autores, inclusive, que apostam no sucesso dos bioplásticos a ponto de tomarem espaço e substituírem os plásticos convencionais (BROCKHAUS; PETERSEN; KERSTEN, 2015; ILES; MARTIN, 2013; PHILP, 2014).

A introdução dos bioplásticos na indústria já estabelecida de plásticos convencionais, no entanto, exige adaptações da lógica incumbente do setor, evidenciando desafios de cunhos tecnológico, social e econômico a serem superados. A partir disso, pode-se pensar que a introdução dos biopolímeros ocorra sob a forma de possível transição na indústria de plásticos.

Nesse sentido, algumas questões a respeito do desenvolvimento dos bioplásticos tornam-se evidentes, como: haverá algum tipo de integração dos bioplásticos no setor de plásticos convencionais? Quem são os principais atores no desenvolvimento de

³ Bioplásticos *drop-in* são aqueles que apresentam equivalentes fósseis de mesma estrutura química e que, portanto, possuem propriedades técnicas idênticas.

⁴ Bioplásticos não *drop-in* possuem estrutura química diferentes dos plásticos convencionais existentes e, por essa razão, possuem propriedades técnicas diferentes.

bioplásticos? Qual é a relação entre eles e o setor estabelecido dos plásticos convencionais? Como ocorrerá a transição sócio-técnica com o desenvolvimento dos bioplásticos? Há formas de transição diferenciadas entre os bioplásticos?

Alinhado a essa perspectiva, o presente trabalho busca compreender o desenvolvimento dos bioplásticos e a sua relação com a indústria de plásticos. Uma vez que o objeto de estudo consiste em um problema complexo – envolvendo esferas social, econômica e tecnológica – baseia-se na literatura de Transição Sócio-técnica (TST) por meio da Perspectiva Multinível (MLP), conforme abordado por Geels (2002) e Geels *et al.* (2016) como instrumento para analisar o histórico de desenvolvimento de três bioplásticos – PLA, bio-PET e PEF – e mapear possíveis trajetórias de transição do sistema sócio-técnico dos plásticos.

A MLP é um método qualitativo de análise desenvolvido por Geels (2002, 2004) para a melhor compreensão de transições em sistemas sócio-técnicos – sistemas envolvendo a produção, difusão e uso de tecnologias, assim como seus efeitos no usuário e na esfera social (GEELS, 2004). Para entender as inovações e transformações do sistema sócio-técnico, a perspectiva multinível se baseia na análise da dinamicidade e de interações entre três diferentes níveis do sistema: o micro nível – ou nichos – o meso nível, também chamado de regime, e o macro nível, denominado paisagem. Dessa forma, é possível avaliar elementos de caráter tecnológico, sociais e econômicos presentes no sistema em análise e durante sua transformação.

Portanto, a partir dessa literatura, este estudo busca contribuir para o melhor entendimento da dinâmica de interação entre o regime incumbente, os nichos e a paisagem do SST dos plásticos a partir do desenvolvimento de bioplásticos. Por meio desse esclarecimento, espera-se colaborar para a elucidação dos questionamentos apresentados e para a identificação de fatores que favoreçam ou desfavoreçam o avanço dos bioplásticos, assim como auxiliar formuladores de políticas a agir em favor do desenvolvimento sustentável.

Capítulo 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo apresenta e explica os principais conceitos necessários para o melhor entendimento dos estudos de caso apresentados e discutidos ao longo deste trabalho. Neste capítulo, são abordados temas como: o desenvolvimento da indústria de plásticos e seu cenário atual; o conceito de bioplásticos e dados de mercado; e a base teórica e conceitual a respeito da perspectiva multinível e formas de transição de sistemas sócio-técnicos – utilizados como base para a análise dos casos estudados.

2.1 A INDÚSTRIA DOS PLÁSTICOS

A palavra “plástico” significa “capaz de ser moldado ou modelado”. Recentemente o termo em questão tem sido útil para definir uma categoria de materiais: os polímeros. Os polímeros são macromoléculas estruturadas em longas cadeias conectando unidades menores, chamadas “monômeros”. Os polímeros sempre estiveram presentes na natureza, por exemplo sob a forma de carboidratos, lipídios e celulose (MANO, 2001). Apesar de alguns polímeros serem encontrados na natureza, também é possível a síntese destes, tanto a partir de polímeros naturais – como a própria celulose – como também a partir de derivados fósseis, como o petróleo e o gás natural, matérias-primas ricas em carbono.

Os polímeros são formados por longas cadeias carbônicas, organizadas em unidades repetidas. As diferenças entre as cadeias e seus monômeros, seja na forma ou frequência com que se repetem ou pelos átomos que as compõem, são suficientes para diferenciá-los quanto à sua dureza, elasticidade e massa, dentre outras propriedades. São justamente essas diferenças que permitem conferir diferentes aplicações aos polímeros sintéticos e assim, produzi-los, moldá-los e adequá-los de acordo com as necessidades (MANO, 2001).

2.1.1 HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DA INDÚSTRIA PLÁSTICA

Inicialmente produzido no século XIX, o plástico foi originalmente inventado para servir de substituto para um material em escassez desde aquele tempo: o marfim extraído de elefantes. Na época, o marfim era o componente principal das bolas de bilhar e, com a rápida difusão da prática, a caça de elefantes se intensificou e o marfim se tornou progressivamente mais raro (FREINKEL, 2011).

Por meio da reação química entre celulose vegetal e ácidos nítrico e sulfúrico, John Wesley Hyatt, pela primeira vez em 1869, obteve sucesso em produzir um material moldável a altas temperaturas e rígido após resfriamento: o celuloide. O novo material era capaz de imitar substâncias como o marfim, chifres de animais e cascos de tartaruga. Assim, iniciou-se a substituição destes materiais naturais, escassos e de difícil obtenção, pelo celuloide na fabricação de diversos produtos, desde a bola de bilhar até pentes de cabelo (ERICKSON, 2006). Dessa forma, além de revolucionar a indústria da manufatura, o primeiro plástico produzido contribuía para a sobrevivência de espécies variadas de animais.

No entanto, o novo polímero tinha uma limitação: o celuloide era pouco durável e explosões eram frequentes durante sua produção. Em seu processo produtivo, misturas realizadas erroneamente resultavam em explosões e acidentes, dificultando sua produção em massa. Apesar desses inconvenientes, o celuloide continuava a ser produzido. Assim, enquanto o novo produto se destacava no mercado, alternativas de processo e de produtos eram investigadas (ERICKSON, 2006).

Em 1907, Leo Baekeland inventou a bakelita. Anos mais tarde, o mesmo inventor foi quem chamou seu produto de “plástico” pela primeira vez. Assim como Hyatt, Baekeland descobriu seu invento na tentativa de imitar um produto natural e escasso: o *shellac*, uma espécie de resina extraída de besouros e utilizada como isolante elétrico. A bakelita apresentava, além da propriedade de isolante elétrico, resistência ao calor, moldabilidade e - ao contrário do celuloide - era durável e de fácil produção em massa. Dessa forma, o novo material foi amplamente utilizado em diversos produtos, variando desde copos até componentes de câmeras e rádios. Neste mesmo período, popularizava-se a moldagem por injeção – método utilizado até hoje na

transformação de polímeros e produção de produtos a base de plástico (COUNCIL, 2017).

O sucesso destes dois plásticos foi um incentivo para o desenvolvimento de diversos outros polímeros sintéticos ao longo da história, especialmente, nos períodos de guerra. No período antecedente à II Guerra Mundial, a produção de plásticos era alvo de muitas inovações tecnológicas e estava se consolidando em escala industrial. Assim, durante a Guerra, os polímeros serviram de substitutos para as matérias-primas escassas na confecção de peças de armamentos, paraquedas, tendas e cabos de transmissão elétrica.

Mesmo após o fim da Guerra, a produção de plásticos continuou em crescimento. Uma vez que os polímeros, em geral, tinham matérias-primas abundantes e o método de produção era seguro e de baixo custo unitário, os plásticos eram vistos como alternativas para a confecção de diversos produtos, bastando serem moldados de acordo com as necessidades, o que de fato, se concretizou.

Em termos de matéria-prima, as Guerras Mundiais também tiveram impactos sobre a produção dos plásticos. Na fase anterior à I Guerra Mundial, o benzeno era utilizado para grande parte dos polímeros produzidos e era extraído do carvão mineral. No período entre guerras, houve a transição – ainda que lenta – para a utilização de petróleo como matéria-prima bruta de polímeros. Já no período posterior à II Guerra Mundial, a oferta de carvão para a produção de plásticos passou a ser insuficiente e o incentivo à produção de benzeno derivado de petróleo por parte do governo estadunidense se intensificou (COUNCIL, 2017; ERICKSON, 2006).

Devido a investimentos massivos do governo estadunidense na indústria do plástico e à imposição de cooperação obrigatória entre companhias do setor durante a II Guerra Mundial, empresas pioneiras como Du Pont, Dow, Union Carbide, Standard Oil e Monsanto foram capazes de descobertas envolvendo o vinil, etileno e acrílico. Assim, a ascensão do plástico tomou proporções progressivamente maiores, chegando a ter sua produção triplicada entre os anos de 1940-1945. Além disso, no pós-guerra, campanhas de marketing de fomento ao uso e compra de produtos plásticos pela população garantiram um crescimento do setor a uma taxa de aproximadamente 15% ao ano, superando o setor de alumínio no início da década de

60. O plástico apresentava-se como uma solução para a escassez de alguns recursos naturais e tornava-se cada vez mais comum e presente na sociedade (ERICKSON, 2006; FREINKEL, 2011).

Entretanto, já na década de 70 a visão sobre o plástico começou a mudar. O caráter descartável de grande parte dos plásticos e a crescente consciência da toxicidade e desperdício destes levaram a sociedade a repensar sobre as vantagens e desvantagens do material – dando início a um pensamento anti-plástico nos Estados Unidos e no mundo (ERICKSON, 2006).

O descarte intensivo e acúmulo de produtos plásticos ao longo dos anos pressionou o sistema legislativo dos Estados Unidos a criar leis de descarte e reciclagem obrigatória do lixo plástico. Neste sentido, foram criadas campanhas de reciclagem e mudanças na sistemática de coleta e tratamento de lixo foram implementadas em esferas municipais (ERICKSON, 2006). Estas ações observadas nos Estados Unidos também ocorrem em diversos outros países, sendo também muito fortes na Europa. No entanto, apesar do esforço nessa direção, ainda assim, toneladas de lixo plástico continuavam a ser descartadas incorretamente anualmente.

No final da década de 80, ativistas ambientais iniciaram campanhas contra a utilização de poliestireno, material plástico utilizado com isolante térmico, por grandes marcas como McDonald's. Uma vez que a preocupação com a camada de ozônio e aquecimento global aumentava, a utilização de gases CFCs (clorofluorcarbono) – prejudiciais à camada de ozônio – na produção do poliestireno expandido passou a ser condenada e o produto final deixou de ser utilizado em larga escala pela rede de *fast-food* (ERICKSON, 2006; FREINKEL, 2011).

Além disso, preocupações com os efeitos dos plásticos na saúde humana também impactaram a visão pública sobre estes produtos. À medida que pesquisas avançavam, efeitos negativos do Bisfenol A sobre a saúde, assim como de outros produtos aditivos a base de ftalatos, eram descobertos. O Bisfenol A é um químico utilizado como aditivo ao polímero durante a produção do plástico. Esta substância confere maior flexibilidade, durabilidade e transparência ao produto final. No entanto, há evidências científicas de que este produto se desprende do material plástico e entra em contato com o alimento e a água. O grande problema é que a substância é capaz

de desregular o sistema hormonal biológico, apresentando riscos de doenças, principalmente durante a gravidez (ERLER; NOVAK, 2010; STAPLES *et al.*, 1998).

Não obstante, a produção e consumo de plásticos também têm impactos consideráveis no meio ambiente. Apesar disso, o plástico continua sendo essencial ao estilo de vida moderno. Dessa forma, atualmente há diversas iniciativas com o intuito de amenizar os efeitos causados pela produção e consumo de plásticos, de forma a contribuir para produção e uso sustentável deste material. Tais impactos e iniciativas serão abordados na seção 2.1.4.

2.1.2 MERCADO DE PLÁSTICOS ATUAL

Desde o início da produção de plástico até os dias atuais, esta continua em crescimento praticamente constante, como pode ser observado pela figura 1. Somente em 2014, a produção mundial de resinas termoplásticas atingiu a marca de 311 milhões de toneladas produzidas, quantidade 20 vezes maior que produção de plásticos 50 anos antes. Não obstante, estima-se ainda que a produção deve dobrar nos próximos 20 anos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2016).

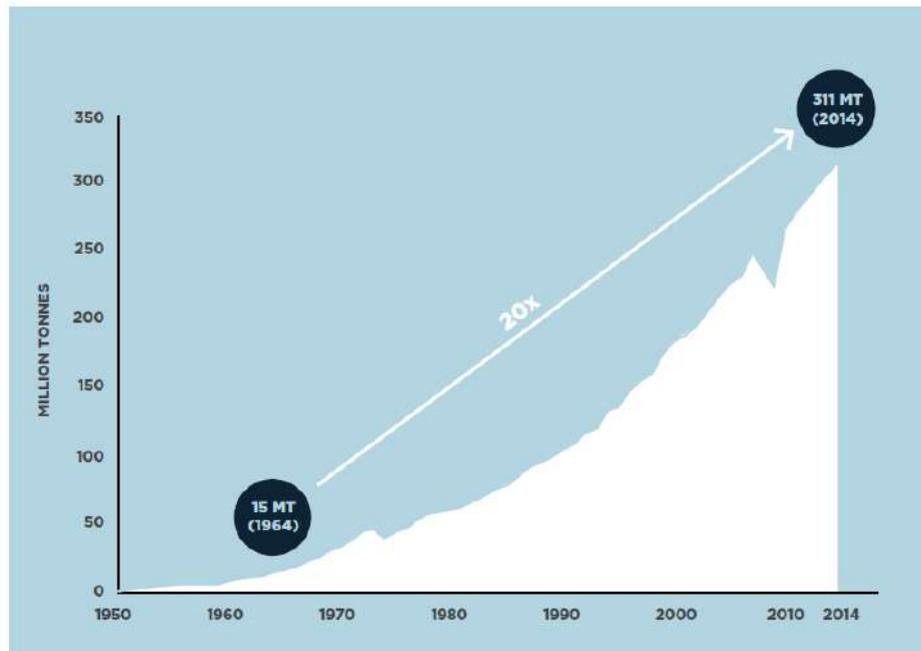


Figura 1. Quantitativo da produção mundial de resinas termoplásticas nos últimos 70 anos.

Fonte: Ellen MacArthur Foundation (2016).

De acordo com a ABIPLAST (Associação Brasileira da Indústria do Plástico), os maiores produtores mundiais de resinas termoplásticas estão concentrados na Ásia, na Europa e na América do Norte – como ilustrado na figura 2. A China é, sozinha, a região com maior produção de plásticos no mundo, com produção equivalente a 27,8% do volume mundial, seguida pela Europa (18,5%) e América do Norte (18,5%) (ABIPLAST, 2016).

Conforme mencionado anteriormente, o plástico possui diversas aplicações em diversos setores da economia. A figura 3 representa a distribuição dos polímeros mais utilizados entre os diversos setores em que são aplicados nos países da União Europeia. Como evidenciado, de forma geral o setor de embalagens é o setor que mais demanda resinas termoplásticas, representando cerca de 40% do consumo total de plásticos. O setor automobilístico também mostra-se de grande relevância com consumo total de aproximadamente 20% (PLASTICS, 2016).

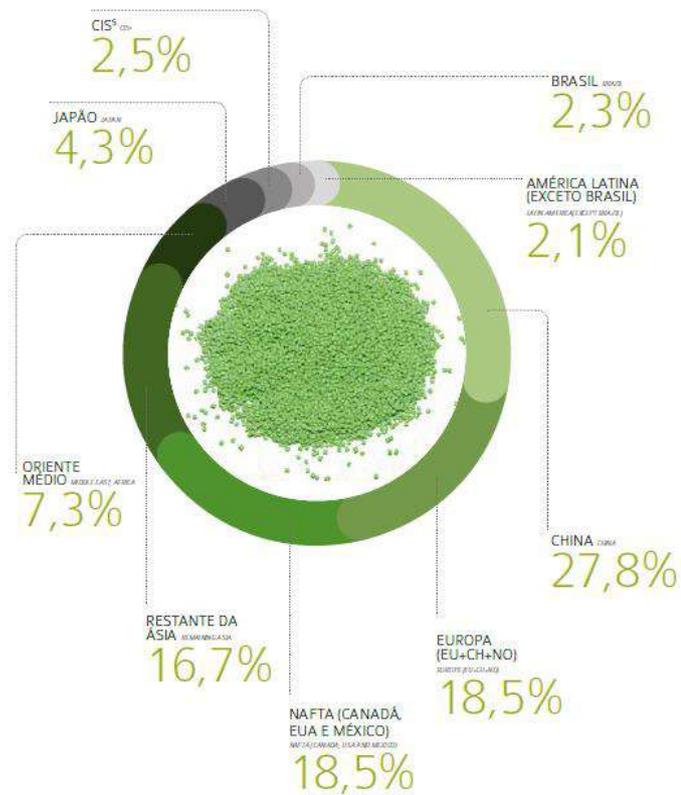


Figura 2. Maiores produtores de resinas termoplásticas no mundo.

Fonte: ABIPLAST (2016). *CIS – Commonwealth of Independent States.

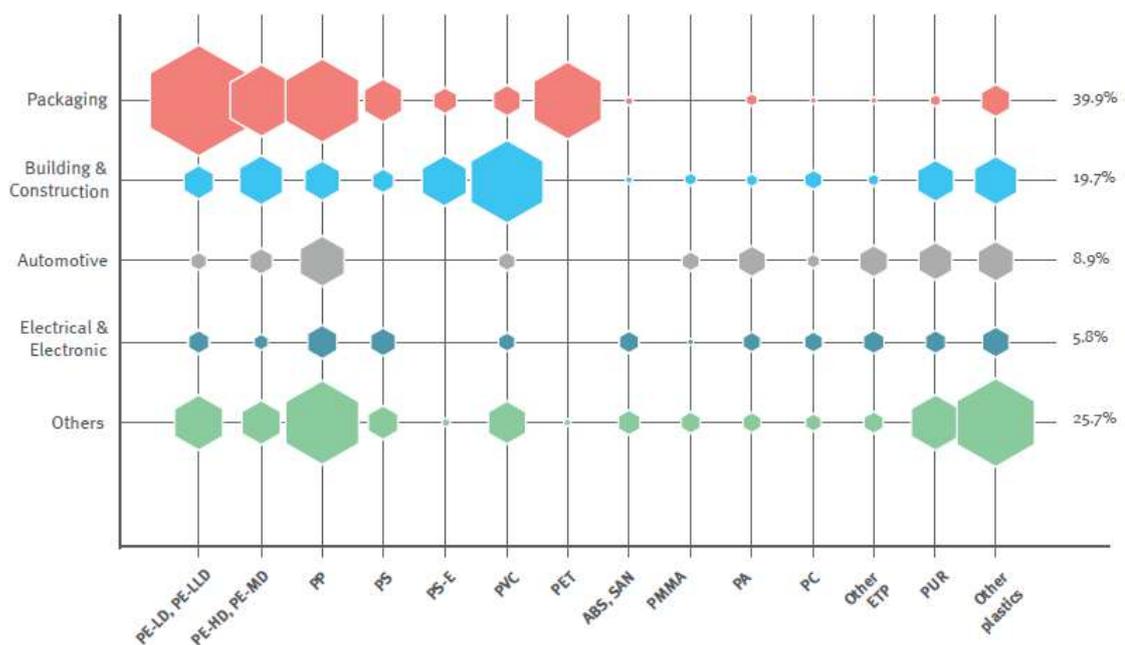


Figura 3. Distribuição de resinas termoplásticas por setores.

Fonte: European Association of Plastics (2016).

2.1.3 CADEIA DE PRODUÇÃO DE PLÁSTICOS

A cadeia de produção de plásticos divide-se em 6 etapas principais, com atores diferenciados em cada uma delas: o refino, a produção dos químicos básicos, a produção de polímeros, a transformação do plástico, o mercado consumidor e a reciclagem e destino final dos rejeitos. A figura 4 apresenta um esquema simplificado da cadeia produtiva dos plásticos.

Atualmente a principal matéria-prima para a fabricação dos plásticos é o petróleo. Estima-se que cerca de 4% da produção mundial de petróleo e gás é usada como matéria-prima para a produção de plásticos e outros 3 a 4% são usados como fontes de energia para o processo (ABIPLAST, 2016).

A cadeia produtiva dos plásticos inicia-se com a extração do petróleo ou gás natural e refino para a separação da nafta e mistura de aromáticos pesados (no caso do petróleo). Tais frações do petróleo, são usadas pela indústria de primeira geração para a obtenção de químicos básicos como eteno, propeno, benzeno, tolueno, orto/para-xileno, xileno misto e butadieno (ABIPLAST, 2016).

Por sua vez, a produção de resinas como politereftalato de etileno (PET), polietileno (PE) e polipropileno (PP) a partir dos produtos petroquímicos básicos produzidos na primeira geração constitui a segunda geração da indústria petroquímica. As resinas produzidas são, então, processadas para a geração de diversos produtos nas indústrias de transformação plástica, ou seja, nas empresas da terceira geração (ABIPLAST, 2016).



Figura 4. Esquema da cadeia de produção de produtos plásticos.

Fonte: ABIPET (2017a).

Finalmente, os produtos finais já transformados vão para os diversos setores como a construção civil, setor de alimentos e bebidas, agricultura, instrumentos médicos, entre outros. A partir desses mercados, o consumidor ou usuário final tem o contato com o plástico produzido ao longo de toda a cadeia descrita. Após a utilização pelo usuário final e descarte, o material plástico segue para a cadeia de reciclagem ou recebe destinação final (ABIPLAST, 2016).

2.1.4 IMPACTOS E INICIATIVAS AMBIENTAIS

Conforme mencionado anteriormente, o consumo intensivo dos plásticos é um dos maiores problemas no que tange à preservação do meio ambiente. Apesar de já ter se passado mais de 40 anos desde o início dos procedimentos de reciclagem de produtos plásticos, estima-se que atualmente cerca de 80-120 bilhões de dólares são perdidos anualmente após a primeira utilização de produtos plásticos. Somente cerca de 14% dos plásticos descartados anualmente são, de fato, reciclados (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2016).

O descarte dos plásticos, sem que sejam reciclados, causa graves problemas ao meio ambiente. Devido ao descarte indevido de plásticos, cerca de 8 milhões de toneladas

do material acabam nos oceanos e, caso a situação continue a mesma, esse volume deve dobrar até 2030 e quadruplicar até 2050 (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2016). Esse grande volume de plástico que acaba nos oceanos é responsável por ameaçar a fauna marinha e também por liberar micropartículas de plástico, que podem vir parar em alimentos humanos (COLE *et al.*, 2011). Em resposta a esse problema, campanhas de organizações ativistas como a “*No Plastic*” da ONG (Organização Não Governamental) *GreenPeace* foram iniciadas, com o intuito de reunir apoio popular para pressionar governos europeus a adotarem medidas reguladoras mais rígidas quanto ao uso e descarte de plástico – evidenciando o sentimento anti-plástico de uma parcela da sociedade (GREENPEACE, 2017).

Tais problemas com a destinação final dos plásticos não só fomentaram iniciativas para otimização dos sistemas de reciclagem ao redor do mundo como também fortaleceram as práticas de reuso, de logística reversa e o sistema de economia circular (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2016). Uma das iniciativas em prol da EC foi a criação da Fundação Ellen MacArthur em 2010 com o objetivo de acelerar a implementação do sistema de EC. Segundo a própria fundação, a EC é um sistema restaurativo e regenerativo com o intuito de aproveitar ao máximo os produtos e seus componentes e materiais antes de serem inutilizados (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2017).

Além dos problemas com a destinação final dos plásticos, a produção destes por si só também é prejudicial ao meio ambiente. Os plásticos são atualmente produzidos em largas quantidades para atender às demandas de mercado e sua principal matéria-prima continua sendo derivados de petróleo. Dessa forma, a produção de plásticos convencionais contribui para emissão de GEE, além de ser intensiva em consumo de água e energia (GOURMELON *et al.*, 2015).

Com o crescimento da preocupação com os impactos ambientais, iniciativas regulamentadoras foram criadas para o controle e redução da emissão de GEE. Tais iniciativas não englobam somente o setor dos plásticos, mas todos os setores da

economia. Alguns exemplos são o Protocolo de Quioto⁵, o *Clean Air Act*⁶ dos Estados Unidos e o Acordo de Paris⁷. Além de iniciativas políticas para a amenização dos impactos causados pela produção e utilização de plásticos, as próprias empresas envolvidas nessas atividades também têm agido para a resolução desses problemas.

Portanto, há diversas frentes de trabalho para fazer com que a produção e utilização de polímeros sintéticos sejam mais seguras e sustentáveis. Diversas empresas na indústria petroquímica têm tomado iniciativas para a redução do consumo de água e energia elétrica. Além disso, algumas correntes de pesquisa buscam também alternativas para otimizar a eficiência de reciclagem do plástico, considerando inclusive a conversão completa do plástico para a própria matéria-prima de origem fóssil.

Há também grandes esforços incentivando o próprio reuso dos plásticos, antes mesmo da reciclagem, a fim de se estabelecer um sistema de EC. Outra frente, no entanto, busca alternativas a partir do desenvolvimento dos bioplásticos – foco do presente trabalho (HOPEWELL; DVORAK; KOSIOR, 2009; SONG *et al.*, 2009).

2.2 BIOPLÁSTICOS

Bioplásticos podem ser definidos como plásticos completa ou parcialmente oriundos de matéria-prima biológica e/ou plásticos biodegradáveis. Nesse sentido, o bioplástico pode ser somente de base biológica, somente biodegradável ou apresentar ambas as características. Apesar de serem propriedades independentes uma da outra, podem estar presentes em um mesmo material, conforme representado e exemplificado na figura 5 (DIVISION, 2016; EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016a).

⁵ Criado em 1997 e em vigor a partir de 2005, o Protocolo de Quioto constitui um tratado da Organização das Nações Unidas (ONU) sobre mudança do clima, definindo metas de redução de emissões de GEE para os países assinantes do tratado (IBAMA, 2017a).

⁶ O *Clean Air Act* é uma lei federal americana que regula a emissão de GEE de fontes móveis e estacionárias, a fim de proteger o bem-estar público (USEPA, 2017).

⁷ O Acordo de Paris, criado em 2016 pela ONU, possui metas de redução de emissões de GEE para todos os países, desenvolvidos e em desenvolvimento, definidas nacionalmente conforme as prioridades e possibilidades de cada um (IBAMA, 2017b).

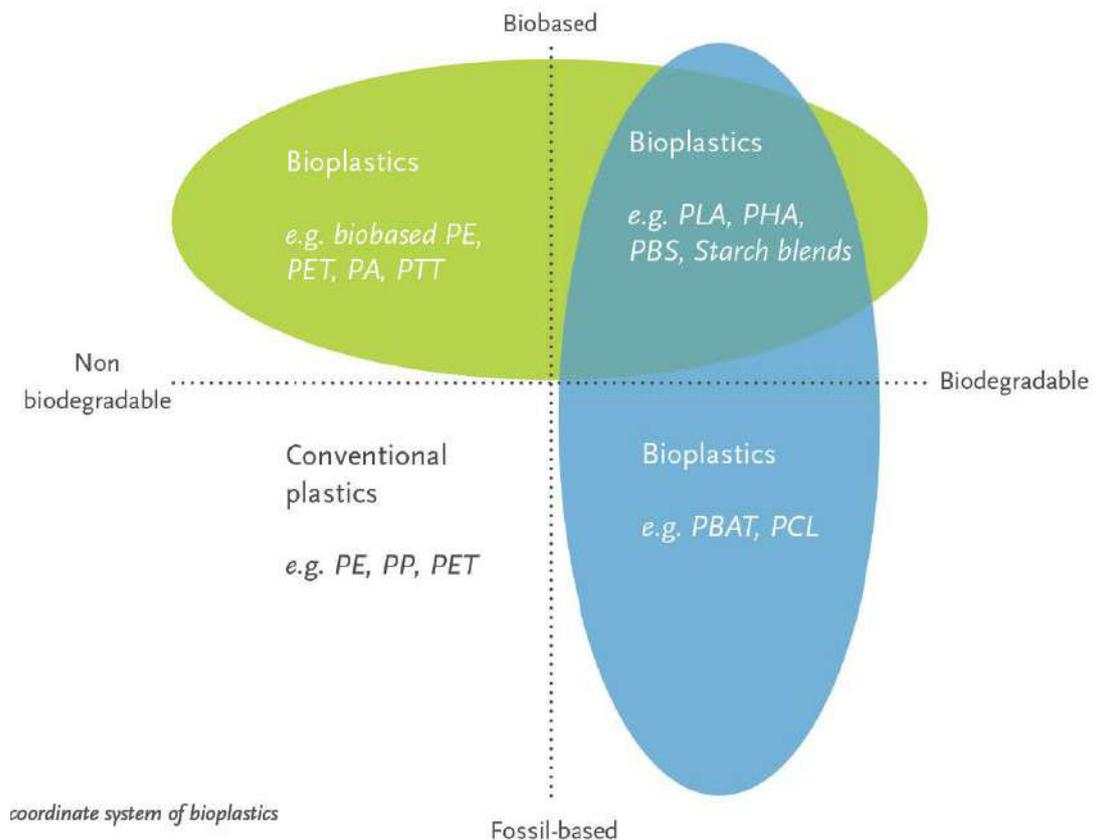


Figura 5. Exemplos de bioplásticos e distinção entre bioplásticos de base biológica e biodegradáveis.

Fonte: European Bioplastics (2016a).

O bioplástico de base biológica (também chamado de plástico *biobased*) possui todos ou parte de seus átomos de carbono produzidos a partir de uma fonte renovável, ou seja, uma fonte que seja rapidamente restaurada ou inesgotável. Tais fontes renováveis são predominantemente culturas vegetais como milho, cana-de-açúcar, beterraba, cereais e outras fontes de açúcares. Além disso, para que o plástico seja considerado de base biológica, a porção renovável não precisa ser necessariamente a cadeia polimérica principal, mas também pode compor os aditivos utilizados na produção do produto final (DIVISION, 2016).

Duas formas de se analisar se um plástico é ou não de base biológica são: indicar o conteúdo de carbono de base biológica ou indicar o conteúdo de massa de base biológica. O método mais utilizado, entretanto, é o primeiro. Para isto, a metodologia mais utilizada consiste na medição da quantidade do isótopo C-14 no plástico, de acordo com o padrão americano CEN/TS 16137. O método é eficiente, uma vez que espera-se que a quantidade de C-14 de produtos oriundos do petróleo seja

praticamente nula, enquanto matérias-primas de base biológica possuem valores superiores (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016a).

Por outro lado, plásticos biodegradáveis são aqueles passíveis de degradação completa por ação biológica em ambiente e em intervalo de tempo definidos. Tais ambientes incluem compostagem, digestão anaeróbia e ambientes marinhos e terrestres (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016a). No entanto, as condições para a definição de um produto biodegradável podem variar de acordo com os agentes reguladores de cada região (DIVISION, 2016; SONG *et al.*, 2009). Alguns exemplos de bioplásticos biodegradáveis são o poli(ácido láctico) (PLA) e o polihidroxicanoato (PHA).

É possível também classificar os bioplásticos em *drop-in* e não *drop-in*. O termo *drop-in* foi inicialmente utilizado para biocombustíveis cujas especificações permitiam sua aplicação no mercado com a mesma infraestrutura existente, sem muitos investimentos em ativos específicos (DE ALMEIDA OROSKI; CHAVES ALVES; BOMTEMPO, 2014). Dessa forma, bioplásticos *drop-in* são aqueles que apresentam equivalentes fósseis que possuem a mesma estrutura química que seu análogo petroquímico e, portanto, propriedades técnicas idênticas. Assim, podem ser utilizados e aplicados no *downstream*⁸ utilizando a mesma infraestrutura já existente para seus equivalentes fósseis. Dentre os bioplásticos *drop-in*, destacam-se, por exemplo, o PE verde e o politereftalato de etileno de base biológica (bio-PET) (DE ALMEIDA OROSKI; CHAVES ALVES; BOMTEMPO, 2014; STORZ; VORLOP, 2013).

Os bioplásticos não *drop-in*, por sua vez, são aqueles que apresentam características diferentes dos plásticos convencionais existentes, e por essa razão, sua produção e utilização no *downstream* demandam adaptações na infraestrutura existente. Como exemplos, podemos citar o PLA, o PHA e o poli(etileno 2,5 – furandicarboxilato) (PEF) (DE ALMEIDA OROSKI; CHAVES ALVES; BOMTEMPO, 2014; STORZ; VORLOP, 2013).

Da mesma forma que os plásticos petroquímicos tradicionais, os bioplásticos podem possuir uma gama de propriedades e características diversas, possibilitando inúmeras

⁸ Por *downstream* entende-se os métodos de transformação, utilização e reciclagem e destinação final do plástico.

aplicações. Assim, bioplásticos *drop-in*, por exemplo, podem ter o mesmo desempenho e aplicações que seus polímeros análogos de origem fóssil. Entretanto, as diferenças das propriedades do PHA e PLA em relação aos plásticos convencionais, permitem novas aplicações para os bioplásticos e conquista de novos mercados (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016; STORZ; VORLOP, 2013). Além disso, como no caso do PEF, o biopolímero pode possuir propriedades muito similares a de um polímero fóssil – no caso, o PET – e, portanto, ser um potencial substituto no mercado (DE JONG *et al.*, 2012).

Devido ao uso de biomassa como matéria-prima de plásticos *biobased*, estes possuem alguns benefícios atrelados a sua produção e utilização. Dentre eles, estão: a redução da pegada de carbono em seu ciclo de vida, a inesgotabilidade da matéria-prima e redução do uso de recursos fósseis (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016a). Apesar da redução da pegada de carbono, vale destacar que o ciclo de vida de um bioplástico não depende somente da matéria-prima utilizada, mas também do consumo de utilidades e formas de descarte dos resíduos. Assim, somente a utilização de matéria-prima renovável não garante a produção sustentável do bioplástico.

Haja vista que a biomassa é proveniente de vegetais e estes absorvem dióxido de carbono (CO₂) atmosférico durante o processo de fotossíntese para geração de energia, pode-se considerar que a produção do próprio bioplástico captura CO₂ da atmosfera. Além disso, o fato de matéria-prima vegetal ser utilizada ao invés de matéria-prima fóssil também reduz a escala de utilização desta última, diminuindo a dependência de recursos fósseis e emissões de carbono no processo de fabricação de plásticos. Dessa forma, os bioplásticos geralmente promovem redução da pegada de carbono em seu ciclo de vida e têm menor potencial agravante de aquecimento global, quando comparados com seus equivalentes petroquímicos. (DIVISION, 2016; EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016a).

2.2.1 MERCADO

Atualmente, os bioplásticos representam cerca de 1% das 320 milhões de toneladas de plástico produzidas anualmente. Entretanto, com a crescente demanda e com a

evolução de bioplásticos mais sofisticados, surgimento de novos produtos e aplicações, é estimado que este mercado cresça entre 20% e 100% ao ano (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016b).

De acordo com estimativas recentes, a capacidade de produção global de bioplásticos está prevista para crescer em 50% no médio prazo, aumentando de 4,2 milhões de toneladas em 2016 para aproximadamente 6,1 milhões de toneladas até 2021 (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016a). Os maiores produtores se concentram na China, Europa e América do Norte, conforme ilustrado na figura 6.

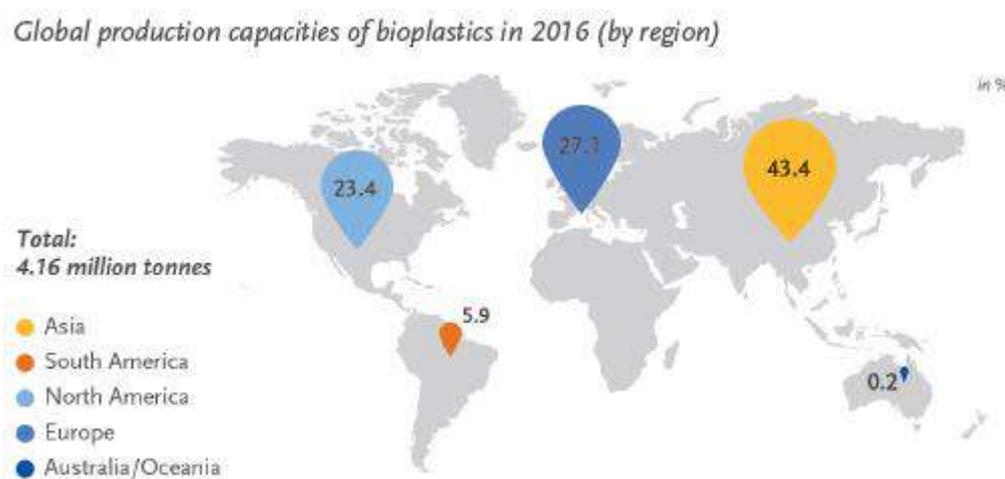
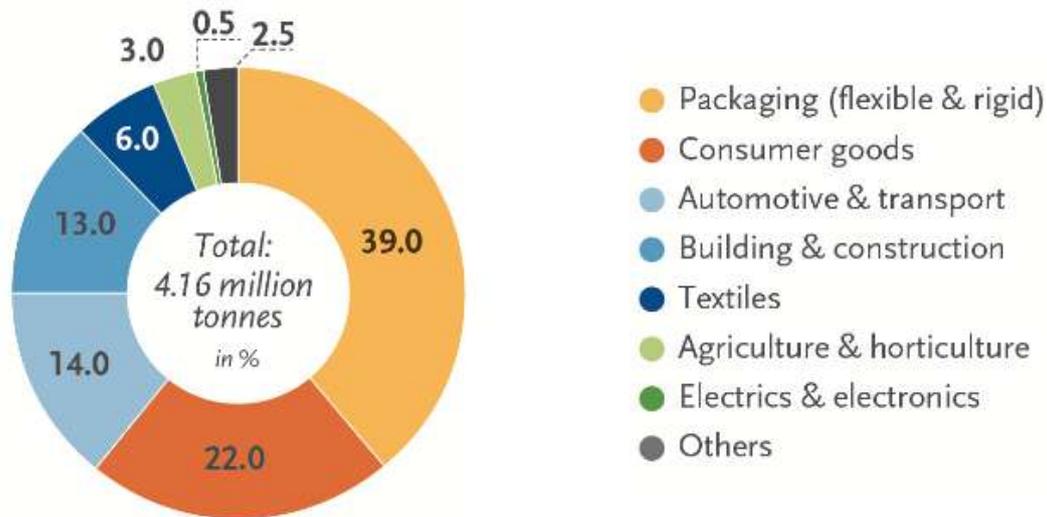


Figura 6. Produção global de bioplásticos dividida por região.

Fonte: European Bioplastics (2016b).

Os bioplásticos são utilizados em diversos mercados, variando desde embalagens até produtos eletrônicos, brinquedos e aplicações na indústria têxtil. O segmento de embalagens, no entanto, compõe a maior aplicação dos bioplásticos, com quase 40% do mercado em 2016. Além disso, há também registro de aumento da aplicação de biopolímeros em outros segmentos industriais como o setor automotivo e de transporte (cerca de 14%), no setor de construção civil (13%), assim como em outros setores que utilizam polímeros de performance técnica. Esses dados estão representados na figura 7 (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016a; GOURMELON *et al.*, 2015).

Global production capacities of bioplastics (by market segment)



Source: European Bioplastics, nova-Institute (2016).

More information: www.bio-based.eu/markets and www.european-bioplastics.org/market

Figura 7. Utilização de bioplásticos de acordo com o mercado.

Fonte: European Bioplastics (2016a).

Com o crescimento de materiais, produtos e aplicações, a quantidade de produtores, transformadores e usuários finais também tende a aumentar. Investimentos significativos têm sido feitos na produção e marketing de bioplásticos para guiar e acompanhar seu desenvolvimento. Além disso, aspectos e condições legais funcionam como incentivos para a utilização e produção de bioplásticos ao redor do mundo, estimulando o novo mercado (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016a; PHILP, 2014; PHILP *et al.*, 2013).

O aumento na utilização de bioplásticos em todos os segmentos de mercado é guiado pela crescente demanda por produtos sustentáveis, uma vez que a consciência sobre os impactos ambientais e a necessidade de se reduzir a dependência de recursos fósseis têm aumentado. Além disso, os contínuos avanços e inovações no setor dos bioplásticos quanto à produção de novos materiais com propriedades otimizadas e novas funcionalidades também contribuem para o avanço deste mercado (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2016b).

Portanto, tendo em vista a dependência histórica da sociedade atual em relação aos plásticos e a crescente participação dos bioplásticos no mercado, espera-se que o novo setor continue crescendo durante os próximos anos. Neste sentido, há diversos autores que apostam ainda além: apostam no sucesso do desenvolvimento de bioplásticos a ponto de que estes venham a substituir os plásticos convencionais (BROCKHAUS; PETERSEN; KERSTEN, 2015; ILES; MARTIN, 2013; PHILP, 2014).

2.3 PERSPECTIVA MULTINÍVEL

A Perspectiva Multinível (MLP) é uma abordagem desenvolvida por Geels (GEELS, 2002, 2004) para a melhor compreensão de transições tecnológicas (TT) em sistemas sócio-técnicos. Para isso, busca, na forma de teoria apreciativa, integrar descobertas de diferentes literaturas (NELSON; WINTER, 1982). Tais transições tecnológicas são definidas como grandes transformações no modo de funcionamento da sociedade, porém não se limitam a transformações tecnológicas puras. Podem também ser consideradas como TT, transformações tanto em termos de transporte, alimentação e comunicação como também mudanças em regulamentações, práticas dos usuários, redes industriais e infraestrutura (GEELS, 2002).

Geels (2004) reforça uma releitura dos sistemas de inovação amplamente discutidos (EDQUIST, 1997), dando maior ênfase aos elementos sociais ao sistema, como conhecimento, capital e até elementos culturais, inclusive a influência dos usuários sobre o processo de inovação. Desse modo, é considerada a coevolução da tecnologia e sociedade, constituindo um sistema sócio-técnico. Para entender as inovações e transformações do sistema sócio-técnico, a perspectiva multinível se baseia na análise da dinamicidade e de interações de 3 diferentes níveis do sistema: o micro-nível – ou nichos – o meso-nível, também chamado de regime e o macro-nível, denominado paisagem.

2.3.1 OS NÍVEIS SOCIOTÉCNICOS

O **regime sócio-técnico** é definido (GEELS, 2002, 2004; SMITH; STIRLING; BERKHOUT, 2005) como um conjunto de regras de relativa estabilidade obedecidas por diferentes grupos sociais. Este nível é caracterizado por um conjunto de dimensões como: tecnologia, práticas de usuários e mercados, estrutura industrial, infraestrutura e conhecimento político e técnico-científico. Tais regimes proveem a orientação e coordenação de grupos relevantes de atores (internos ou externos) do sistema sócio-técnico e funcionam como mecanismo de seleção e orientação de inovações, sendo considerado, portanto, de estrutura dinamicamente estável. No regime observa-se um consenso das tecnologias e regras (formais ou informais) dominantes no sistema.

A **paisagem sócio-técnica** (GEELS, 2002) é considerada um nível de ainda maior rigidez e resistência a mudanças que os regimes sócio-técnicos, porém ainda passível de mudança, mesmo que lenta e gradual. Nela estão situadas as trajetórias tecnológicas resultantes do acúmulo de conhecimento e tendências a longo prazo. A paisagem contém uma série de fatores como crescimento econômico, guerras, problemas ambientais e valores culturais e normativos, sendo, portanto, inerente a diferentes regimes e sistemas sócio-técnicos.

Os **nichos** são espaços de desenvolvimento tecnológico protegidos das regras de seleção e de mercado impostas pelo regime. Neles, há maior oportunidade de aprendizado tecnológico sem que a nova tecnologia necessariamente seja competitiva com as tecnologias já maduras presentes no regime. Além disso, os nichos também funcionam como espaços para a criação de redes sociais que venham a dar suporte às inovações que nele surgem. Em geral, após o amadurecimento das inovações desenvolvidas, estas entram em contato com o ambiente competitivo do regime e algumas são selecionadas e passam a fazer parte deste (GEELS, 2002, 2004).

Apesar de haver uma distinção considerável entre os níveis do sistema sócio-técnico, todos eles estão interligados e suscetíveis a sofrer influência uns dos outros. Por exemplo, a emergência de novas tecnologias a partir dos nichos pode vir a disputar espaço com as tecnologias já consolidadas do regime, ou mesmo emergir de forma colaborativa com o regime (GEELS; SCHOT, 2007). Os nichos também podem sofrer

influência do regime, como nos casos em que um ator do regime desenvolve uma nova tecnologia protegida das regras de seleção de mercado. Além dessas interações, vale ressaltar que a paisagem pode influenciar o regime e nichos a partir de pressões de seleção exercidas, assim como também pode sofrer mudanças devido a influência do regime e nichos. Assim, por meio da interação entre os diferentes níveis e também dos diferentes atores internos ou externos a cada um dos níveis, são formadas as transformações e transições no sistema sócio-técnico.

2.3.2 TRANSIÇÕES SÓCIO-TÉCNICAS

A perspectiva multinível enxerga a evolução tecnológica como um processo de variação, seleção e retenção de inovações no regime sócio-técnico, desencadeando um processo de transição do regime e promovendo a formação ou reformulação de caminhos e trajetórias tecnológicas (GEELS, 2002). Dessa forma, o sucesso de uma tecnologia em um nicho não depende somente da estruturação do nicho, mas também da interação deste com o regime e com a paisagem, que podem apoiar a inovação do nicho ou rejeitá-la.

Geels (2002) considera que o regime promove estabilidade no sistema por guiar atividades inovadoras na forma de melhorias incrementais por meio de trajetórias tecnológicas já existentes. Os nichos, por outro lado, são considerados focos de inovações protegidas durante seu desenvolvimento e que podem ameaçar a estrutura já consolidada do regime, em momentos de tensões e desalinhamento entre os níveis do sistema.

Tais tensões entre os níveis podem ser causadas por diversos fatores, dentre eles, mudanças no nível da paisagem que venham a gerar pressões sobre o regime, abrindo uma janela de oportunidade para inovações, mudanças e reestruturações no mesmo – como observado na figura 8. A partir da desestabilização do regime, inovações desenvolvidas nos nichos podem competir diretamente com a tecnologia já consolidada no regime na tentativa de emergir e, eventualmente, vir a substituí-la. Caso a emergência seja bem-sucedida, o regime se reestrutura e assume sua

estabilidade dinâmica novamente, podendo inclusive influenciar a paisagem e provocar alterações a longo prazo.

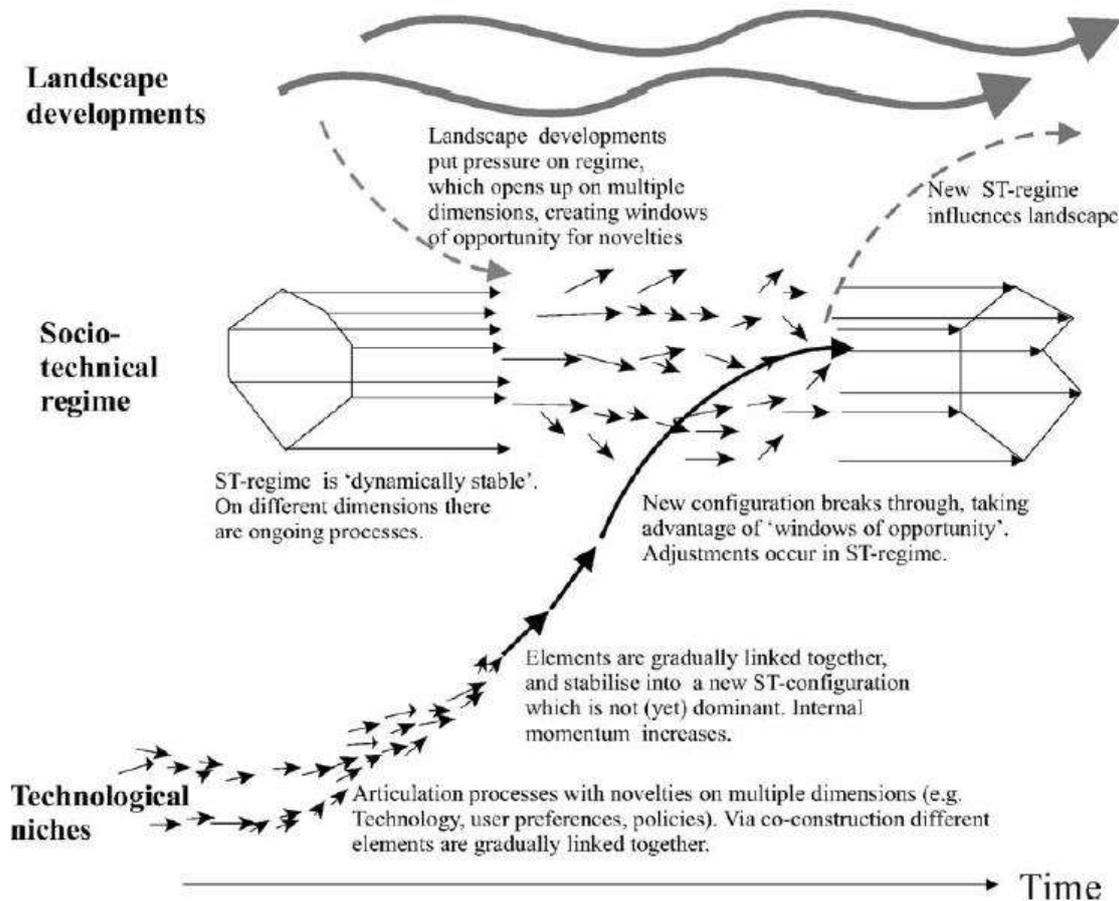


Figura 8. Dinâmica da perspectiva multinível.

Fonte: Geels (2004).

Contrapondo o modelo de transformação nicho-regime fortemente defendido por Geels (2002, 2004), Berkhout *et al* (2003) propõem outros possíveis contextos para a transformação de um regime sócio-técnico. Sob este ponto de vista, a transformação do sistema pode ocorrer de diversas formas, desde transformações *bottom-up* – mudanças do nicho para o regime – até transformações desencadeadas por outros sistemas sócio-técnicos. Neste sentido, dois fatores principais devem ser considerados: o nível de coordenação das respostas à pressão de seleção imposta sobre o regime e a fonte a localização dos recursos utilizados para responder às pressões de seleção – internos ou externos ao regime.

Para tanto, os autores criam uma tipologia baseada em 4 diferentes contextos de transição para evidenciar a multidimensionalidade de transformação do regime: renovação endógena, reorientação de trajetórias, transformação emergente e transformações intencionais. Tais contextos estão representados na figura 9.



Figura 9. Quatro contextos de transição e processos de transformação.

Fonte: Smith, Stirling e Berkhout (2003)

A renovação endógena é marcada pela transformação do regime guiada por atores incumbentes, de forma coordenada, como respostas às ameaças competitivas. Por ser coordenada pelo próprio regime, é caracterizada por inovações essencialmente incrementais para a proteção do mesmo. Já a reorientação de trajetórias é caracterizada por transformações desencadeadas por atores incumbentes de forma descoordenada, geralmente em resposta a pressões de reorientação originadas interna ou externamente ao regime. Assim, é marcada pela imprevisibilidade na alteração da trajetória tecnológica do regime.

A transformação emergente é caracterizada pela baixa coordenação de pressões transformadoras e repostas de atores externos ao regime incumbente. Então, tem caráter imprevisível e é marcada muitas vezes por inovações radicais. Por fim, a

transformação proposital é marcada pelo alto grau de coordenação das pressões de seleção e por respostas localizadas externamente ao regime. Esse tipo de transformação busca a mudança do regime a partir de esforços externos de forma a promover mudanças no regime que atendam a interesses específicos.

Além dos tipos de transformações indicadas por Berkhout *et al* (2003), Geels e Schot (2007) propõem também outras formas de transição do regime sócio-técnico, baseadas em duas dimensões principais: o *timing* e a natureza das interações entre os níveis. Dessa forma, combinações entre estas duas dimensões promovem diferentes resultados por diferentes caminhos de transição.

Apesar de a teoria multinível defendida por Geels em 2002 e 2004 inicialmente enfatizar os alinhamentos simultâneos das interações entre a paisagem e o regime, em 2007 os autores indicam que, na verdade, as interações podem ocorrer em tempos diferentes. Particularmente importante, por exemplo, é o *timing* entre a ocorrência de uma pressão de seleção da paisagem sobre o regime e o estado de desenvolvimento das inovações desenvolvidas nos nichos. Sob este ponto de vista, caso as inovações dos nichos ainda não estejam suficientemente desenvolvidas para emergir para o regime quando houver uma pressão da paisagem, a transição do regime ocorrerá de forma diferente de caso os nichos já estivessem bem desenvolvidos.

A segunda dimensão considerada é a natureza entre as interações multiníveis. Segundo Geels e Schot (2007), o desenvolvimento da paisagem pode assumir uma relação de consolidação do regime ou uma relação disruptiva do mesmo. A primeira baseia-se em efeitos de estabilização do regime incumbente, enquanto a segunda provoca pressões para mudança deste. Além disso, as inovações dos nichos também podem interagir de duas formas opostas com o regime: competindo com a tecnologia incumbente ou assumindo uma relação simbiótica com a mesma, resolvendo problemas e aprimorando a performance do regime incumbente.

Considerando diferentes combinações entre estas dimensões, os autores criaram uma tipologia baseada em 4 caminhos para a transição de um regime sócio-técnico. São eles: caminho de transformação, caminho de desalinhamento e realinhamento, caminho de reconfiguração e caminho de substituição tecnológica.

O caminho de transformação é representado pela figura 10. Este ocorre caso haja pressão moderada da paisagem sobre o regime, induzindo mudanças disruptivas, em um momento em que as inovações dos nichos ainda não estejam suficientemente desenvolvidas. Nesta situação, os atores do regime respondem à pressão da paisagem com a modificação da direção dos caminhos de desenvolvimento e as atividades de inovação dos nichos conforme seus interesses. Dessa forma, observa-se o desenvolvimento e a adoção das inovações dos nichos pelo regime, de forma simbiótica.

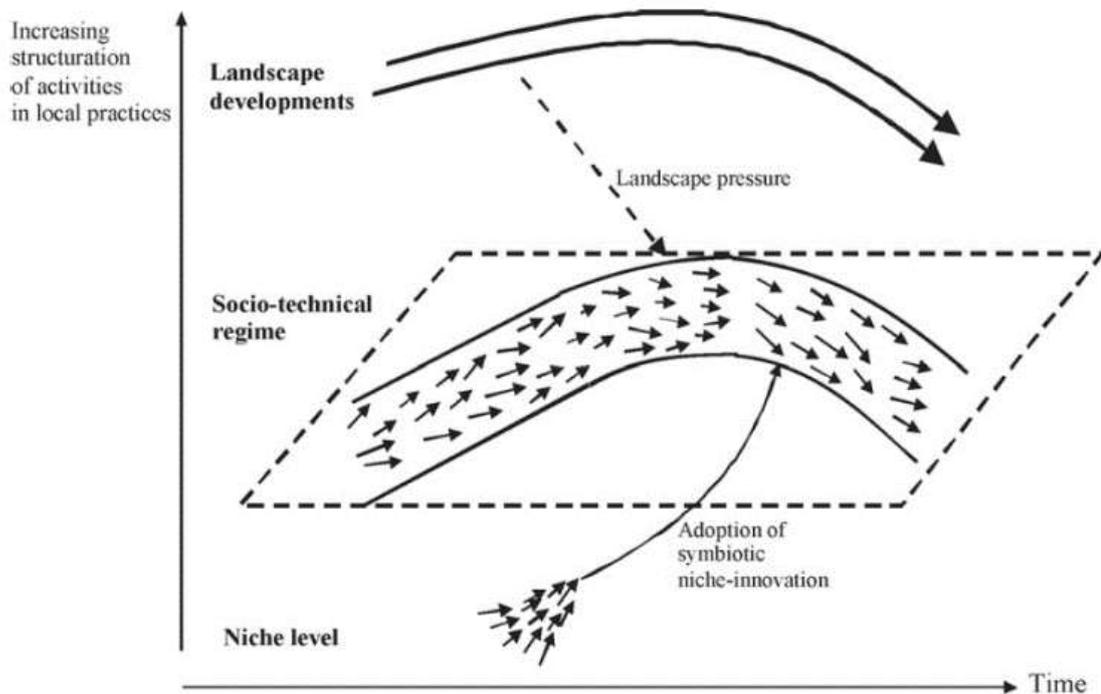


Figura 10. Caminho de transformação.

Fonte: Geels e Schot (2007).

No caminho de desalinhamento e realinhamento (figura 11), as pressões da paisagem geralmente são intensas e abruptas, levando à descrença no regime por parte dos próprios atores incumbentes, o que causa a desestabilização e desalinhamento do regime assim como abandono das tecnologias incumbentes do regime. Neste momento, caso não haja inovação dos nichos suficientemente desenvolvida para assumir o regime, há emergência de múltiplas inovações que competirão entre si até que alguma se torne dominante e estabilize novamente o regime. No regime, há

colapso dos atores incumbentes devido às fortes pressões da paisagem, abrindo janelas de oportunidades para a entrada de novos atores.

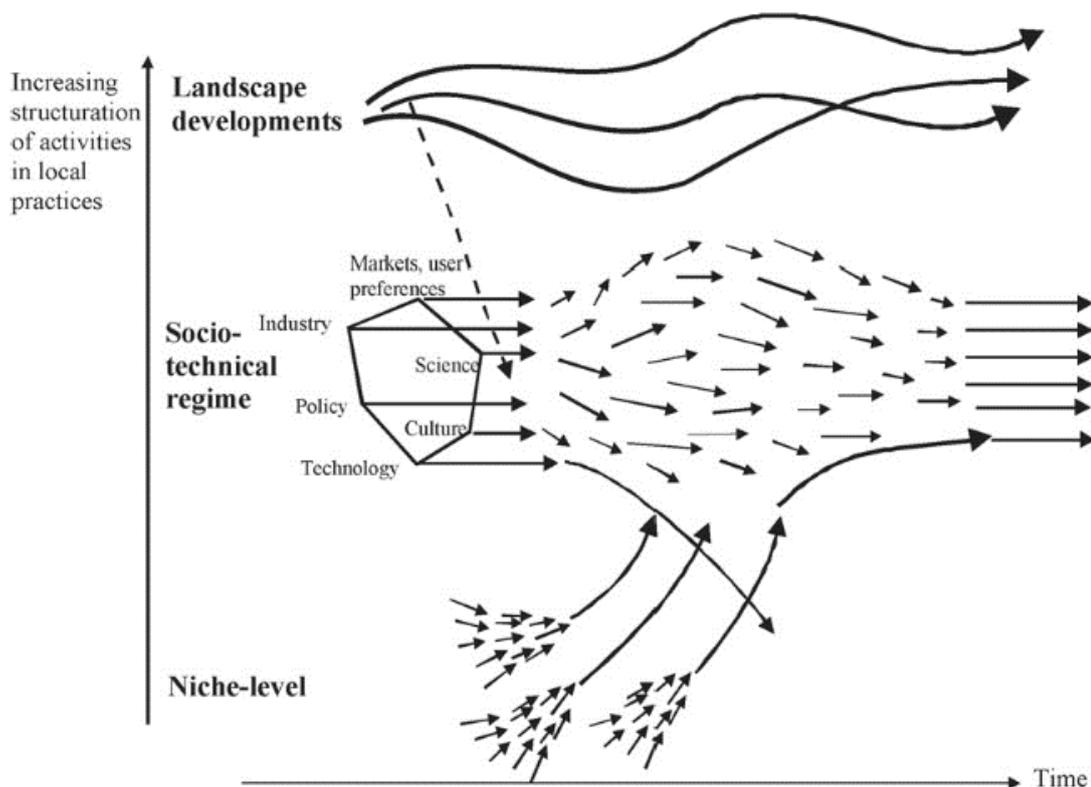


Figura 11. Caminho de desalinhamento e realinhamento.

Fonte: Geels e Schot (2007).

O caminho de substituição tecnológica ocorre quando há forte pressão de desestabilização do regime – como por exemplo guerras, colapso econômico ou crises sociais – em um momento em que há inovações no nicho suficientemente desenvolvidas para assumir o regime (GEELS *et al.*, 2016; GEELS; SCHOT, 2007). Neste caso, a janela de oportunidade criada pela paisagem permite a competição entre a inovação dominante dos nichos e a tecnologia incumbente do regime, até que haja a substituição desta por aquela desenvolvida nos nichos. Assim, observa-se competição entre os atores incumbentes e atores novos entrantes no SST a partir da janela de oportunidade criada pela desestabilização do regime. O caminho de substituição tecnológica está esquematizado na figura 12.

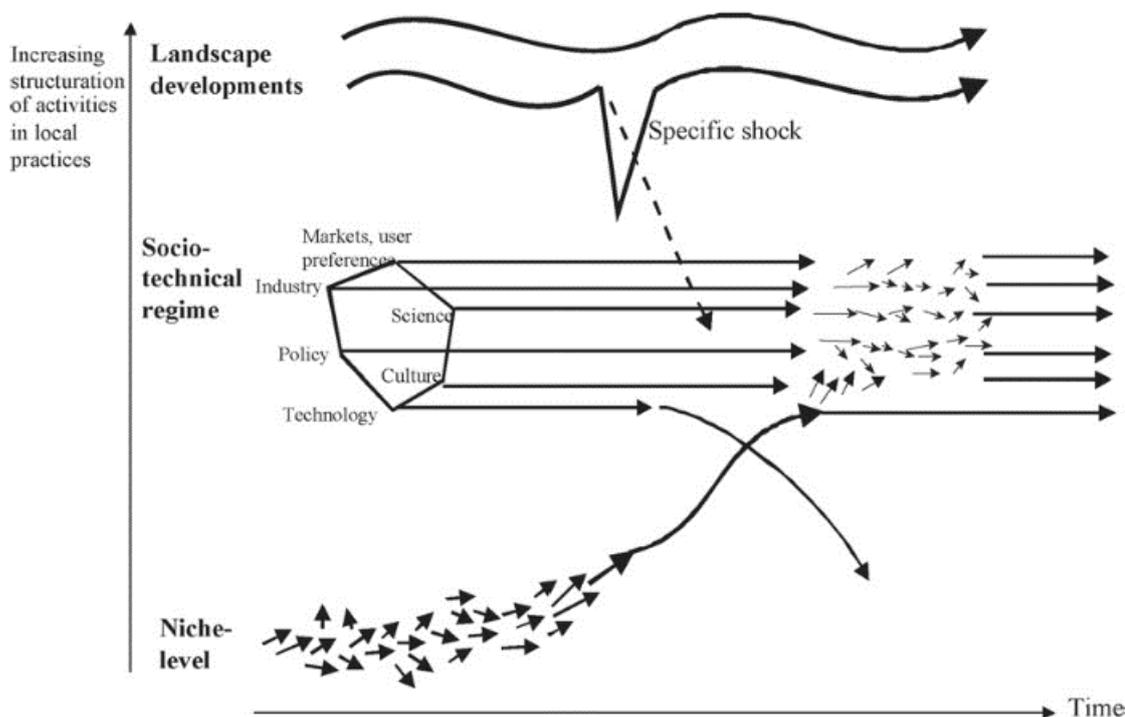


Figura 12. Caminho de substituição tecnológica.

Fonte: Geels e Schot (2007).

Finalmente, o caminho de reconfiguração ocorre após a incidência de pressões de seleção moderadas provenientes da paisagem sobre o regime. Assim, inovações desenvolvidas nos nichos são absorvidas pelo regime de forma simbiótica, geralmente para a resolução de problemas no regime incumbente. Nesse sentido, observa-se a associação entre atores e tecnologias do nicho e do regime, e formação de novas alianças entre atores incumbentes e novos entrantes. A partir de uma série de adoções de inovações do nicho e de pressões da paisagem, são desencadeadas transformações na estrutura regime, conforme ilustrado na figura 13.

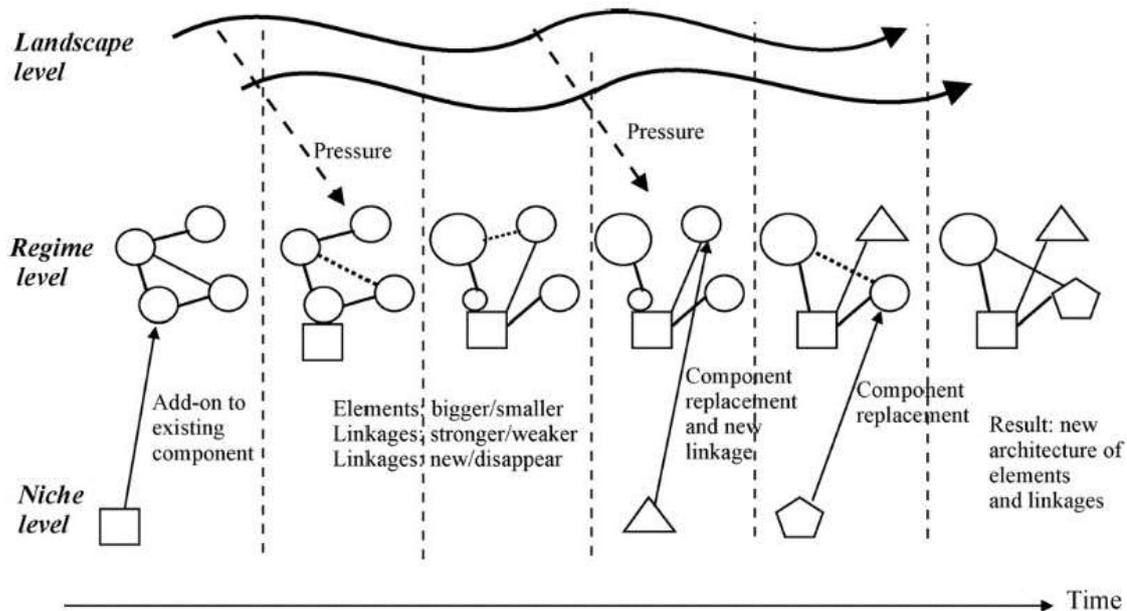


Figura 13. Caminho de reconfiguração.

Fonte: Geels e Schot (2007).

Apesar das características necessárias para que cada um dos caminhos de transição acima representados ocorra, Geels e Schot (2007) também consideram a possibilidade de mudança entre eles durante o processo de transição de um regime. Por exemplo, em casos em que a pressão de transformação do regime é intensa e gradual, de acordo com os autores, é provável que haja uma sequência de caminhos de transição começando por transformação, passando por reconfiguração e possivelmente sendo seguido de substituição ou desalinhamento e realinhamento.

Já em 2016, Geels *et al* (2016) consideram que a tipologia apresentada por Geels e Schot (GEELS; SCHOT, 2007) é limitada quanto a alguns aspectos importantes para análise da transição. Neste estudo mais recente, os autores afirmam que a influência da paisagem sobre o regime não depende somente do *timing* em que ocorrem as interações entre níveis, mas também da interpretação e mobilização dos atores do regime incumbente quanto às pressões existentes. Dessa forma, o que faz com que inovações dos nichos sejam disruptivas ou simbióticas não são apenas as suas características técnicas, mas também a forma com que essas inovações são configuradas e absorvidas institucionalmente.

Além disso, os autores desenvolvem um entendimento alternativo para as mudanças entre caminhos de transição. Até então, tais mudanças sugeridas dependiam das pressões exercidas pela paisagem sobre os demais níveis (GEELS; SCHOT, 2007). No entanto, a reformulação proposta em 2016 sugere que a interação entre atores do regime, assim como mudanças nas instituições e regras do regime podem ter um maior impacto sobre os caminhos de transição do que as próprias pressões de seleção exercidas pela paisagem, evidenciando a importância das movimentações dos atores para a ocorrência da transição. Vale ressaltar também, que ainda segundo o mesmo autor, os processos de transição são geralmente processos que ocorrem no longo prazo (TURNHEIM *et al.*, 2015).

Dessa forma, a partir do desenvolvimento e cenário atual da indústria de plásticos, do desenvolvimento de bioplásticos e dos conceitos associados à transição sócio-técnica abordados neste capítulo, serão analisados 3 casos específicos do desenvolvimento dos bioplásticos, são eles: PLA, bio-PET e PEF. No capítulo seguinte será abordada a metodologia utilizada para tal análise.

Capítulo 3

3 METODOLOGIA

Este capítulo discorre sobre a metodologia adotada no presente trabalho. Aqui, são definidos a forma de elaboração da pesquisa e o modelo de análise utilizados. Define-se também os critérios selecionados para cada uma das escolhas apresentadas. Além disso, também é evidenciada a forma de coleta de informações e exemplificadas as fontes de dados utilizadas.

3.1 ESTUDOS DE CASO

Com o intuito de abordar o tema de forma mais abrangente e variada, o presente trabalho divide o objeto de análise em 3 estudos de caso particulares. São eles: o desenvolvimento do PLA, do bio-PET e do PEF. Para a seleção destes casos, foram consideradas diferenças quanto às suas naturezas e aplicações como bioplásticos. Outro fator que contribuiu para a seleção destes foi a quantidade de informação e material disponíveis acerca do tema.

Os estudos de caso foram construídos com base nas iniciativas de atores envolvidos no desenvolvimento de cada um dos bioplásticos. Por iniciativas, entende-se: esforços na direção de desenvolvimento de novas tecnologias; aplicação de investimentos no desenvolvimento do bioplásticos; e formação de parcerias em prol do avanço no desenvolvimento dos biopolímeros estudados.

Além disso, para evitar limitações de análise, o horizonte de desenvolvimento dos bioplásticos estudados não se restringe a países ou regiões específicas, mas considera movimentos para o desenvolvimento de cada um deles em todo o mundo. Nesse sentido, o horizonte temporal delimitado neste trabalho é diferente para os casos estudados, porém engloba desde o surgimento de cada bioplástico até os dias

atuais, de modo que se possa identificar e analisar as mudanças ao longo do desenvolvimento de cada bioplástico.

3.2 COLETA DE DADOS

Como metodologia de coleta de dados, definiu-se a utilização de fontes distintas de informação. Dentre elas, destacam-se livros, revistas online, artigos acadêmicos e relatórios empresariais e institucionais. A seleção de iniciativas a serem estudadas foi pautada na importância e impacto das mesmas para o desenvolvimento de cada bioplástico durante seu horizonte de desenvolvimento, de acordo com o autor e com as informações coletadas.

Inicialmente, buscou-se em artigos científicos informações acerca da caracterização, tecnologias de produção de cada um dos bioplásticos estudados. A partir dessa base teórica, buscou-se informações sobre os atores, parcerias e iniciativas tanto em artigos acadêmicos como em relatórios das empresas envolvidas, relatórios de instituições de apoio ao plástico e bioplástico – como ABIPLAST e *European Bioplastics*, e em revistas online – como *Biofuels Digest*, *Bioplastics Magazine*, e *Green Chemistry Blog*.

3.3 DIMENSÕES DE ANÁLISE

Para a análise dos estudos de caso, o presente trabalho se baseia na literatura de transição sócio-técnica por meio da perspectiva multinível como instrumento de análise. Por se tratar de um fenômeno complexo – englobando esferas social, tecnológica e econômica – a metodologia aplicada não é reduzida a procedimentos metodológicos rígidos, com apenas perspectivas quantitativas de análise, mas é intensamente pautada em aspectos qualitativos e subjetivos, utilizando-se elementos interpretativos.

Dentre as diversas formas possíveis para se analisar o histórico de desenvolvimento de cada um desses biopolímeros, elegeu-se como metodologia a análise por meio de iniciativas ao longo do desenvolvimento de cada bioplástico.

Para a análise dos casos estudados, foram selecionadas 6 dimensões presentes em cada um dos casos estudados: a caracterização da (1) paisagem, (2) do nicho e do

(3) regime; (4) atores envolvidos no desenvolvimento de cada bioplástico; (5) tecnologias utilizadas no SST dos plásticos; e (6) a natureza do bioplástico estudado. Esse conjunto de dimensões de análise foi considerado por possibilitar a interpretação das interações entre os níveis do SST, dos interesses dos atores envolvidos e do grau de maturidade tecnológica envolvida em cada um dos casos estudados. Dessa forma, a partir dessas dimensões, é possível a comparação entre os casos estudados e os possíveis caminhos de transição descritos por Geels e Schot (2007) e Geel *et al* (2016).

Para isso, delimitou-se o regime, a paisagem e o nicho com base na definição de cada um dos níveis por Geels (2004) aplicada ao SST dos plásticos. Considerou-se para essa delimitação, a estrutura da cadeia de produção e consumo de plásticos, os atores envolvidos nesta cadeia, o tipo de produtos e tecnologia incumbentes e em desenvolvimento, e as pressões exercidas pela paisagem sob a forma de regulamentações, políticas internas e internacionais e tendências sociais.

Como variáveis da natureza dos bioplásticos, analisou-se as características inerentes a cada bioplástico, dentre elas: a matéria-prima utilizada; a natureza *drop-in* ou não *drop-in*; e propriedades e aplicações. Quanto aos atores, considerou-se: a localização dos atores no SST (nicho, regime ou outro SST); seus tamanhos, função na cadeia de produção e utilização de plásticos (ex. produtores, transformadores e *end users*); e aceitação ou não da inovação. Finalmente, como variáveis das tecnologias, considerou-se: a base de conhecimento; grau de maturidade e escala; quantidade de tecnologias disponíveis; e a relação entre novas tecnologias e as incumbentes (ex. complementariedade). Tais variáveis foram escolhidas de forma a permitir a identificação da localização dos recursos utilizados como resposta às pressões de seleção, das formas de interação entre os níveis do SST, dos atores envolvidos e das diferenças associadas às diferentes naturezas dos bioplásticos.

No que tange ao nível e unidade de análise da abordagem sócio-técnica empregados neste estudo, é considerada uma lógica de análise local, ou seja, analisa-se o desenvolvimento dos bioplásticos a partir das principais iniciativas desenvolvidas e movimentações de atores do SST em cada estudo de caso, sob as dimensões de análise definidas.

Em seguida, baseado na literatura a respeito dos diferentes caminhos para transição sócio-técnica discutida na seção 2.3.2 (GEELS *et al.*, 2016; GEELS; SCHOT, 2007) e resumida na tabela 1, criou-se um quadro analítico englobando as 6 dimensões aqui selecionadas aplicadas a cada bioplástico.

A tabela 1 apresentada a seguir tem o intuito de caracterizar cada um dos caminhos de transição com base em 5 das 6 dimensões selecionadas. Conforme pode ser evidenciado pela tabela, as variáveis das dimensões selecionadas permitem a identificação de características inerentes a cada um dos caminhos de transição e também a comparação entre eles. Por exemplo, o grau de maturidade da tecnologia presente nos nichos é uma das variáveis determinantes dos caminhos de transição, uma vez que tecnologias suficientemente desenvolvidas nos nichos podem indicar o caminho de substituição, enquanto tecnologias insuficientemente desenvolvidas podem indicar os caminhos de transformação, reconfiguração ou desalinhamento e realinhamento.

A análise da natureza de cada bioplástico, apesar de não estar disposta na tabela 1, foi utilizada para a identificação de possíveis padrões de transição associados a essa dimensão e para a comparação entre os casos estudados. Assim, a partir da comparação entre o quadro analítico criado e a tabela 1, buscou-se a identificação de padrões que se estendem no longo prazo para a análise de possíveis caminhos de transição.

Tabela 1.Caracterização dos caminhos de transição.

Caminhos de transição	Paisagem	Nicho	Regime	Atores	Tecnologias
Transformação	Exerce pressões moderadas sobre o regime.	Inovações insuficientemente desenvolvidas para substituir as tecnologias do regime.	Atores do regime respondem às pressões da paisagem, direcionando a transição.	Atores incumbentes reorientam o regime a partir das inovações desenvolvidas no nicho;	Tecnologias desenvolvidas no nicho melhoram as do regime; incorporação simbiótica das tecnologias do nicho pelo regime; ou reorientação do regime de acordo com a nova tecnologia proveniente do nicho.
Desalinhamento e Realinhamento	Exerce pressões intensas e abruptas sobre o regime.	Inovações insuficientemente desenvolvidas competem entre si para se estabelecer no regime.	Descrença no regime por parte dos atores incumbentes após pressões intensas da paisagem.	Colapso dos atores incumbentes devido a pressões da paisagem; criação de oportunidades para novos entrantes.	Abandono da tecnologia "antiga" do regime; oportunidade para tecnologias do nicho competirem entre si e assumirem o regime.
Substituição Tecnológica	Fortes pressões de desestabilização do regime.	Inovações suficientemente desenvolvidas para substituir as tecnologias do regime.	É desestabilizado pela paisagem; tecnologias incumbentes no regime competem com as inovações do nicho.	Competição entre atores incumbentes e novos atores no SST.	Novas tecnologias substituem as incumbentes no regime.
Reconfiguração	Pressões moderadas da paisagem desencadeiam novas associações entre atores e tecnologias do regime e do nicho.	Inovações em desenvolvimento no nicho são adotadas pelo regime para resolução de problemas deste.	O regime sofre mudanças cumulativas após adoções de tecnologias provenientes do nicho; sofre transformações estruturais.	Novas alianças entre atores incumbentes e novos entrantes.	Desenvolvimento de combinações entre as novas tecnologias do nicho e as incumbentes no regime; cascatas de inovações podem alterar a estrutura do regime.

Fonte: GEELS *et al* (2016); GEELS; SCHOT (2007).

Capítulo 4

4 ESTUDOS DE CASO

O presente capítulo apresenta os estudos de caso realizados para os três bioplásticos em foco neste trabalho: PLA, bio-PET e PEF. Nos estudos de caso são apresentados diversos aspectos sobre cada um dos bioplásticos como suas características e aplicações, processos de síntese, produção, processamento e reciclagem. Além disso, são apresentados os históricos de desenvolvimento de cada um dos bioplásticos. Dessa forma, a partir dos estudos aqui descritos, baseia-se a discussão a cerca da transição do SST dos plásticos.

De forma geral, como contribuições em comum para o início do desenvolvimento dos três bioplásticos aqui abordados, deve-se considerar algumas tendências e iniciativas da sociedade e de agentes reguladores em prol de formas mais sustentáveis de produção e utilização de plásticos, como mencionado no capítulo 2. Dentre elas, destacam-se: a preocupação com o volume de plásticos descartados no meio ambiente sem a correta destinação final; o sentimento anti-plástico instigado por organizações ativistas ambientais; e a emissão de GEE oriunda da produção dos polímeros.

Conforme descrito na seção 2.1, desde a década de 60, o consumo intensivo e caráter descartável de grande parcela dos plásticos já causava preocupações quanto ao seu impacto no meio ambiente. Tais fatores foram iniciadores para a criação de leis nos Estados Unidos referentes ao descarte e reciclagem dos plásticos, como o estabelecimento de coleta seletiva em diversos municípios e a obrigatoriedade de desenvolvimento de sistema de reciclagem para os plásticos descartados (ERICKSON, 2006). Tais iniciativas não se limitam aos Estados Unidos, mas também são aplicadas ao redor do mundo.

Apesar dessas iniciativas, somente uma parcela (cerca de 14%) dos plásticos utilizados são efetivamente reciclados no mundo e grande parte da parcela não reciclada acaba nos oceanos, causando problemas para a flora e fauna marinhas (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2016). A partir disso, outras iniciativas para a redução dos impactos ambientais gerados são desenvolvidas, como a tentativa de implementação de práticas em prol do estabelecimento do sistema de economia circular.

De forma geral, ainda que iniciativas para amenizar os impactos ambientais sejam tomadas, os mesmos continuam a ocorrer. Tais impactos, que têm recebido maior atenção desde a década de 70, também despertaram iniciativas de Organizações Não Governamentais (ONGs) ativistas em defesa do meio ambiente, como o GreenPeace. Dentre as ações desta ONG, destaca-se a campanha anti-plástico “*No Plastic*” – que reúne apoio popular para pressionar governos europeus a adotarem regulamentações mais rígidas quanto à utilização e descarte de plástico (GREENPEACE, 2017).

Além destas, diversas regulamentações foram criadas ao longo do tempo para o controle de mudanças climáticas e redução de emissões de GEE, totalizando cerca de 487 políticas e legislações somente nos 66 países estudados em Nachmany *et al.* (2014). Por exemplo, estão entre elas, o *Clean Air Act* para controle de emissões nos Estados Unidos (criado na década de 60 e emendado nas décadas de 70 e 90), o Protocolo de Kyoto (no final dos anos 90) e o *Climate Change Act* para redução de GEE no Reino Unido (NACHMANY *et al.*, 2014).

Dessa forma, haja vista as pressões para redução de impactos ambientais, a produção e utilização dos bioplásticos apresentam-se como uma das possíveis respostas às tendências regulamentadoras impostas. Inclusive, observam-se esforços de agentes reguladores para acelerar a implementação destes produtos no mercado, como possível solução para os problemas enfrentados pelos plásticos. Dentre os esforços, destacam-se em 2015 e 2016 decretos franceses obrigando a utilização de sacolas plásticas *biobased* para uso único e para embalagem de frutas e vegetais, em substituição às embalagens de plásticos convencionais (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2015a, 2016c). Além disso, vale ressaltar também o programa americano *BiopREFERRED*, que estabelece a obrigatoriedade de compra de produtos *biobased* por agentes federais, em prol da aceleração destes produtos no mercado (USDA, 2017).

Considerando essas pressões exercidas pela paisagem sobre o regime do SST dos plásticos, o presente trabalho analisa o desenvolvimento de três bioplásticos - PLA, bio-PET e PEF – em resposta às pressões sociais e reguladas impostas, como tentativas de solucionar os problemas associados à produção e utilização de plásticos convencionais. Para isso, este estudo de caso está dividido em 3 seções, de acordo com cada um dos bioplásticos em foco.

4.1 PLA

4.1.2 INTRODUÇÃO AO PLA

O polímero poli(ácido láctico) (PLA) é um poliéster biodegradável e de base biológica produzido a partir de fontes renováveis de açúcar vegetal como milho, cana-de-açúcar e beterraba (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016; FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016). Apesar de seu desenvolvimento datar da década de 1930, recentemente o biopolímero tem recebido muita atenção por se tratar de uma alternativa sustentável aos plásticos convencionais (LUNT, 1998). O PLA tem mostrado potencial para a substituição de polímeros de origem fóssil em diversas aplicações, como também tem se destacado por suas aplicações no campo da medicina (FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016).

O PLA é um polímero termoplástico, com propriedades mecânicas, ópticas e térmicas comparáveis com polímeros convencionais como PP, PE e PET (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016). Suas propriedades são altamente dependentes de sua massa molar, podendo ser produzido em variações de baixa, média e alta massa molar (FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016). No entanto, dentre todos esses, o PLA de alta massa molar é o que apresenta maior valor comercial.

Atualmente o maior produtor de PLA é a *joint venture* (JV) NatureWorks LLC entre a Cargill e a PTT Chemical, com instalação de capacidade de produção de 150.000 ton/ano do polímero, localizada nos Estados Unidos. Além disso, o PLA tem sido alvo de grande interesse científico nas últimas décadas.

No entanto, o PLA ainda enfrenta alguns desafios que retardam seu crescimento no mercado de plásticos. Dentre eles está a preocupação em competitividade de custo do biopolímero (MADHAVAN NAMPOOTHIRI; NAIR; JOHN, 2010). Apesar de ser competitivo em algumas aplicações como em substituição do poliestireno expandido, o PLA ainda não consegue ser competitivo em custo com polímeros *commodities* como PP e PET (DIGEST, 2015). Dessa forma, acredita-se que avanços nos processos biotecnológicos de produção de ácido láctico a partir de matérias-primas mais baratas auxiliem na redução de custo de produção (MADHAVAN NAMPOOTHIRI; NAIR; JOHN, 2010).

Além disso, outro desafio consiste em algumas propriedades do PLA. Dentre elas estão sua susceptibilidade à degradação térmica e hidrolítica, propriedade de barreira de umidade inferiores a polímeros convencionais e sua fragilidade mecânica em algumas aplicações (MADHAVAN NAMPOOTHIRI; NAIR; JOHN, 2010). Essas propriedades indesejáveis, para aplicações na maior fatia de mercado dos plásticos, dificultam a aplicação do PLA em produtos plásticos de maior escala de produção como embalagens de bebidas e até de produtos industrializados, como biscoitos, devido à baixa barreira à umidade do bioplástico e fragilidade mecânica. Assim, tem-se observado que o biopolímero ainda está restrito a pequenos mercados, como de embalagens de produtos frescos e aplicações médico-cirúrgicas (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016).

No entanto, blendas de PLA com outros materiais, a formação de copolímeros e utilização de nanocompostos têm sido desenvolvidos devido ao potencial de resolver alguns dos desafios enfrentados pelo biopolímero em sua inserção no mercado e prometem aumentar o crescimento do PLA (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016; DIGEST, 2015; MADHAVAN NAMPOOTHIRI; NAIR; JOHN, 2010).

4.1.3 SÍNTESE DE PLA

O PLA é produzido a partir da reação de polimerização do ácido 2-hidróxiopropanóico, também conhecido como ácido láctico. Como ilustrado na figura 14, o ácido possui dois estéreos isômeros L-ácido láctico e D-ácido láctico e ambos, a partir de suas

transformações em L-lactídeo, D-lactídeo e meso lactídeos, podem originar as diferentes formas de PLA: PLLA, PDLA e PDLLA(CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016). As três formas apresentadas diferem principalmente quanto à cristalinidade do material final. As formas PLLA e PDLA, formadas a partir de monômeros L-lactídeo e D-lactídeo puros, respectivamente, são espécies cristalinas. Por outro lado, a espécie PDLLA, formada a partir da mistura racêmica dos isômeros, é classificada como amorfa (SAVIOLI LOPES; JARDINI; MACIEL FILHO, 2012).

O ácido láctico pode ser produzido a partir de dois métodos principais: fermentação bacteriana de carboidratos ou síntese química. No entanto, para a produção em larga escala, a rota fermentativa é a mais utilizada, uma vez que a rota química possui limitações de capacidade produtiva, alto custo de operação e inabilidade de produção seletiva do isômero L-ácido láctico puro, forma mais comum do ácido láctico em sistemas biológicos e, portanto, com melhor biocompatibilidade com organismo humano.(CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016; SAVIOLI LOPES; JARDINI; MACIEL FILHO, 2012).

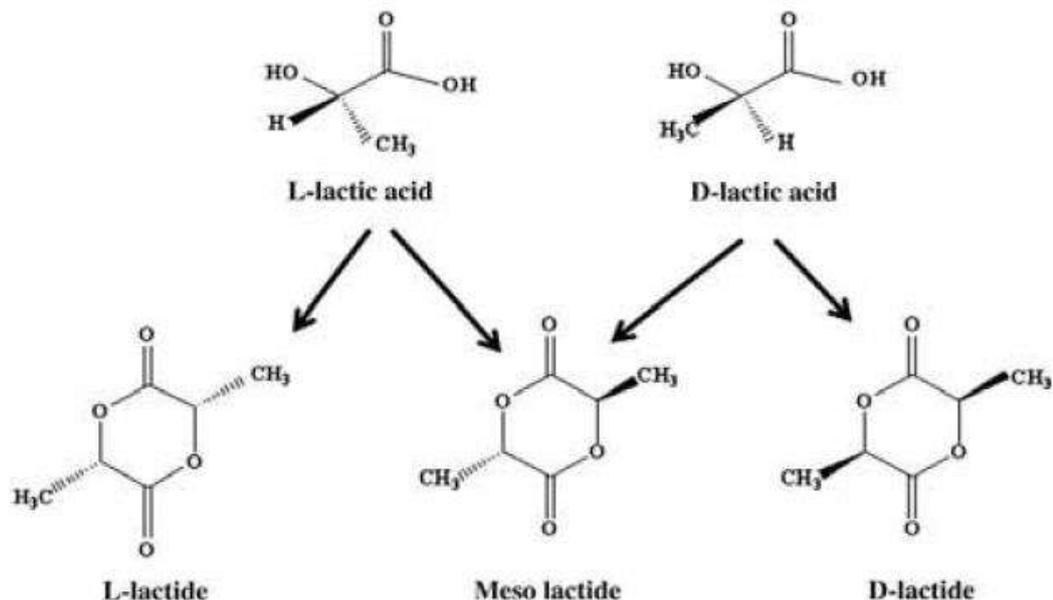


Figura 14. Possíveis espécies de ácido láctico e lactídeos formadores de PLA.

Fonte: Savioli Lopes; Jardim; Maciel Filho (2012).

A fermentação bacteriana pode ser realizada por dois diferentes métodos: o homofermentativo e o heterofermentativo, dependendo do tipo de bactéria utilizado. No método homofermentativo, por exemplo, são utilizadas espécies de lactobacilos em faixas de pH e temperatura diferentes do caso de heterofermentação. Além disso, quanto à aplicação de cada método, a principal diferença entre eles está na produção de sub-produtos. O método homofermentativo é característico por produzir menor quantidade de subprodutos e possuir maior rendimento, sendo portanto o método mais utilizado a nível industrial (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016; WEE; KIM; RYU, 2006).

O PLA de alta massa molar pode ser produzido por 3 principais métodos: (1) polimerização por condensação direta; (2) policondensação direta em solução azeotrópica; e (3) polimerização por formação de lactídeos (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016; JAMSHIDIAN *et al.*, 2010). A figura 15 é um esquema ilustrativo com os possíveis métodos de produção de PLA.

A polimerização por condensação direta engloba três processos principais: remoção de água, policondensação do oligômero e policondensação do PLA de alta massa molar. Este é considerado o método mais barato de produção de PLA, entretanto exige a necessidade de utilização de agentes conectores de cadeia para a obtenção do PLA livre de solvente (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016).

A policondensação direta em mistura azeotrópica, por outro lado, não precisa destes agentes auxiliares. Neste caso, o PLA é produzido por condensação direta à medida que a umidade é removida da mistura por condensação em destilação azeotrópica (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016).

Por último, a polimerização por formação de lactídeos é a mais utilizada industrialmente. Inicialmente, o ácido láctico é condensado para que seja formado PLA de baixa massa molar. O pré-polímero, então, passa por reação de despolimerização, dando formação ao lactídeo, que é purificado por destilação. Após a purificação do lactídeo, o PLA de massa molar desejada é formado por reação de abertura de anel do lactídeo, seguida de polimerização na presença de catalisadores (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016).

Um dos grandes desafios tecnológicos do PLA, que também contribuiu para que sua difusão no mercado fosse mais difícil, foi a geração de grandes quantidades de gesso como subproduto inerte. A geração desse passivo ambiental torna o método produtivo menos sustentável, devido à alta geração de resíduo. Entretanto, atualmente os dois maiores atores envolvidos na produção de PLA já possuem tecnologias com geração de baixas quantidades (NatureWorks LLC) ou nenhum gesso (Total-Corbion) (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016).

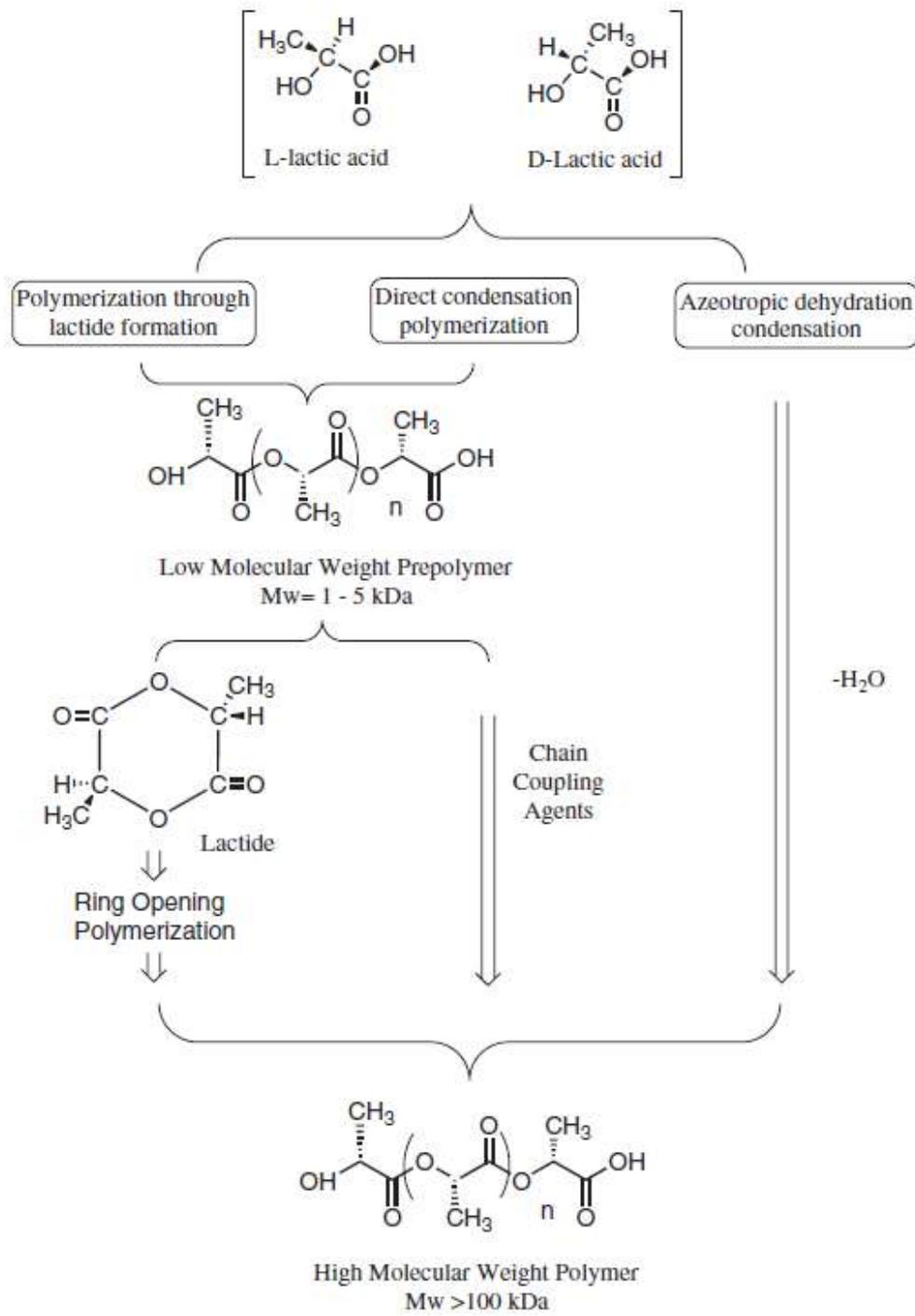


Figura 15. Esquema ilustrativo dos métodos de produção de PLA de alta massa molar.

Fonte: Castro-Aguirre *et al.* (2016).

4.1.4 PROCESSAMENTO E RECICLAGEM DE PLA

De forma geral, os métodos de processamento de biopolímeros são os mesmos já bem conhecidos e estabelecidos para o processamento de polímeros convencionais, em que as resinas poliméricas são convertidas a produtos finais. Entretanto, os métodos de aplicação de controle de processos devem mudar de acordo com as características e propriedades do polímero a ser processado, assim como diferentes aditivos devem ser utilizados de acordo com as características finais desejadas (JAMSHIDIAN *et al.*, 2010).

Os métodos mais utilizados baseiam-se em processamento por derretimento. Este processo é caracterizado pela exposição do material a altas temperaturas, superiores à temperatura de fusão. Uma vez fundido, o polímero é moldado de acordo com o formato final desejado e, posteriormente, é resfriado para estabilização da forma (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016).

Os fatores limitantes para as condições de processamento geralmente são os limites superiores de temperatura e de cisalhamento e a baixa homogeneidade do produto final quando processado próximo aos limites inferiores das mesmas condições. Entretanto, a diferença entre biopolímeros como o PLA e polímeros convencionais é que a faixa destas condições para alguns biopolímeros é mais estreita, exigindo maior rigor no controle do processo (JAMSHIDIAN *et al.*, 2010). Por essa razão, unidades de processamento de polímeros convencionais geralmente precisam passar por adaptações caso queiram processar biopolímeros não *drop-in* como o PLA (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2016).

Assim como para os polímeros convencionais, as principais formas de processamento de PLA são: (1) extrusão; (2) moldagem por injeção; (3) moldagem por sopro; (4) extrusão de filmes; e (5) termoformagem (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016; JAMSHIDIAN *et al.*, 2010).

O PLA é termicamente instável e apresenta rápida perda de massa molecular ao passar por tratamento térmico a altas temperaturas. Ao sofrer tratamento térmico, as ligações entre os ésteres do PLA tendem a degradar a temperaturas ainda abaixo da temperatura de fusão do polímero e degradam mais rapidamente a temperaturas

superiores ao ponto de fusão (JAMSHIDIAN *et al.*, 2010). Portanto o perfil de temperatura durante a extrusão ou qualquer outro processo de transformação do PLA deve ser rigorosamente controlada (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016).

No que tange à reciclagem do PLA, há técnicas por reciclagem química e mecânica para o bioplástico. No entanto, devido à falta de infraestrutura para a coleta e logística de PLA usado, torna-se difícil a reciclagem do mesmo. Além disso, os custos envolvidos nos métodos de reciclagem do biopolímero até o momento também não favorecem o desenvolvimento da infraestrutura necessária (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016).

4.1.5 PROPRIEDADES DO PLA

De forma geral, o PLA tem propriedades diferenciais como boa aparência, alta resistência mecânica e baixa toxicidade, além de propriedades de barreira, o que expandiram seu potencial de aplicação (JAMSHIDIAN *et al.*, 2010). As propriedades do PLA dependem dos isômeros que o compõem, da temperatura de processamento, do tempo de recozimento e da massa molar do polímero. A estereoquímica e o histórico de tratamento térmico também influenciam nas propriedades finais do polímero, uma vez que estão diretamente relacionadas com a cristalinidade do mesmo. A cristalinidade, por sua vez, possui grande influência em propriedades como rigidez, tensão, opacidade e pontos de fusão (FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016).

O PLA pode assumir diferentes graus de cristalinidade, podendo ser semicristalino ou amorfo. Polímeros semicristalinos têm, em sua estrutura, unidades de repetição regulares que permitem a formação de regiões de maior densidade. Estas regiões de maior cristalinidade proveem maior resistência mecânica e rigidez ao polímero, em comparação com as regiões amorfas (FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016). Portanto, algumas das propriedades poliméricas podem ser controladas de acordo com o controle da cristalinidade do polímero. No caso do PLA, por exemplo, a temperatura de fusão e a temperatura vítrea são maiores quanto maior a cristalinidade do polímero.

As propriedades de barreira, intrínsecas ao PLA são um dos fatores mais importantes que possibilitam sua aplicação em embalagem de alimentos frescos. As propriedades de barreira são baseadas na permeabilidade e performance contra a transferência de gases, umidade e moléculas de aromas (FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016). No caso do PLA, a boa performance quanto à manutenção das condições dos alimentos e também a baixa toxicidade do material garantiram ao mesmo a classificação como seguro para aplicações de embalagem de alimentos, de acordo com a agência americana de Administração de Alimentos e Drogas (FDA) (FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016).

4.1.6 APLICAÇÕES DO PLA

As propriedades do PLA e de suas blends com outros materiais permitem aplicações em diferentes setores industriais. Dentre as possíveis aplicações encontram-se: embalagens para alimentos frescos, aplicações médicas e cirúrgicas, aplicações na indústria têxtil e no setor agrícola (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016; FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016; JAMSHIDIAN *et al.*, 2010).

Em 2010, estimava-se que cerca de 70% das aplicações do PLA estão concentradas no setor de embalagens. Neste setor, ganha destaque o embrulho de alimentos frescos como frutas e vegetais devido à alta permeabilidade de oxigênio e umidade através do PLA, garantindo a manutenção da qualidade dos alimentos (JAMSHIDIAN *et al.*, 2010). Além disso, o mercado europeu também apresenta interesse na utilização do PLA como embalagem de alimentos industrializados. A Danone®, por exemplo, adotou o PLA e o utilizou para confeccionar copos de iogurte, representando cerca de 80% da linha Activia no mercado alemão (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016).

Além disso, o PLA também possui extensas aplicações no setor médico cirúrgico. O PLA apresenta propriedades de biodegradabilidade, biocompatibilidade e de bioabsorção pelo organismo humano a curto e médio prazo, que são fundamentais para a viabilização de aplicações biomédicas. Dentre elas, destacam-se aplicações em próteses, implantes, suturas, parafusos e placas para articulações e ossos e

sistema de entrega de medicamento (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016; FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016; JAMSHIDIAN *et al.*, 2010).

O PLA também pode ser utilizado para a produção de fibras e componentes têxteis, como lenços e carpetes. Seu potencial em aplicações na forma de fibras é também de grande interesse da indústria automotiva, uma vez que diversas companhias automobilísticas estão procurando por alternativas de matérias renováveis para serem utilizados no interior dos veículos como os carpetes e tapetes. No entanto, obstáculos como o custo de produção, a liberação de odores durante aquecimento e tempo de degradação do material estão sendo estudados antes de sua aplicação efetiva (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016).

Outro grande setor de aplicação do PLA é a plasticultura aplicada ao cultivo de plantas e alimentos. Dentre os principais usos estão: proteção do solo contra erosão e de plantas contra pragas e insetos, atuando como canal facilitador para irrigação e como cobertura de estufas (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016). Para este tipo de aplicação, vale atentar que um dificultador é a fotodegradação do PLA por incidência de raios UV a médio prazo (FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016).

Por último, recentemente, o PLA também tem sido aplicado como material para impressões 3D, uma vez que apresenta baixa taxa de cisalhamento, propriedade interessante para impressão 3D. Dentre os objetos de impressão, estão objetos de uso cotidiano como miniaturas e armações de óculos até implantes para aplicações biomédicas (FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016).

A grande quantidade de aplicações potenciais do PLA representa a tentativa de contornar um dos principais desafios do biopolímero atualmente: a inserção e difusão desse bioplástico no mercado dos plásticos em larga escala. Caso essa difusão fosse mais fácil, poucas aplicações seriam necessárias para conquista de mercado pelo biopolímero. A partir da tabela 2, pode-se perceber relação entre algumas das propriedades do polímero e possíveis aplicações para o mesmo, em diferentes setores do mercado.

Tabela 2. Propriedades funcionais do PLA vs Aplicações.

Propriedades Funcionais	Aplicações
Transparência, facilidade de dobradura e brilho	Sacolas plásticas, embalagens de produtos industrializados, plasticultura
Fraca barreira contra umidade e oxigênio	Embalagens de produtos frescos
Biodegradabilidade, biocompatibilidade e bioabsorção	Aplicações médico cirúrgicas como implantes, próteses e suturas.
Baixa taxa de cisalhamento e características polares	Impressão 3D

Fonte: Farah; Anderson; Langer (2016).

4.1.7 HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DO PLA

Em 1932, o interesse na produção de um poliéster alifático nascia do químico americano Wallace Carothers, enquanto trabalhava na Du Pont, já naquela época, empresa química centenária, cuja linha de atuação abrangia produtos químicos, fibras, polímeros, produtos agrícolas, entre outros. Naquele momento, o polímero de ácido láctico que era sintetizado tinha baixa massa molecular e era caracterizado por propriedades mecânicas inadequadas, o que dificultava sua aplicação (FARAH; ANDERSON; LANGER, 2016; LUNT, 1998).

Após anos de trabalho no desenvolvimento de um produto com melhores propriedades, em 1954 foi depositada a patente da Du Pont para a produção de um PLA de alto peso molecular (LOWE, 1954). No entanto, um empecilho ainda atrapalhava a viabilidade deste polímero: a susceptibilidade à degradação hidrolítica. Apesar da baixa estabilidade em ambiente úmidos, entretanto, o novo produto mostrava potencial em aplicações médicas como fios de sutura reabsorvíveis e posteriormente pôde ser utilizado em implantes médicos e dosadores de fármacos (LUNT, 1998).

No entanto, as crises do petróleo na década de 70 abalaram a estrutura da indústria petroquímica, encarecendo a produção de químicos básicos derivados do petróleo. Como efeito da crise, despertou-se o interesse de diminuição da dependência da

indústria química em relação às matérias-primas fósseis. Assim, a possibilidade de utilização de produtos renováveis para a produção de químicos se tornou mais atrativa e o interesse na produção de ácido láctico como precursor do PLA ressurgiu (LIPINSKY, 1981). Ao final da década de 1980, avanços na tecnologia de produção de ácido láctico permitiram sua produção a partir do milho. Neste momento, em 1989, surgia o projeto de produção de PLA pela Cargill, uma das maiores empresas atuantes no ramo de agronegócio e produção de alimentos (CARGILL, 2017; NATUREWORKS, 2012).

Nos anos 1990, iniciou-se a fase de testes de uma planta piloto de produção de PLA a partir de açúcares vegetais com capacidade de 20 ton/ano sob controle da Cargill. Assim, em um intervalo de apenas 6 anos, a tecnologia de produção de PLA a partir do milho já podia ser aplicada para produção em escala comercial, utilizando posteriormente as marcas NatureWorks PLA e Ingeo™ como nomes comerciais (LUNT, 1998; NATUREWORKS, 2012).

Em novembro de 1997, originou-se a *joint venture* Dow Cargill – que se tornaria em 2001 a NatureWorks LLC – com participação de 50% da Cargill e 50% da Dow Chemical Co., gigante petroquímica produtora de químicos e plásticos convencionais (JAMSHIDIAN *et al.*, 2010). Nessa parceria, a Cargill contribuiu com seu conhecimento sobre matérias-primas renováveis derivadas de biomassa vegetal, fermentação para produção de ácido láctico e tecnologias de produção de PLA e a Dow, com seu conhecimento sobre processamento de químicos, plásticos e *know-how* desses mercados (NATUREWORKS, 2012). A expectativa era de que com os conhecimentos da Dow, a entrada e a difusão do PLA no mercado dos plásticos fosse ocorrer mais facilmente do que de fato aconteceu.

Já em 2002, iniciou-se a operação da planta comercial de PLA em Blair, Nebraska, EUA, com capacidade 140,000 ton/ano e tecnologia patenteada por ambas Cargill e Dow (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016; NATUREWORKS, 2012). Em 2003, foi inaugurada a maior planta de produção de ácido láctico do mundo, também sob controle da NatureWorks, de forma a suprir a demanda pela matéria-prima e manter a produção de PLA. A integração para trás, em direção aos fornecedores de matéria-prima para a produção de ácido láctico garantia e ainda garante o alicerce para a

produção de PLA em escala comercial e economicamente viável, segundo o modelo de negócio da Natureworks (LUNT, 1998).

Naquele momento, uma das principais propriedades utilizadas para comercializar o PLA era sua biodegradabilidade e compatibilidade com o organismo humano. Até então, parcerias comerciais entre a NatureWorks e, por exemplo, a ZimmerBiomet – empresa do ramo biomédico – buscavam a introdução do PLA no mercado de próteses e implantes (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016). Além disso, também se observavam esforços na introdução do polímero sem equivalente fóssil no mercado de embalagens, como evidenciado pela tabela 3. Vale ressaltar que no primeiro momento de introdução de produtos a base de PLA no mercado de embalagens, o principal diferencial para o bioplástico era sua biodegradabilidade, de modo que a maior parte dos parceiros comerciais apresentados na tabela 3 anunciavam seus produtos destacando o aspecto biodegradável dos mesmos.

Tabela 3.Exemplos de aplicações de PLA até 2005.**acti**

Parceiro Comercial	Anos em atividade	Aplicações	Propriedade	Observação
Biota, EUA	2004-2006	Garrafas de água	Brilho e translucidez; resistência mecânica.	
Wal-Mart, EUA	2005 - atualmente	Embalagem para morangos e couve de bruxelas	Brilho e translucidez; facilidade de dobra; baixa barreira a umidade e O ₂	
Del-Monte, EUA	2005 - atualmente	Embalagem para produtos frescos	Brilho e translucidez; facilidade de dobra;baixa barreira a umidade e O ₂	Todos os produtos eram anunciados como sendo biodegradáveis
SPAR, Austria	2005 - atualmente	Embalagem para frutas	Brilho e translucidez; facilidade de dobra	
Auchan, França	2005 - atualmente	Embalagem para saladas	Brilho e translucidez; facilidade de dobra; baixa barreira a umidade e O ₂	

Fonte: CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016; FARAH; ANDERSON; LANGER, (2016)

Apesar de a parceria entre Cargill e Dow ter inaugurado uma unidade de produção em escala comercial e o mercado de PLA ter apresentado crescimento, após quase 10 anos de parceria, em 2005 a Dow decidiu abandonar o projeto e a Cargill adquiriu a metade da NatureWorks pertencente à Dow, tornando-se única proprietária (JAMSHIDIAN *et al.*, 2010; MADHAVAN NAMPOOTHIRI; NAIR; JOHN, 2010; NATUREWORKS, 2012). De acordo com George Blitz, então vice-presidente da Dow, o mercado de PLA parecia promissor, mas a Dow somente enxergava retorno no longo prazo. Dessa forma, Blitz acreditava que os esforços ainda teriam que durar por muito tempo para que o mercado do PLA se tornasse realmente grande e estabelecido. (NATURE, 2005).

Já em 2007, iniciou-se uma parceria com a Teijin Ltda, empresa japonesa centenária atuante na produção de materiais de alto desempenho e de resinas poliméricas convencionais. Novamente a participação de cada uma das empresas era de 50% sobre a NatureWorks (JAMSHIDIAN *et al.*, 2010; MADHAVAN NAMPOOTHIRI; NAIR; JOHN, 2010; NATUREWORKS, 2012).

A partir desta parceria, a Teijin contribuiu de forma semelhante à Dow para a JV. Por meio da Teijin, a *joint venture* podia acessar o conhecimento em aplicações *downstream* de fibras, filmes e compostos plásticos já dominadas pela empresa, sob nova tentativa de acelerar as vendas de PLA a nível global e facilitar a expansão no novo polímero renovável nos mercados de plástico e fibras. Além disso, a parceria com a Teijin também permitiu à NatureWorks acesso a mais clientes, distribuidores e consumidores finais interessados em soluções sustentáveis com o uso de biopolímeros renováveis (BUSINESSWIRE, 2007).

Em contrapartida, para a Teijin, a participação na NatureWorks estava alinhada com sua estratégia de implementar investimentos em tecnologias sustentáveis ao redor do mundo e aumentar sua expertise no desenvolvimento de aplicações para o biopolímero desenvolvido pela NatureWorks (BUSINESSWIRE, 2007). Além disso, desde 2005 a própria Teijin também já possuía projetos de reciclagem de PLA a partir de métodos físico-químicos, uma vez que a infraestrutura de reciclagem do biopolímero era (e ainda é) pouco desenvolvida, se comparada com a reciclagem de plásticos convencionais – dificultando a utilização e correta reciclagem do bioplástico. Em 2007, a empresa japonesa (independente da NatureWorks) também anunciou o

desenvolvimento de um outro tipo de PLA, resistente a calor, posteriormente chamado de BioFront (TEIJIN, 2005, 2006, 2007).

Em 2009, porém, como parte da estratégia de reestruturação de portfólio da Teijin Ltda durante a crise econômica mundial, a empresa japonesa vendeu sua participação na NatureWorks e a Cargill passou novamente a ser a única dona da empresa (NATUREWORKS LLC, 2009). Entretanto, não demorou muito até que em 2011 a PTT Global Chemical Public Company Limited (PTTGC) – a maior empresa petroquímica da Tailândia, atuando de forma integrada na produção e distribuição upstream, intermediária e downstream de produtos petroquímicos, incluindo polímeros convencionais - anunciasse um investimento de US\$150 milhões na NatureWorks, tornando-se proprietária da *joint venture* em conjunto com a Cargill até os dias atuais (DIGEST, 2015f; NATUREWORKS LLC, 2011).

Nesse período, a forma como o mercado enxergava o PLA estava mudando. A biodegradabilidade do polímero, que antes era um dos principais focos das estratégias de marketing, deixava de ser tão importante e era sobrepujada por outras características como a reciclabilidade do biopolímero, a redução de emissões de GEE e de consumo de energia e o fato de o mesmo ser derivado de fontes renováveis. Exemplos de aplicações no mercado de embalagens com estratégias de marketing voltadas para essas características estão representadas na tabela 4.

Tabela 4. Exemplos de aplicação de PLA após 2005.

Parceiro Comercial	Anos em atividade	Aplicações	Propriedade	Observação
Fleischmann's®, Blue Bonnet®, Parkay®, ConAgra Foods, EUA	2009 - atualmente	Selos para embalagens	Facilidade de dobra Possibilidade de selagem a baixas temperaturas Produzido a partir de recursos renováveis	Anunciado como PLA reciclável e por consumo reduzido de energia
Shiseido-Urara, China	2009 - atualmente	Embalagem para shampoo	Resistência mecânica Produzido a partir de recursos renováveis	Anunciado como "ambientalmente amigável"

Activia®, Danone, Germany	2010/2011 - atualmente	Embalagem para iogurte	Resistência mecânica Produzido a partir de recursos renováveis	Anunciado pela redução de 25% da pegada de carbono e por utilizar menos derivados fósseis
Stonyfield Farm®, USA	2010/2011 - atualmente	Embalagem para iogurte	Resistência mecânica Produzido a partir de recursos renováveis	Anunciado por reduzir a emissão de GEE
Sunchips®, Frito Lay, USA	2010 - 2014	Embalagem para salgadinhos industrializados	Resistência térmica	Anunciado por seu caráter <i>biobased</i> Removido do mercado devido aos sons inconvenientes oriundos da manipulação da embalagem

Fonte: CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016; FARAH; ANDERSON; LANGER (2016).

A partir das tabelas 3 e 4, verifica-se uma pequena amostra da grande quantidade de parceiros comerciais aplicando o PLA em seus produtos finais (CASTRO-AGUIRRE *et al.*, 2016). Entretanto, nem todas essas experiências foram exclusivamente positivas, como por exemplo para a Danone. A Danone lançou no mercado alemão embalagens para seu iogurte Activia feitas a partir de PLA. Pouco após a introdução das novas embalagens no mercado, porém, a empresa francesa foi acusada de praticar *greenwashing* – utilização de estratégias de marketing para supervalorizar o aspecto sustentável do produto e ocultar impactos negativos ao meio ambiente. A DUH – organização ambiental alemã – acusava as embalagens de iogurte de PLA de não serem recicláveis e tampouco por reduzirem a pegada de carbono em relação às embalagens anteriores, ao contrário do anunciado pela Danone (ELANDER; KREISLAUFWIRTSCHAFT, 2011; KROUB, 2011). Após a acusação, por meio de um acordo com a organização alemã, a Danone se comprometeu remover os anúncios de seu website alemão. Apesar de o episódio não resultar em medidas mais drásticas,

como a remoção do produto de mercado, causou um desconforto quanto à aplicação de PLA, dificultando ainda mais a difusão deste produto no mercado.

Para a PTTGC, a participação na NatureWorks fortaleceu sua estratégia de inclusão de materiais renováveis e mais sustentáveis em seu portfólio. Já para a NatureWorks, a associação da Cargill com a PTTGC, representou grande oportunidade de continuar sua expansão no sudeste asiático. Segundo o Ministro de Energia da Tailândia da época, Pichai Nariphaphan, o governo tailandês encorajava investimentos em químicos verdes e bioplásticos, representando para o PLA um grande potencial de crescimento no mercado asiático (NATUREWORKS LLC, 2011).

Além dos incentivos fiscais oferecidos pelo governo tailandês, a facilidade de obtenção de matérias-primas levou a NatureWorks a planejar uma segunda unidade de produção de sua resina Ingeo™ na Tailândia (DIGEST, 2015f). No entanto, ainda não há previsão para início da construção.

Atualmente a NatureWorks continua com o foco voltado para o desenvolvimento de copolímeros e de aditivos para o PLA. Além disso, a JV possui investimentos em equipamentos de processamento, com o intuito de encontrar novas aplicações na tentativa de expandir o mercado para o PLA e superar a dificuldade de difusão do biopolímero no mercado. Não obstante, recentemente foi inaugurado um novo laboratório de fermentação, com o objetivo de desenvolver uma tecnologia de transformação de metano a ácido láctico, por rota fermentativa, em escala comercial (NATUREWORKS LLC, 2017).

Além da NatureWorks, cabe destacar ainda mais um importante ator no desenvolvimento de PLA: a empresa PURAC, hoje chamada Corbion. O envolvimento da PURAC com o PLA iniciou-se em 2007, quando foi desenvolvida uma nova tecnologia de polimerização de PLA a partir dos lactídeos de base renovável produzidos por ela (CORBION, 2007). Já em 2008, esta tecnologia de polimerização foi otimizada em conjunto pela PURAC e a Sulzer Chemtech, empresa desenvolvedora de tecnologias reacionais para a produção de polímeros (CORBION, 2008).

A nova tecnologia foi aplicada pela primeira vez para a produção da BIOFOAM®, espuma produzida a partir de PLA, pela empresa Synbra na Nova Zelândia. A Synbra possuía posição de liderança na Europa na produção de poliestireno expandido a partir de fontes convencionais e implementou a nova tecnologia em uma nova planta com capacidade de 5.000 ton/ano de PLA para complementar a demanda por poliestireno expandido (CORBION, 2008).

Apesar de deter a tecnologia de produção de PLA, até então a PURAC seguia um modelo de negócio diferente da NatureWorks. A PURAC se limitava a produzir os lactídeos necessários para a polimerização do PLA – que representa a maior parte do investimento da produção de PLA – e estabelecia parceiros comerciais para a venda destes lactídeos que efetivamente os transformariam no polímero. Tendo em vista o crescimento do mercado de bioplásticos, em 2010 uma nova planta da PURAC com capacidade de produção de 75.000 ton/ano de lactídeos começou a ser construída na Tailândia (CORBION, 2010b).

Ao mesmo tempo em que a PURAC estabelecia novos parceiros comerciais para a produção de PLA, ela também desenvolvia novas variedades do bioplástico com propriedades de plásticos de engenharia (CORBION, 2010a, 2013). Além disso, novas tecnologias de produção também eram desenvolvidas. Em 2013, a PURAC operou um projeto de produção de ácido láctico sem a geração de gesso (tecnologia *gypsum free*) – sub-produto e passivo ambiental gerado pelas tecnologias de produção de ácido láctico até então existentes. Esse avanço tecnológico, posteriormente aplicado na produção de ácido láctico em escala comercial, tornava a produção de ácido láctico mais sustentável, com maior facilidade de aumento de escala e com custos de operação reduzidos em relação ao processo até então vigente (DIGEST, 2015e).

Em 2015 a PURAC, agora sob o nome de Corbion Purac, tornou-se a primeira empresa com tecnologia capaz de produzir PLA a partir de matéria-prima de segunda geração como bagaço, sabugo de milho e palha de trigo. Entretanto, ainda são necessários esforços de P&D para possibilitar a produção em escala comercial (CORBION, 2015).

Em 2016, a Corbion complementou sua estratégia de produção de lactídeos e em novembro desse mesmo ano iniciou a construção de uma planta de polimerização,

com capacidade de produção e 75.000 ton/ano de PLA, em seu site industrial na Tailândia – sinalizando uma mudança em seu modelo de negócio. Concomitantemente com a construção desta planta, prevista para entrar em operação em 2018, a Corbion também decidiu expandir em 30% sua unidade de produção de lactídeos, com a finalidade de continuar suprindo a demanda de seus clientes (CORBION, 2016).

Também no final de 2016 foi anunciada a parceria entre a Corbion e a Total - companhia internacional de óleo e gás e produtora e distribuidora de energia e de polímeros - na formação da *joint venture* Total Corbion PLA com participação de 50% de cada uma das empresas (BUSINESSWIRE, 2016).

A planta de PLA em construção da Corbion foi transferida para a *joint venture*, que ficará responsável pela produção e pelas vendas de PLA obtido sem cogeração de gesso, sob a marca Luminy®. A JV iniciou suas operações em março deste ano e conta com a expertise da Corbion em produção de ácido láctico e de biopolímeros e o conhecimento técnico e de marketing da Total, assim com sua liderança em polímeros (BUSINESSWIRE, 2016; TOTAL-CORBION, 2017).

Além destes principais atores, também há outros produtores de PLA menores no mercado como: Toyobo, Dai Nippon Printing Co., Mitsui Chemicals, Shimadzu, NEC, Toyota (Japão), Hycail (Holanda), Galactic (Bélgica), Cereplast (E.U.A.), FkuR, Biomer, Stanelco, Inventa-Fischer (Alemanha) e Snamprogetti (China) (JAMSHIDIAN *et al.*, 2010).

4.2 BIO-PET

4.2.1 INTRODUÇÃO AO BIO-PET

O politereftalato de etileno, ou PET como é usualmente chamado, consiste em um poliéster saturado com massa molar média entre $2-5 \times 10^4$ g/mol, dependendo de sua aplicação. O polímero foi sintetizado em laboratório pela primeira vez pelos químicos ingleses J. R. Whinfield e J. T. Dickson em 1941. Cerca de uma década depois, a

DuPont desenvolveu o PET grau polímero, que desde então vem sendo produzido e comercializado em escala industrial (PANG *et al.*, 2016).

O PET é um dos polímeros de maior consumo no mundo e somente em 2016, estima-se que cerca de 100 milhões de toneladas do polímero tenham sido utilizadas. Não obstante, a tendência de consumo e produção deste plástico é crescente e foi estimada como sendo de 4% ao ano (PANG *et al.*, 2016).

O PET atualmente pode ser produzido de duas formas: utilizando matéria-prima derivada do petróleo (PET convencional) ou utilizando matéria-prima inteira ou parcialmente derivada de recursos renováveis, como açúcares vegetais (bio-PET). O PET é produzido a partir de dois precursores principais: o ácido tereftálico e monoetileno glicol (MEG), derivados ou não do petróleo.

Atualmente, o PET convencional é a variedade mais produzida e consumida ao redor do mundo. Entretanto, com a maior pressão global para redução de GEE e considerando-se a tentativa de redução de combustíveis fósseis, a produção dos precursores que originam o PET por matérias-primas alternativas tem recebido mais atenção recentemente (PANG *et al.*, 2016; SHELDON, 2014). Além disso, novos polímeros de base biológica com propriedades semelhantes ao PET também estão sendo investigados, como é o caso do PEF (VAN BERKEL *et al.*, 2015).

Dessa forma, diversas rotas em potencial para a síntese de MEG e de ácido tereftálico a partir de biomassa têm sido propostas (PACHECO *et al.*, 2015; PANG *et al.*, 2016; SHELDON, 2014). Conseqüentemente, uma vez que utilizamos um ou ambos os precursores derivados de biomassa para a produção de PET, considera-se que o produto final também é *biobased*. Nasce, então, o bio-PET.

O bio-PET consiste, portanto, na mesma molécula do PET convencional, porém produzida a partir de precursores de base biológica, caracterizando-se como polímero *drop-in*. Dessa forma, o bio-PET apresenta todas as propriedades características, aplicações e processamento *downstream* do PET fóssil (PACHECO *et al.*, 2015; PANG *et al.*, 2016; SHELDON, 2014).

4.2.2 SÍNTESE DE BIO-PET

O PET pode ser produzido por dois métodos principais: (1) esterificação direta do ácido tereftálico purificado (PTA) com MEG; e (2) reação de transesterificação por meio da reação de dimetiltereftalato com etileno glicol (ABIPET, 2017a; DUTT; SONI, 2013).

Assim como o PET, o bio-PET é produzido industrialmente por meio da reação direta de polimerização de PTA e MEG. Atualmente, a forma mais fácil de produção de bio-PET é pela utilização de bio-etileno glicol para a produção de bio-PET até 30% renovável. No entanto, ainda que mais complexa, também é possível produção de PTA a partir de biomassa, de forma a possibilitar a produção de bio-PET 100% de base biológica (PANG *et al.*, 2016; SHELDON, 2014).

Apesar de já ter se comprovado possível, a tecnologia de produção de bio-PET de base 100% biológica, esta ainda se encontra em desenvolvimento, e a grande dificuldade atualmente é a produção do precursor PTA de base renovável em escala comercial (PACHECO *et al.*, 2015; PANG *et al.*, 2016; SHELDON, 2014). Atualmente, há diversas frentes de desenvolvimento para a produção de bio-PET em escala comercial e as possíveis rotas para a produção do PTA estão apresentadas na figura 16. Contudo, somente as principais rotas serão abordadas neste trabalho.

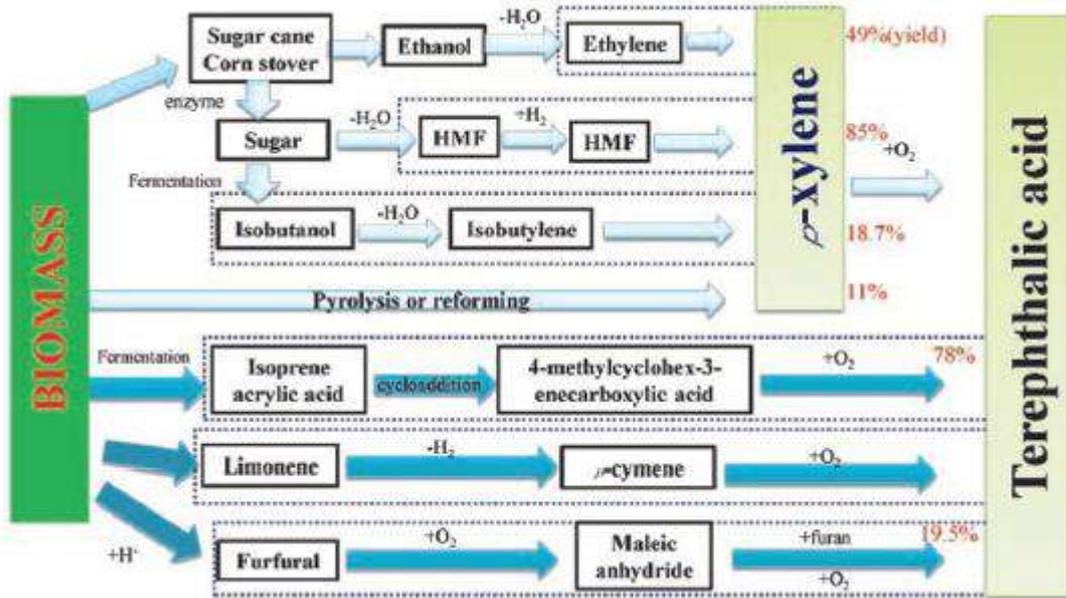


Figura 16. Esquema ilustrativo das diferentes rotas de produção de ácido tereftálico de base renovável.

Fonte: Pang *et al.* (2016).

A variedade de rotas para a produção de um precursor de base renovável não é exclusividade do ácido tereftálico. O bio-MEG também pode ser produzido a partir de diferentes rotas tecnológicas. A figura 17 ilustra a variedade de rotas possíveis. No entanto, o presente trabalho abordará somente a principal e mais utilizada rota atualmente.

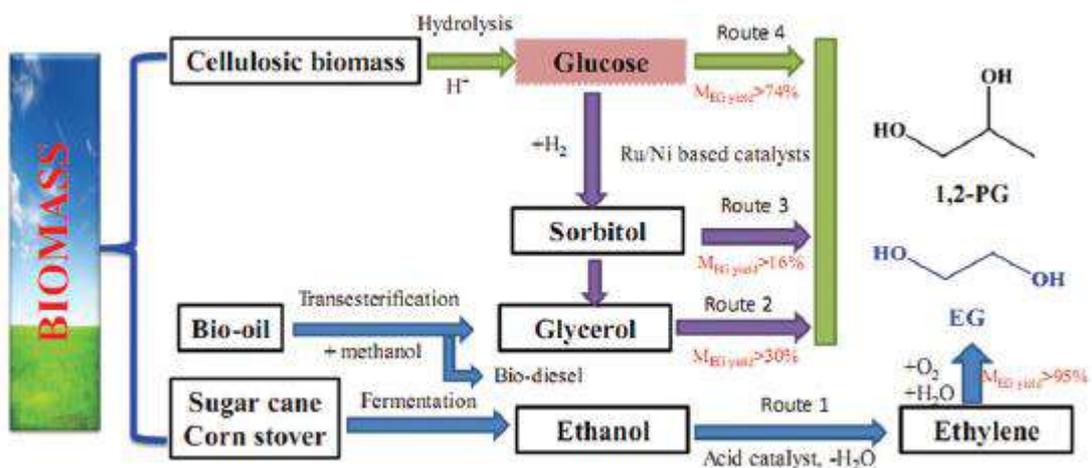


Figura 17. Esquema ilustrativo das diferentes rotas de produção de etileno glicol de base renovável.

Fonte: Pang *et al.* (2016).

- **Síntese de bio-MEG**

Devido à oferta abundante de bio-etanol em algumas áreas e a já conhecida tecnologia de sua transformação em eteno e, posteriormente, em etileno glicol, a síntese de bio-MEG oriundo de bio-etanol tem sido a rota praticada a nível comercial. Essa rota de síntese de bio-MEG envolve 3 etapas principais: a desidratação de etanol para produção de etileno; a oxidação de etileno a óxido de etileno; e a hidratação de óxido de etileno a MEG. O principal obstáculo desta rota, no entanto, é o alto custo do bio-etanol quando comparado ao etileno derivado de fonte fóssil (PANG *et al.*, 2016). A figura 18 representa esta rota.

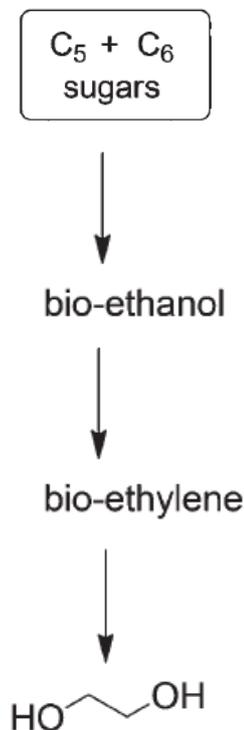


Figura 18. Esquema ilustrativo da principal rota de produção de etileno glicol de base renovável.

Fonte: SHELDON (2014).

Além desta rota principal, outras formas de produção de bio-MEG também incluem: (1) síntese de MEG via hidrogenólise de glicerol; (2) síntese de MEG via hidrogenólise de sorbitol e xiliol; e (3) síntese de MEG via conversão de biomassa celulósica. Vale ressaltar que há, ainda, cooperação entre as empresas Coca-Cola e Liquid Light para desenvolver uma nova tecnologia para síntese de MEG a partir de CO₂ e luz solar (LIGHT, 2015; PANG *et al.*, 2016).

Entretanto, apesar da variedade de rotas para a produção de bio-MEG, a maior parte delas ainda não apresenta viabilidade comercial. A síntese de MEG a partir do glicerol, por exemplo, apresenta problemas de controle de seletividade para o MEG e baixa quantidade de glicerol disponível para produção industrial; a síntese de MEG por hidrogenólise de sorbitol e xilitol apresenta baixo percentual de conversão (30%) se comparada com a rota por etanol (90%); por último, a síntese de MEG por conversão direta de biomassa celulósica apresenta dificuldades de processamento e de seletividade do MEG como produto. Dessa forma, a rota a partir de bio-etanol é a melhor desenvolvida até então, podendo ser aplicada em escala comercial (PANG *et al.*, 2016).

- **Síntese de bio-ácido tereftálico**

Atualmente, o ácido tereftálico é produzido em escala comercial via oxidação aeróbica catalítica do p-xileno (PX) em meio com ácido acético, processo conhecido como AMOCO. Entretanto, o PX mais utilizado em larga escala atualmente é obtido por reforma catalítica da nafta, componente do petróleo (PANG *et al.*, 2016).

Por outro lado, para se produzir bio-ácido tereftálico, há duas formas principais: (1) produzir o intermediário PX a partir de biomassa e, então, transformá-lo em ácido tereftálico ou (2) produzir o ácido tereftálico diretamente da biomassa, conforme ilustrado na figura 16. (PANG *et al.*, 2016; SHELDON, 2014). Abaixo estão brevemente descritos os métodos mais utilizados para a produção de bio-ácido tereftálico.

Uma das alternativas para a produção de p-xileno de base biológica, em desenvolvimento pela empresa Virent, consiste na reforma em fase aquosa de açúcares vegetais e biomassa. A reforma produz uma mistura de intermediários, que após processamento levam a uma mistura de aromáticos: benzeno, tolueno e xilenos – dentre os quais o bio-p-xileno pode ser separado (SHELDON, 2014; VIRENT, 2017). A figura 19 representa brevemente esta rota.

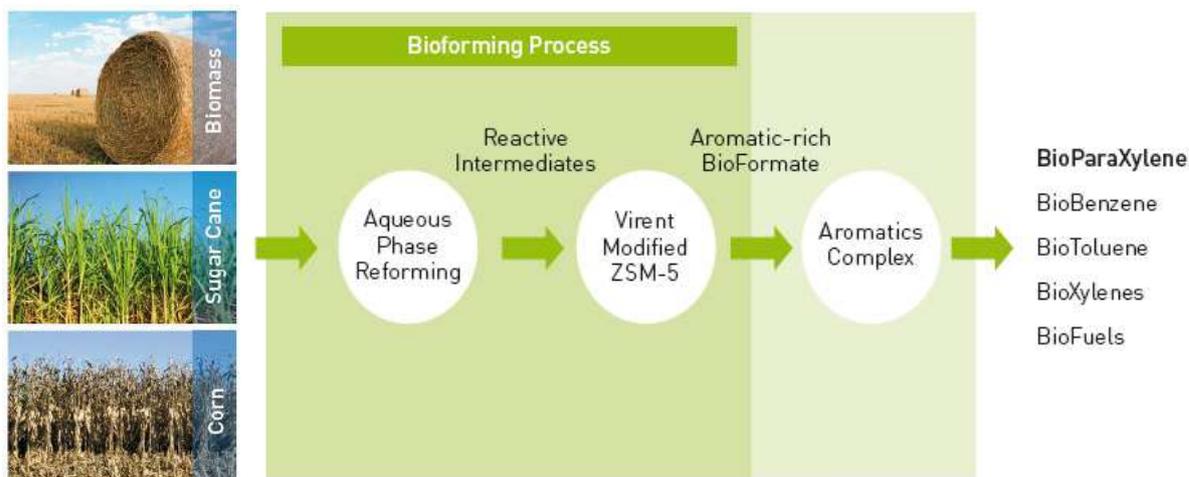


Figura 19. Esquema ilustrativo da rota de produção de bio-p-xileno desenvolvida e utilizada pela Virent.

Fonte: Komula(2011).

Outra possibilidade é a conversão de biomassa a PX com o hidroximetilfurfural (HMF) como intermediário – rota representada na figura 20. Neste processo, a biomassa passa por hidrólise para a formação de açúcares e posterior desidratação para a formação de HMF. O HMF formado, por sua vez, é transformado em 2,5-dimetilfurano (DMF). Finalmente, o DMF formado é reagido com etileno via reação de Diels-Alder para a formação de bio-p-xileno (PANG *et al.*, 2016; SHELDON, 2014).

Entretanto, o desafio da adoção deste processo em escala comercial é o elevado custo de obtenção de HMF, o que dificulta a viabilidade econômica do método. Além disso, o HMF também é o precursor do ácido furandicarboxílico (FDCA), que por sua vez é utilizado para a produção de PEF, biopolímero que compete com o PET e bio-PET. Haja vista a versatilidade do HMF – com potencial de ser intermediário para a formação de novas famílias de químicos – ele é considerado, assim como o FDCA, um químico plataforma (BOMTEMPO; CHAVES ALVES; DE ALMEIDA OROSKI, 2017; EERHART; FAAIJ; PATEL, 2012).

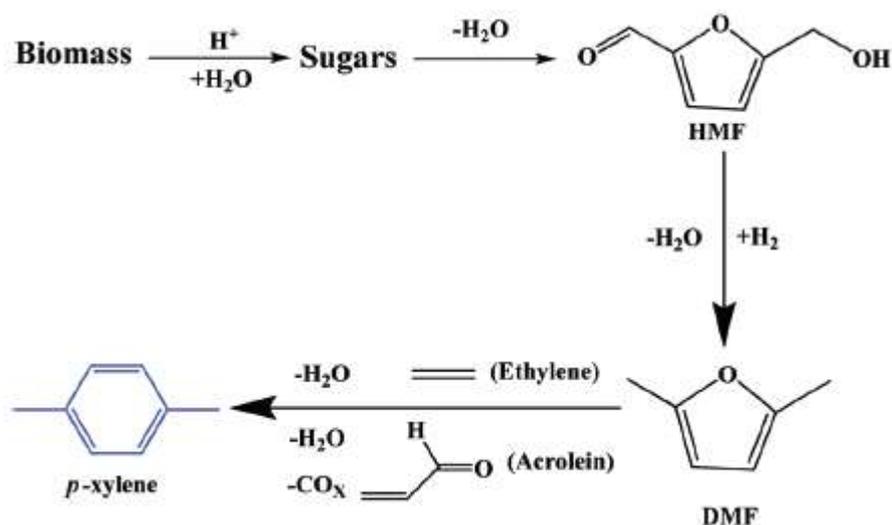


Figura 20. Esquema ilustrativo da rota de produção de bio-p-xileno a partir do hidroximetilfurfural (HMF).

Fonte: Pang *et al.* (2016).

Além dessas rotas apresentadas, também é possível a obtenção de bio-p-xileno a partir de isobutanol, como é realizado pela empresa Gevo – esquema apresentado na figura 21. Nesse caso, o processo tem quatro etapas principais: fermentação da biomassa para formação de isobutanol; desidratação de isobutanol a isobutileno; oligomerização do isobutileno a di-isobutileno; e, finalmente, desidrociclicização de di-isobutileno para a formação de bio-p-xileno. Assim como os demais métodos para a produção de p-xileno, o elevado custo desta rota ainda não é competitivo com o preço de p-xileno derivado de petróleo (PANG *et al.*, 2016; SHELDON, 2014).

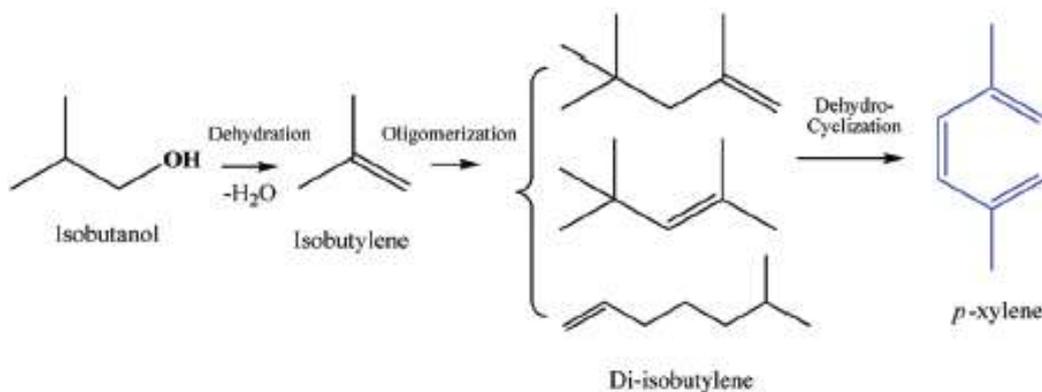


Figura 21. Esquema ilustrativo da rota de produção de bio-p-xileno a partir de isobutanol.

Fonte: Pang *et al.* (2016).

Para a produção de bio-ácido tereftálico, também é possível a utilização de limoneno como matéria-prima, composto obtido de cascas de frutas cítricas como laranja. Neste caso, ao contrário dos demais métodos apresentados anteriormente, a produção de PTA é feita sem a presença de p-xileno como intermediário (PANG *et al.*, 2016).

Para isso, bastam duas etapas: desidrogenação do limoneno para a formação do intermediário p-cimeno; e posterior oxidação deste para a formação de bio-ácido tereftálico. Apesar de simples, este método é limitado pela baixa capacidade de produção de limoneno e a competição com outras aplicações desta substância, como aditivos em comida e perfumes (PANG *et al.*, 2016).

4.2.3 PROPRIEDADES, APLICAÇÕES E PROCESSAMENTO DO BIO-PET

Muito conhecido por suas aplicações na fabricação em fibras e garradas, o PET tem propriedades como alta rigidez, leveza, baixa permeabilidade de CO₂, transparência e não biodegradabilidade. Além disso, o PET não possui efeitos negativos na saúde humana e foi aprovado por diversas organizações de saúde ao redor do mundo para ser utilizado como recipiente para comida e bebida (PANG *et al.*, 2016).

Uma das razões para a grande difusão do PET em diversas aplicações é a possibilidade de produção de diversos *grades* a partir da variação do peso molecular do polímero. Por exemplo, resina PET para embalagens é caracterizada por possuir viscosidade intrínseca maior do que a do PET para aplicações em filmes e fibras (ABIPET, 2017a). Além disso, a depender do histórico térmico e de processamento, o PET pode assumir forma amorfa ou semi-cristalina (JANKAUSKAITE; MACIJAUSKAS; LYGAITIS, 2008).

As propriedades do PET, assim como de outros polímeros, dependem principalmente da fração das regiões cristalinas, do tipo e tamanho dos cristais que o formam e da orientação das cadeias moleculares e dos cristais. Estas condições, por sua vez, estão fortemente relacionadas com as condições de processamento do polímero (ABIPET, 2017a).

Uma vez que o o bio-PET é um biopolímero *drop-in* e consiste na mesma molécula química que o PET convencional, é natural que suas propriedades também sejam a mesma de seu análogo fóssil.

Dessa forma, o bio-PET – assim como o PET – pode ser utilizado em diversos setores da economia e tem aplicações na indústria têxtil, sob a forma de fibras, filmes, garrafas e outros produtos diversos (JANKAUSKAITE; MACIJAUSKAS; LYGAITIS, 2008). Dentre os produtos finais produzidos de PET podemos encontrar roupas, cordas, partes de equipamentos eletrônicos e de carros e utensílios domésticos (ABIPET, 2017b).

No que tange ao processamento de bio-PET, como qualquer outro polímero, o tipo de processamento tanto para o PET quanto para o PEF varia de acordo com a aplicação desejada. Atualmente para o PET um dos métodos de processamento mais utilizados é a injeção por sopro, para a produção de garrafas PET.

No entanto, de acordo com as características e propriedades do PET, outras formas de processamento também podem ser utilizadas a depender da aplicação desejada. Por exemplo, também são considerados métodos de processamento adequados para o PET como a termoformagem, moldagem por injeção e extrusão de filme fundido (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2015b).

4.2.4 RECICLAGEM DE BIO-PET

O PET é considerado um dos plásticos mais presentes nos resíduos municipais sólidos gerados anualmente e descartados indevidamente. No entanto, os produtos a base de PET têm decomposição natural em condições ambiente muito lentas, o que torna ainda mais importante a prática de reciclagem do polímero em questão (JANKAUSKAITE; MACIJAUSKAS; LYGAITIS, 2008).

Para que a reciclagem do PET seja possível, os resíduos de PET devem possuir alguns requisitos mínimos, em termos de propriedades, conforme descritos da tabela 5.

Tabela 5. Requisitos mínimos para o correto reprocessamento do PET na cadeia de reciclagem.

Property	Value
Viscosity coefficient [η]	$> 0.7 \text{ dl}\cdot\text{g}^{-1}$
Melting temperature T_m	$> 240 \text{ }^\circ\text{C}$
Water content	$< 0.02 \text{ wt.}\%$
Flake size	$0.4 \text{ mm} < D < 8 \text{ mm}$
Dye content	$< 10 \text{ ppm}$
Yellowing index	< 20
Metal content	$< 3 \text{ ppm}$
PVC content	$< 50 \text{ ppm}$
Polyolefin content	$< 10 \text{ ppm}$

Fonte: Jankauskaite; Macijauskas; Lygaitis (2008).

Dentre as possíveis formas de reciclagem do plástico, há duas categorias principais: reciclagem física e reciclagem química. Cada uma dessas categorias tem diferentes métodos. Os principais métodos encontram-se evidenciados pela figura 22.

A reciclagem física consiste no processamento dos resíduos de PET por meio de granulação ou pelletização, seguidas de derretimento e extrusão. O polímero básico não é alterado durante o processo, porém o PET reciclado é mais sensível a degradação térmica e hidrolítica que o PET virgem e geralmente há um decréscimo na viscosidade, massa molecular média e em propriedades térmicas e mecânicas, haja vista o tratamento mecânico e térmico durante a reciclagem (JANKAUSKAITE; MACIJAUSKAS; LYGAITIS, 2008).

Além disso, uma vez que diferentes plásticos precisam de diferentes condições de reforma para a reciclagem, como variadas temperaturas de processamento e até processos distintos, a presença dos mesmos em meio aos resíduos de PET é considerada como contaminação. Por essa razão, antes de se realizar o derretimento dos pellets de PET, os mesmos passam por lavagem para a remoção de contaminantes (JANKAUSKAITE; MACIJAUSKAS; LYGAITIS, 2008).

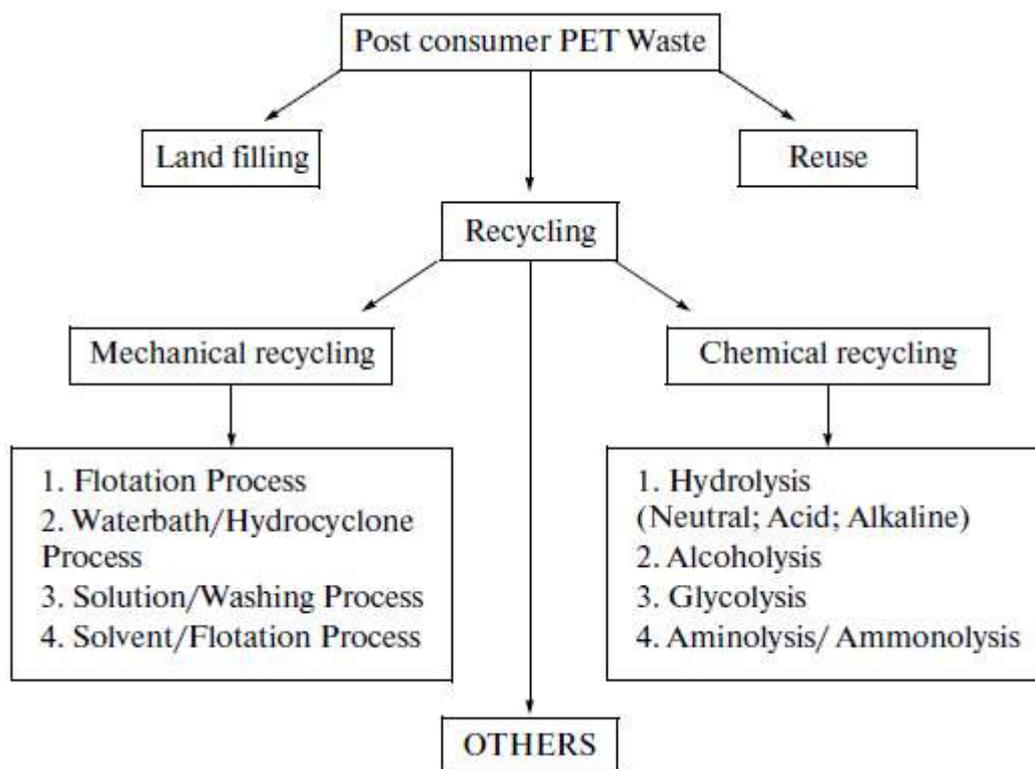


Figura 22. Diferentes métodos possíveis para a reciclagem de PET.

Fonte: Dutt e Soni (2013).

Por outro lado, a reciclagem química se baseia no processamento químico dos rejeitos de PET por meio de reações de despolimerização total ou parcial, transformando o PET em monômeros ou em oligômeros, respectivamente. Após sua formação, os monômeros são, então, polimerizados novamente para a formação do PET reciclado. O PET assim regenerado pode ser utilizado puro para a formação de produtos finais ou em blendas com PET virgem. Durante o processo de regeneração, etapas de purificação como destilação, cristalização e lavagem costumam ocorrer (JANKAUSKAITE; MACIJAUSKAS; LYGAITIS, 2008).

4.2.5 HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DO BIO-PET

O bio-PET começou a ser comercializado em 2009, sob a forma da PlantBottle, garrafa desenvolvida e lançada pela Coca-Cola Company (COCA-COLA, 2013a; GATEWAY, 2011). De acordo com Liz Lowe, gerente da Coca-Cola em 2011, a PlantBottle foi resultado de anos de pesquisa e investimento no desenvolvimento de novo design e

tecnologia capazes de produzir a garrafa de bio-PET a partir de bio-etanol derivado da cana de açúcar (GATEWAY, 2011).

Até esse momento, o modelo de PlantBottle lançado pela Coca-Cola possuía até 30% de base renovável, ou seja, somente um dos dois monômeros necessários para a produção de PET era de base renovável: o monoetileno glicol (MEG). De acordo com a análise de ciclo de vida conduzida pela empresa, apesar de a nova garrafa ser somente até 30% renovável, sua fabricação representava uma redução de 25% na emissão de carbono, quando comparada com a garrafa PET convencional, derivada do petróleo (COCA-COLA, 2013a; GATEWAY, 2011).

Tendo o início das vendas da PlantBottle em 2009, ao final de 2010 a Coca-Cola Company já havia distribuído cerca de 2,5 bilhões de novas garrafas no mercado (GATEWAY, 2011). Para isso, a empresa de bebidas precisou estruturar uma cadeia de produção e distribuição do monômero bio-MEG para suprir a crescente demanda pela PlantBottle (PLASTICENGINEERINGBLOG, 2012), uma vez que a Coca-Cola definiu como meta a substituição de todas as suas garrafas de PET convencional (mais de 35 bilhões) por bio-PET até 30% renovável até 2020 – impossível haja vista a escala de produção atual (COCA-COLA, 2013).

Neste primeiro momento, a principal cadeia de produção de bio-MEG iniciava-se no Brasil com a compra de bioetanol produzido por diversos produtores nacionais. O bioetanol nacional era, então, enviado para a Índia Glycols Ltd. – empresa indiana produtora de bio-MEG desde 1989 – e, junto ao bioetanol indiano, era utilizado para a fabricação de bio-MEG em escala comercial (GLYCOLS, 2017; PLASTICENGINEERINGBLOG, 2012).

O bio-MEG produzido na Índia era posteriormente transformado em bio-PET. Para tanto, a Coca-Cola Company estabeleceu parceria com a Indorama Venture PCL, empresa tailandesa líder global em produção de PET (VENTURES, 2017), para a utilização de bio-MEG ao invés de MEG convencional e produção de bio-PET 30% renovável (PLASTICENGINEERINGBLOG, 2012). Haja vista a natureza *drop-in* do bio-MEG, a produção de bio-PET não exigia adaptações em seus ativos de produção de PET, o que possibilitou rapidamente a produção do biopolímero pela Indorama.

Finalmente, o bio-PET tailandês era transformado nas garrafas PlantBottle pela Western Container Corporation, companhia de transformação de plástico por moldagem por sopro pertencente à própria Coca-Cola Company (CORPORATION, 2017; PLASTICSENGINEERINGBLOG, 2012). Dessa forma, uma vez que o bio-PET é um biopolímero *drop-in*, foi possível o aproveitamento de recursos e ativos já existentes à época para suportar a elevada demanda pelo novo biopolímero, sem custo de mudança.

Após o lançamento da PlantBottle fabricada com PET até 30% renovável pela Coca-Cola Company, em 2011 a concorrente no ramo de bebidas PepsiCo anunciou o lançamento da primeira garrafa PET produzida inteiramente a partir de materiais renováveis (GATEWAY, 2011; PEPSICO, 2011). Para a produção da nova garrafa PET verde de base 100% biológica, a PepsiCo afirmou utilizar como matéria-prima materiais como gramíneas, cascas de pinho e cascas de milho. Contudo, a companhia anunciou que a médio prazo planejava utilizar também cascas de batata e de laranja, resíduos de seus processos produtivos (PEPSICO, 2011). Apesar de a empresa ter anunciado interesse em continuar a desenvolver a tecnologia de produção de bio-PET de base 100% biológica, a produção a nível comercial não chegou a existir.

Entretanto, o interesse sobre o bio-PET de base 100% biológica não é exclusivo da PepsiCo. Desde 2011 a Coca-Cola Company também tem trabalhado formas de eliminar os 70% de base fóssil do bio-PET até então desenvolvido por ela (GATEWAY, 2011). O desafio passa a ser, portanto, a obtenção de ácido tereftálico de base biológica (PACHECO *et al.*, 2015; PANG *et al.*, 2016; SHELDON, 2014).

Com o objetivo de alcançar escala comercial, a Coca-Cola Company estabeleceu parcerias com empresas de biotecnologia com potencial de desenvolvimento de intermediários e rotas para produção de bio-ácido tereftálico e, portanto, do bio-PET 100% renovável (COCA-COLA, 2015b). Dentre elas, destacam-se empresas como Virent e Gevo (COCA-COLA, 2015a).

A Virent é uma start-up americana com foco na produção de combustíveis e químicos a partir de matéria-prima renovável, utilizando como tecnologia principal a catálise química. De forma geral, os produtos da Virent possuem característica *drop-in*, podendo substituir diretamente os produtos derivados fósseis amplamente utilizados

(DIGEST, 2014b). Em 2011 foi estabelecida uma parceria entre a empresa e a Coca-Cola Company, em que um acordo multimilionário foi firmado para fomentar o desenvolvimento e aumento de escala de uma planta de bio-p-xileno, comercializado sob o nome BioFormPX pela Virent. Assim, o BioFormPX produzido pela Virent poderia ser utilizado como precursor do ácido tereftálico renovável e, portanto, intermediário para a produção de garrafas 100% bio-PET, principal interesse da Coca-Cola (DIGEST, 2015g).

A Gevo, outra *start-up* parceira da Coca-Cola com sede nos Estados Unidos, também é reconhecida por desenvolver tecnologias de produção de bio-p-xileno. Entretanto, a rota de produção de p-xileno utilizada pela Gevo diverge daquela proposta pela Virent. No caso da Gevo, a tecnologia é baseada na produção de bio-p-xileno a partir da conversão de isobutanol, que por sua vez pode ser produzido a partir de etanol (MAGAZINE, 2014; PANG *et al.*, 2016; SHELDON, 2014) por rota biotecnológica. Da mesma forma que o BioFormPX, o p-xileno da Gevo também poderia ser utilizado na produção de bio-PET 100%.

Em 2014, após receber investimentos de outras empresas além da Coca-Cola e da Toray – grande empresa japonesa produtora de fibras, plásticos e químicos – para o desenvolvimento de p-xileno, a Gevo anuncia a produção em escala de demonstração deste químico a partir de isobutanol. Conforme acordo realizado com a empresa japonesa, a Toray teria prioridade de compra de p-xileno produzido pela planta demo para aplicações de fibras de bio-PET na indústria têxtil (DIGEST, 2104; MAGAZINE, 2014).

Além das parcerias até então descritas, outras parcerias também foram formadas com grandes empresas donas de marca (*brand owners*), visando o fomento da utilização de bio-PET 30% e também para a viabilização do bio-PET 100%. Dentre elas, destacam-se duas associações importantes: a cooperação com a H.J. Heinz Company e a criação da Plant PET Technology Collaborative (PTC), grupo comprometido em melhorar tecnologias de produção de bio-PET e difundir a utilização do polímero de base renovável (CBSR, 2017; COCA-COLA, 2013b).

Em 2011, a Coca-Cola iniciou uma parceria com a Heinz para a utilização do bio-PET 30%, licenciado pela empresa de bebidas, nos recipientes de ketchup da Heinz.

Segundo a Coca-Cola Company, o principal objetivo da parceria era acelerar o interesse e investimento dos fornecedores nas embalagens de PlantBottle (COCA-COLA, 2013a; PLASTICENGINEERINGBLOG, 2012). Além disso, em 2012 foi criado o grupo PTC composto por grandes marcas como a Ford Motor Company, a própria Heinz, a Nike e a Procter & Gamble (P&G), além da Coca-Cola, para avançar na comercialização e aumento de escala da produção de bio-PET (CBSR, 2017). Não obstante, os integrantes do PTC também direcionavam esforços de P&D para a obtenção de bio-PET 100% renovável em larga escala (COCA-COLA, 2013b).

Após 4 anos de investimento e trabalho em conjunto entre a Virent e a Coca-Cola e como resultado dos esforços das empresas na construção e expansão de uma planta de bio-p-xileno em escala de demonstração, em 2015 a Coca-Cola anuncia a PlantBottle 2.0, garrafa 100% de base biológica produzida a partir de BioFormPX, ainda em escala de demonstração (COCA-COLA, 2015a; DIGEST, 2014b, 2015a).

Ainda em meados de 2015, a Coca-Cola firmou também parceria com a Liquid Light – empresa desenvolvedora de tecnologias de produção de químicos a partir de CO₂ como matéria-prima – para acelerar o desenvolvimento de tecnologias de produção de MEG a partir de CO₂ e luz solar (DIGEST, 2014b; LIGHT, 2015; PANG *et al.*, 2016). Caso esta tecnologia realmente seja desenvolvida a nível comercial, o novo método tem potencial de reduzir tanto a pegada de carbono do bio-MEG quanto o custo de produção do monômero, otimizando a produção de PlanBottle (DIGEST, 2015a; PANG *et al.*, 2016).

Além destas principais iniciativas para o desenvolvimento de bio-PET – em grande parte iniciadas pela Coca-Cola – também foram observadas movimentações de outros grandes atores internacionais, produtores de PET convencional, em direção ao desenvolvimento de bio-PET (DIGEST, 2015g). Dentre elas, vale ressaltar a associação entre a Toray e a Gevo (como mencionado anteriormente) na produção de bio-PET 100%(MAGAZINE, 2014); a colaboração da Toyota-Tsusho com a China Manmade Fibers Corporation – empresa chinesa produtora de químicos – na produção e utilização de bio-PET 30% em carros Toyota e em garrafas d'água da marca também japonesa Suntory (TOYOTA-TSUSHO, 2013); e a recente colaboração entre Virent e a chinesa Far Eastern New Century (FENC) em 2016, para a produção

de fibras de bio-PET 100% renováveis e sua utilização na indústria têxtil (DIGEST, 2016d).

4.3 PEF

4.3.1 INTRODUÇÃO AO PEF

Além do bio-PET, uma outra alternativa renovável ao PET convencional é o polietileno furanoato (PEF). O PEF, assim como o PET, é um poliéster derivado de dois precursores: o MEG e FDCA, este último quimicamente semelhante ao ácido tereftálico utilizado na produção de PET (VAN BERKEL *et al.*, 2015).

Assim como há possibilidade de produção de MEG a partir de açúcares vegetais e biomassa, o FDCA também pode ser produzido de forma renovável. Desse modo, torna-se possível a produção de PEF 100% renovável (VAN BERKEL *et al.*, 2015). Diferentemente do bio-PET, entretanto, a polimerização de MEG e FDCA resulta em um polímero com estrutura química diferente do PET convencional (ainda que ligeiramente diferente), que traz consigo propriedades semelhantes, porém diferentes, das do PET, caracterizando-se como não *drop-in*.

Apesar de ainda não haver capacidade de produção em escala comercial, a Avantium (empresa desenvolvedora e produtora de PEF) afirma que o bioplástico possui propriedades superiores às do PET, fazendo do PEF um forte candidato a substituir seu análogo petroquímico. Apesar de superiores, suas propriedades continuam parecidas com as do PET, permitindo aplicações do novo polímero nos mesmos mercados já desenvolvidos para o PET (DIGEST, 2014).

4.3.2 SÍNTESE DE PEF

Para a produção de PEF também são necessários dois precursores. Contudo, conforme mencionado anteriormente, utiliza-se ácido furandicarboxílico (FDCA) em substituição ao ácido tereftálico para a produção de PEF. O segundo reagente, no entanto, também é o MEG (SHELDON, 2014).

Uma vez que o PEF e o FDCA têm ganhado atenção há pouco tempo, poucas rotas de produção foram desenvolvidas até o momento. A principal rota de produção de FDCA e, portanto, de PEF consiste naquela utilizada pela empresa desenvolvedora Avantium, conforme demonstrado na figura 23.

Nesta rota, o bio-MEG é produzido da mesma forma como é feito para o caso do bio-PET. No entanto, o FDCA é produzido a partir da oxidação catalítica do HMF, intermediário obtido por oxidação seguida de hidrogenação catalítica de açúcares C6 (SHELDON, 2014).

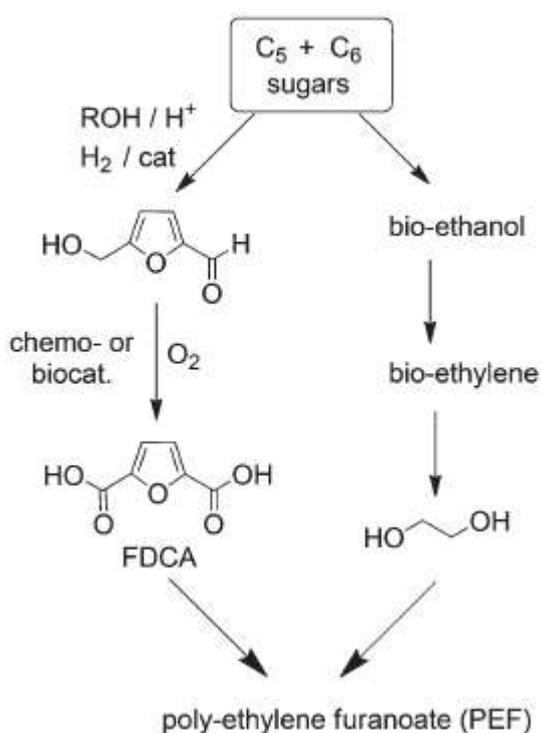


Figura 23. Síntese de PEF a partir de açúcares vegetais.

Fonte: Sheldon (2014).

Além disso, ao comparar a produção de PEF com a produção de PET, um outro detalhe deve ser considerado. Apesar de a produção de PET ser tipicamente realizada na presença de catalisadores a base de manganês, cobalto e germânio, o PEF utiliza catalisadores diferentes, uma vez que a presença destes compostos junto com o FDCA, provoca colorimento da resina final (DE JONG *et al.*, 2012).

4.3.3 PROPRIEDADES, APLICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE PEF

De acordo com De Jong *et al.* (2012), o PEF possui algumas propriedades diferentes das do PET. Por exemplo, o biopolímero é característico por possuir temperatura de transição vítrea maior que a do PET e temperatura de fusão mais baixa. Assim, nota-se que tais diferenças impactam na produção e processamento das resinas poliméricas, exigindo, portanto, equipamentos e condições de produção próprios ou adaptados para o PEF.

Além disso, segundo a Avantium (2017), as propriedades do PEF superam as propriedades do PET em alguns pontos, principalmente no que tange às propriedades de barreira. De acordo com os estudos realizados pela empresa, o PEF é considerado barreira 10 vezes, 4 vezes e 2 vezes melhor que o PET para oxigênio, CO₂ e água, respectivamente. Isso faz com que além de possuir melhor performance na aplicação do plástico em garrafas, o mesmo tenha potencial de ser usado em outras aplicações, como embalagem para bebidas com mais alto nível de gaseificação, como a cerveja. No entanto, assim como o PET, o PEF pode ser considerado por sua alta rigidez, leveza, transparência e não biodegradabilidade (DE JONG *et al.*, 2012).

Dessa forma, o PEF também possui potencial para ser utilizado nas mesmas aplicações que o PET, uma vez que suas propriedades são semelhantes e até superiores, dependendo da aplicação desejada. De acordo com a principal produtora de PEF, o material pode ser utilizado para a fabricação de filmes, bandejas e copos para comida e bebida. Além disso, as fibras de PEF também podem ser utilizadas para a fabricação de roupas e carpetes, entre outros produtos. No entanto, a principal aplicação pretendida para o PEF é, de fato, a produção de garrafas de bebidas – maior mercado para o PET atualmente (AVANTIUM, 2017).

Quanto ao processamento do biopolímero, apesar de a pequena escala de produção (piloto), espera-se – por suas propriedades semelhantes às do PET – que os métodos de processamento sejam similares, porém com adaptações de acordo com as condições ótimas para o biopolímero.

4.3.4 RECICLAGEM DE PEF

Como mencionado, diferentes plásticos com diferentes propriedades costumam exigir métodos e condições diferentes de reciclagem. Dessa forma, considerando as características do PEF, é natural que a reciclagem do biopolímero seja melhor realizada em condições diferentes daquelas aplicadas ao PET. Assim, caso o PEF seja descartado da mesma forma que os resíduos de PET, de modo entrar na cadeia de reciclagem deste polímero, pode haver prejuízo na reciclagem do PET, fazendo do PEF um contaminante.

Entretanto, de acordo com nota publicada pela *European PET Bottle Platform* (EPBP) – iniciativa voluntária reunindo organizações industriais representando coletores de recicladores de plástico, produtores de PET e donos de marca – é possível o descarte de garrafas de PEF junto ao sistema de recuperação de PET (GREENCHEMICALSBLOG, 2017).

De acordo com o anúncio, ainda que haja diferença entre as propriedades do PET e do PEF, a capacidade planejada para produção de PEF pela Synvina – JV voltada para a produção de PEF – representa uma penetração de 2% do PEF no mercado de PET, passível de ser absorvida pela rede de reciclagem de PET sem grandes problemas associados. No entanto, a médio prazo, caso a capacidade produtiva ultrapasse a planejada pela JV, será necessário o estabelecimento de rede de reciclagem própria para o PEF (GREENCHEMICALSBLOG, 2017).

4.3.5 HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DO PEF

O PEF foi patenteado pela primeira vez em 1946, 5 anos após a primeira patente do PET, pela empresa americana Celanese Corporation – envolvida na produção de químicos, indústria têxtil e de plásticos. Desde então, nesses mais de 70 anos de existência, diversas metodologias de produção a condições de temperatura e pressão diferentes foram experimentadas (DE JONG *et al.*, 2012).

Conforme descrito anteriormente na seção 4.2.2, o composto FDCA é obtido a partir da oxidação catalítica do HMF. No entanto, até meados da década passada não se

conseguia sintetizar este precursor do PEF em larga escala. Acontecia que a maior barreira para a síntese de HMF era sua baixa estabilidade sob condições ácidas, necessárias para sua formação. No século passado, duas tentativas de produção de HMF em escala piloto se sucederam, entretanto, ambas mostraram-se comercialmente inviáveis (EERHART; FAAIJ; PATEL, 2012).

Até que em 2006, a empresa holandesa Avantium foi capaz de avançar na produção de HMF. A nova tecnologia baseia-se na utilização de etanol como solvente, de forma a evitar a decomposição de compostos furânicos após sua formação. Além disso, a Avantium empregou sua tecnologia de catálise heterogênea já desenvolvida para otimizar o processo de produção de HMF (DIGEST, 2015c; EERHART; FAAIJ; PATEL, 2012). A partir de então, com a tecnologia XYX de produção dos químicos furânicos plataforma a partir de açúcar vegetal, a viabilidade técnica para produção de PEF passou a se tornar uma realidade cada vez mais próxima.

Apesar de já conhecido desde a década de 40 e agora com a nova tecnologia para obtenção de FDCA, o interesse no PEF não cresceu imediatamente. No entanto, o compromisso observado em prol do desenvolvimento do bio-PET no fim da década de 2000, estimulou a investigação do PEF como um possível substituto renovável para o PET convencional. Uma vez que a cadeia de produção de MEG renovável já era realidade e se mostrava possível em escala comercial, o PEF 100% renovável também poderia entrar na competição (STORZ; VORLOP, 2013). Contudo, o maior limitante para a produção de PEF em larga escala era, ainda, a quantidade de FDCA disponível em mercado.

Assim, em 2011, 2 anos após o lançamento da primeira PlantBottle pela Coca-Cola, a Avantium anunciou o início da construção de uma planta piloto para produção de FDCA em Geleen, na Holanda. A operação se iniciou já no ano seguinte e a planta piloto, desde então, tem apresentado resultados de acordo com o esperado, segundo a empresa (DIGEST, 2014a).

No mesmo ano em que a planta piloto foi inaugurada, novos parceiros interessados nos químicos plataforma produzidos pela Avantium surgiram. A NatureWorks, *joint venture* focada na produção de PLA, e a Teijin Aramid, ramificação da Teijin voltada para a indústria têxtil, associaram-se à Avantium com o intuito de desenvolverem

novos materiais a partir das plataformas obtidas pela tecnologia XYX. Não obstante, no que tange ao PEF, ainda em 2012 a Avantium anunciou acordos de desenvolvimento em conjunto para o desenvolvimento de garrafas a base de PEF com a Danone e Coca-Cola (DIGEST, 2014a). Assim como o bio-PET, o PEF representa mais uma alternativa sustentável às garrafas de PET convencional.

Em 2013, a Avantium e a ALPLA – empresa austríaca e umas das líderes globais na transformação de plásticos para embalagens – anunciaram parceria de desenvolvimento em conjunto de garrafas PEF. Ao contrário da Coca-Cola, interessada na aplicação para armazenamento de bebidas gasosas, o objetivo da ALPLA era a produção de garrafas PEF voltadas para embalagem de produtos de higiene pessoal e domiciliar, como cosméticos e detergentes, e para aplicações em embalagens de alimentos (DIGEST, 2013). De acordo com a Avantium, a parceria com a ALPLA, por seu histórico e *know-how* na produção e desing de garrafas, passaria a ser o principal fator contribuinte para a aceleração do desenvolvimento e comercialização de PEF, assim como criação de uma cadeia de fornecimento para viabilização do PEF como embalagem sustentável (AVANTIUM, 2013).

Com a popularidade crescente do PEF e de acordo com a estratégia da Avantium de viabilizar o lançamento e comercialização de garrafas a base de PEF, a detentora da tecnologia XYX anunciou em 2014 o plano de construção e operação da primeira fábrica de FDCA em escala comercial. De acordo com a empresa, a construção de uma planta com capacidade de produção de 50.000 ton/ano de FDCA já estava programada para o início de 2016 (DIGEST, 2015b).

Após esse anúncio, já em 2015 a Avantium e a Mitsui, assinaram um acordo para a comercialização de FDCA e PEF na Ásia, garantindo à Mitsui a compra de grandes quantidades de FDCA produzidos pela primeira planta comercial da Avantium. O acordo previa o lançamento de filmes a base de PEF na Ásia como um todo e a produção e comercialização de garrafas de PEF no Japão (DIGEST, 2015c).

De acordo com a Avantium, o mercado japonês seria um bom ambiente para a exploração das propriedades de alta performance do PEF e criação de novos produtos a base do biopolímero. Além disso, ambas as empresas já vislumbravam as

Olimpíadas de Tokyo 2020 como grande oportunidade de difusão dos novos materiais (DIGEST, 2015c).

Em 2016, a Avantium anunciou uma nova parceria, com a Toyobo – empresa japonesa do ramo têxtil – para a produção de filmes finos poliméricos a partir de PEF. A intenção era aplicar os novos produtos em embalagens de alimentos, aplicações em eletrônica e em embalagens industriais ou médicas. A parceria também visa explorar as propriedades mecânicas e de barreira ditas superiores ao do PET convencional (DIGEST, 2016c).

Ainda em 2016 mais um grande player entra em jogo. Dessa vez, a BASF – líder mundial na produção de químicos, plásticos e produtos de alta performance – anuncia a criação da *joint venture* com a Avantium, chamada Synvina, para a produção e marketing do PEF e FDCA, a partir de matéria-prima renovável (DIGEST, 2015d). A nova *joint venture* usará a tecnologia XYX desenvolvida e já utilizada pela Avantium em sua planta piloto para a produção de FDCA. A JV também será responsável pela construção e operação da nova planta de FDCA em escala comercial planejada para ser construída em área industrial pertencente à BASF, na Bélgica (DIGEST, 2016a, b; MAGAZINE, 2016).

De acordo com as empresas envolvidas, a missão da Synvina é estabelecer posições de liderança mundial tanto na produção de FDCA quanto na produção de PEF (SYNVINA, 2017). Além disso, após a viabilidade desses dois produtos em escala comercial, também faz parte da estratégia da Avantium o licenciamento da tecnologia utilizada para produção industrial em escala comercial (DIGEST, 2016a, b; MAGAZINE, 2016).

Dessa forma, a nova JV combina a tecnologia desenvolvida pela Avantium, que possibilitou a produção de FDCA e de PEF, e a experiência e know-how da BASF na produção de polímeros, produção em larga escala e desenvolvimento de mercado para novos produtos químicos e plásticos (DIGEST, 2016a, b; MAGAZINE, 2016).

Este ano, como mais uma prova da expectativa de mercado que tem se criado em relação ao PEF, foi lançado um projeto de €25 milhões (aproximadamente R\$95 milhões) da União Europeia chamado “PEference”. O projeto, dirigido pela Synvina,

tem previsão de 5 anos de cooperação entre os participantes para o estabelecimento de uma cadeia de valor para o FDCA e para o PEF. O projeto tem como participantes 11 empresas de 8 países da União Europeia e inclui: Synvina, BASF, Tereos Participations (setor de agronegócio), Alpla Werke Alwin Lehner, OMV Machinery (transformador de plástico), Croda Nederland (setor de químicos), Nestec (consultora ambiental), Lego System (usuário final, setor de entretenimento), nova-Institut für politische und ökologische Innovation (instituto focado em bioeconomia) e Spinverse Innovation Management (consultoria especializada em inovação) (DIGEST, 2017).

Apesar do desenvolvimento da tecnologia de produção do PEF, o biopolímero ainda possui dificuldades no que tange à sua reciclagem. Este ano, no entanto, conforme mencionado no capítulo de revisão bibliográfica, a EPBP aprovou a reciclagem do PEF produzido pela Synvina em conjunto com o PET, no sistema de reciclagem já existente deste último. De acordo com a EPBP, ainda que haja diferença entre as propriedades do PET e do PEF, a capacidade planejada para produção de PEF pela Synvina – JV voltada para a produção de PEF – representa uma penetração de 2% do PEF no mercado de PET, passível de ser absorvida pela rede de reciclagem de PET sem que grandes problemas associados (GREENCHEMICALSBLOG, 2017; MAGAZINE, 2017).

Capítulo 5

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a discussão a respeito dos bioplásticos estudados no capítulo anterior e seus desenvolvimentos na indústria dos plásticos. Para isso, considerou-se como base teórica de análise a literatura a respeito de transição sócio-técnica sob a perspectiva multinível. Como dimensões de análise, conforme descrito no capítulo de metodologia, foram selecionadas a natureza do bioplástico, a tecnologia utilizada em sua produção, os atores envolvidos no desenvolvimento do mesmo e características do nicho, do regime e da paisagem do SST. Ao final do capítulo, faz-se uma comparação do cenário de desenvolvimento dos 3 bioplásticos em conjunto.

Desde o início da década de 1930, o SST dos plásticos já estava estabelecido, com grandes empresas químicas como a Du Pont, a Dow, a Union Carbide e Standard Oil dominando o mercado. No momento pós II Guerra Mundial (II GM), o setor dos plásticos evoluía progressivamente, com taxas de crescimento em torno de 15% ao ano (ERICKSON, 2006; FREINKEL, 2011). O plástico era, então, visto como uma solução para os problemas de escassez deixados pela IIGM e tinha seu consumo incentivado.

Após a Guerra a oferta de carvão para a produção de plásticos havia se tornado insuficiente e o acesso às gigantes reservas de petróleo barato mostrava-se a principal fonte de matéria-prima para a indústria dos plásticos (COUNCIL, 2017; ERICKSON, 2006). As principais tecnologias de produção de plástico passaram a considerar o petróleo como matéria-prima e, aos poucos, o regime do SST dos plásticos se consolidou, junto com o desenvolvimento da indústria petroquímica.

Atualmente, o regime do SST dos plásticos ainda continua estruturado da mesma forma: seus principais atores estão envolvidos na cadeia petroquímica, desde a extração do petróleo como matéria-prima até os transformadores dos plásticos e

usuários finais do produto plástico; a tecnologia utilizada pelo regime é fortemente pautada em processos químicos, seja para a transformação da matéria-prima e produção dos químicos básicos que servem de base para os polímeros ou para a reação de polimerização em si; e os produtos do regime continuam sendo as resinas poliméricas convencionais, derivadas de matérias fósseis, e produzidas em larga escala - com produção anual acima de 311 milhões de toneladas ao ano.

Ao que tudo indica, entretanto, observam-se esforços em direção a transição no regime acima descrito. A partir dos estudos de caso apresentados no capítulo 4, referentes aos bioplásticos PLA, bio-PET e PEF, é possível identificar padrões no desenvolvimento dos biopolímeros semelhantes aos padrões descritos por Geels *et al* (2016) e Geels e Schot (2007) na análise da transição de outros SST.

Nesta análise, consideram-se nichos os espaços de desenvolvimento tecnológico protegidos das regras de seleção e de mercado impostas pelo regime do SST. Neles é que são desenvolvidas novas tecnologias (como a utilização de matéria-prima renovável), produtos (bioplásticos) e aplicações sem que precisem imediatamente ser competitivos (em custo e em aplicações) com aqueles já incumbentes do regime. No que tange ao nicho do SST dos plásticos, as tecnologias e produtos desenvolvidos são ainda de baixa escala, se comparada aos plásticos convencionais. Nos nichos também são criadas redes de suporte às inovações para desenvolvimento da cadeia de produção e consumo destas (GEELS, 2002, 2004).

O presente trabalho considera que uma das inovações desenvolvidas nos nichos do SST dos plásticos são os bioplásticos, como produtos inovadores. Dessa forma, considera-se que os principais atores presentes nos nichos são aqueles envolvidos no desenvolvimento e produção de bioplásticos, assim como de seus precursores. Além disso, as tecnologias utilizadas no nicho, como será visto posteriormente, podem ou não ter origem nas bases de conhecimento provenientes do regime dos plásticos.

Por sua vez, estão inclusos na paisagem do SST dos plásticos aspectos regionais ou globais, que abrangem e influenciam simultaneamente a estrutura do SST em questão, assim como outros SST. Nos estudos de caso analisados, verifica-se pressões de seleção exercidas pela paisagem sobre o regime incumbente sob a forma de tendências ditadas por políticas, acordos internacionais, preferências sociais ou

pelo mercado. Como exemplos, observam-se a tendência pela redução da dependência da indústria em relação às matérias-primas fósseis – haja vista possíveis variações no preço do petróleo, assim como a tendência de redução de impactos ambientais em processos produtivos industriais.

A seguir, os estudos de caso serão discutidos individualmente para cada bioplástico estudado e, em seguida, uma análise em conjunto a respeito dos bioplásticos e possíveis caminhos de transição é realizada.

5.1 PLA

De acordo com Farah, Anderson e Langer (2016) e Lunt (1998), o início do desenvolvimento do PLA ocorreu por iniciativa da Du Pont, empresa de grande porte com importante papel no regime dos plásticos desde aquela época, no início dos anos 50. No entanto, naquele momento o novo produto ainda apresentava instabilidade em ambientes úmidos (LUNT, 1998), o que dificultava sua aplicação e comercialização. Mesmo assim, o produto continuou a ser desenvolvido em seu nicho – com aperfeiçoamento da tecnologia, protegido das pressões de seleção do regime, e com baixa escala de produção.

Na década de 70, as crises do petróleo funcionaram como fortes pressões de seleção provenientes da paisagem e incidentes sobre o regime dos plásticos. O custo de produção de produtos químicos e plásticos sofreu grande elevação, em decorrência do aumento do valor do petróleo nesta década, causando certa instabilidade no regime dos plásticos e evidenciando sua dependência em relação à matéria-prima fóssil. A partir desta percepção, iniciou-se a preocupação em relação à utilização de fontes alternativas para a produção dos químicos já amplamente utilizados. Dentre as potenciais fontes, observou-se tendências apontando na direção de recursos renováveis como potenciais substitutos dos materiais fósseis.

O PLA, portanto, sendo produzido a partir de recursos renováveis poderia ser um substituto em potencial. Entretanto, ainda naquele momento, o biopolímero não estava suficientemente desenvolvido para ser aplicado e comercializado, possuindo tanto desafios tecnológicos para sua produção quanto desafios de mercado, como

viabilidade econômica e produção em larga escala. Apesar disso, a tendência criada pela paisagem incentivou o interesse pela redução da dependência da indústria química em relação às fontes fósseis e fomentou o desenvolvimento de novas tecnologias de produção a partir de materiais alternativos e renováveis em geral.

Ainda como reflexo desta pressão da paisagem causada pelas crises do petróleo, ao final da década de 80 nascia o projeto de desenvolvimento de PLA pela Cargill, empresa do ramo de agronegócio tradicionalmente externa ao SST dos plásticos. Desde então, o desenvolvimento do PLA continuou sob responsabilidade da Cargill, isolado da competição com os plásticos convencionais. Ao mesmo tempo em que a tecnologia de produção do PLA era desenvolvida e otimizada, a Cargill buscava pela melhoria das propriedades do produto, desenvolvimento de novas aplicações, assim como pela criação de rede de parceiros para apoiar o *scale-up* e viabilização comercial do biopolímero.

Ao final da década de 1990, houve pela primeira vez a união de uma empresa incumbente no regime dos plásticos à Cargill, nova entrante no SST, para a produção de PLA. Em 1997 Dow Chemical Co e Cargill, anunciaram a formação de uma *joint venture* voltada para a produção e comercialização de PLA (JAMSHIDIAN *et al.*, 2010).

Nesse momento, apesar de o PLA ainda não apresentar vantagem competitiva em custo em relação à maioria dos plásticos convencionais, duas características do biopolímero atribuiu grande potencial de crescimento no mercado dos plásticos: ser biodegradável e ser produzido a partir de fontes renováveis. Isso fazia do PLA uma possível solução para o regime dos plásticos que começava a ser pressionado por políticas voltadas para o meio ambiente e de redução de gases de efeito estufa, como o Protocolo de Quioto ao final dos anos 1990.

Com a entrada da Dow – empresa de grande porte e representativa no regime – no desenvolvimento de PLA, a Cargill, até então com pouca experiência no regime SST dos plásticos, teve a oportunidade de acessar o *know-how* da petroquímica e também suas redes de parceiros comerciais, na expectativa de impulsionar a difusão do PLA no mercado dos plásticos. Verifica-se nesse momento, grande investimento de um

player importante do regime em uma inovação sendo desenvolvida no nicho, o que dava maior credibilidade para a imagem e futuro do PLA no mercado.

Entretanto, não bastou o apoio de um importante ator do regime para o sucesso do PLA. Como pode ser observado no estudo de caso, houve grande esforço da NatureWorks no desenvolvimento de diversas parcerias para garantir a adoção e o consumo do bioplástico, já produzido em escala comercial. Como exemplos, verificam-se parcerias com atores do setor médico-cirúrgico, como a parceria com a ZimmerBiomet, e com atores do setor de alimentos para a utilização de embalagens diversas a base de PLA, dentre eles o Walmart e a Danone - este último com aplicações problemáticas para a imagem do PLA devido à acusação de *greenwashing* por parte da Danone.

Nesse momento, havia uma tendência de mercado, no que tange aos bioplásticos, pela utilização de materiais biodegradáveis, haja vista a preocupação crescente com a poluição gerada pelo consumo de plásticos, presente na paisagem. Assim, pelas parcerias estabelecidas com *end users* no início dos anos 2000, a principal estratégia utilizada para o marketing do PLA era o fato de o mesmo ser biodegradável, ainda que em condições específicas – como pode ser observado pela tabela 3 da seção 4.1.

Apesar de o mercado de PLA apresentar crescimento, a própria Dow admitiu a dificuldade de difusão do bioplástico e decidiu retirar sua participação da NatureWorks. Em seguida, há a associação da Teijin, outra empresa incumbente no regime do SST dos plásticos, à NatureWorks. De acordo com a Teijin, a participação na NatureWorks fazia parte de sua estratégia sustentável, impulsionada pelas tendências cada vez mais fortes em prol da sustentabilidade, provenientes da paisagem. Observa-se assim, tanto por parte da Dow quanto por parte da Teijin, um processo de experimentação da inovação do PLA presente no nicho por atores estabelecidos no regime.

Já no fim da década de 2000, o foco na utilização de bioplásticos parecia outro, a perceber pelas diferentes estratégias de marketing dos consumidores diretos de PLA. Como pode ser notado pela tabela 4 da seção 4.1, agora o PLA vinha sendo vendido principalmente por sua característica renovável e de redução de impactos ambientais, caracterizando uma redução na tendência do interesse em materiais biodegradáveis.

Pouco depois da associação da Tejin, a mesma declara sua saída da NatureWorks. Esta, no entanto, mantém parte de seus negócios no desenvolvimento de PLA, porém internamente. Novamente, apenas alguns anos após a saída da Teijin, há a associação da PTTGC – outra empresa do regime – à NatureWorks, que permanece associada até o momento atual.

Dessa forma, mesmo que a cadeia *upstream* de fornecimento de matéria-prima e de ácido láctico já estivesse bem desenvolvida pela Cargill – possibilitando viabilidade produtiva em larga escala – a partir das associações com *players* do regime se observa ainda a necessidade de desenvolvimento da cadeia *downstream* de consumo e distribuição do PLA, a fim de se superar o problema de difusão do mesmo no mercado.

No caso da segunda maior empresa envolvida na produção de PLA, a Corbion, a história se desenvolveu de forma parecida. O desenvolvimento da tecnologia de produção de PLA utilizada pela Corbion foi desenvolvida e patenteada por ela mesma, localizada externamente ao SST dos plásticos, assim como a tecnologia utilizada pela NatureWorks havia sido desenvolvida pela Cargill. Vale ressaltar que a tecnologia da Corbion destaca-se pela não geração de gesso como subproduto, de forma a ser considerada ambientalmente mais eficiente que aquela utilizada pela NatureWorks.

No entanto, após a Corbion já ter a tecnologia desenvolvida para atuar diretamente na produção de PLA, ocorre sua associação com a Total, empresa petroquímica do regime dos plásticos, no lançamento da *joint venture* Total Corbion PLA, futura produtora do bioplástico. Da mesma forma que aconteceu com a NatureWorks, percebe-se a importância do apoio de atores do regime, com experiência e *know-how* do regime incumbente, na tentativa de difusão do bioplástico, mesmo após a tecnologia já ter sido desenvolvida.

Dessa forma, pode-se perceber que ao longo da evolução do PLA, os períodos de maior desenvolvimento foram precedidos de pressões de seleção da paisagem, seja em prol da redução da dependência das matérias fósseis, seja visando a redução de emissão de GEEs e também quanto à preocupação com a poluição gerada pelo consumo intensivo de plásticos. Além disso, é importante notar também que até mesmo a forma como o biopolímero era anunciado mudou de acordo com as

tendências advindas da paisagem e do próprio regime, haja vista a baixa difusão do PLA após a valorização de sua biodegradabilidade nas primeiras campanhas de marketing.

A partir do estudo de caso para o desenvolvimento do PLA, pode-se consolidar um quadro descritivo resumido dividido em 3 dimensões principais: a natureza do bioplástico, a tecnologia utilizada e os atores envolvidos. O quadro está representado pela tabela 6.

Tabela 6.Quadro descritivo para o desenvolvimento do PLA.

Dimensão de análise	Observação
Natureza do bioplástico	Bioplástico não <i>drop-in</i> de base 100% renovável; produzido a partir de açúcares vegetais provenientes do milho; possui inúmeras aplicações em diferentes mercados, variando desde embalagens para alimentos frescos a aplicações na indústria têxtil, agrícola e biomédica.
Tecnologia utilizada	Utiliza fermentação para transformação da matéria-prima em ácido láctico (base de conhecimento externa ao regime plásticos) e catálise química para a polimerização deste a PLA; apenas duas tecnologias de produção principais e disponíveis em escala comercial; tecnologias de reciclagem ainda em desenvolvimento.
Atores envolvidos	Atores do SST de agronegócio e alimentos (externos ao SST dos plásticos) dedicados ao desenvolvimento da tecnologia de produção; houve associações de atores incumbentes no regime dos plásticos para a difusão e aceleração do consumo de PLA.

Analisando-se a natureza do produto, percebe-se que o PLA é bem diferente dos plásticos convencionais, que atualmente dominam o regime. O PLA é 100% renovável - oriundo de açúcares vegetais como matérias-primas - e biodegradável. Pode-se

imaginar que, da mesma forma que os demais bioplásticos analisados, tais características sejam as principais responsáveis pelos esforços em seu desenvolvimento, haja vista as pressões de seleção da paisagem.

Além disso, para a obtenção de matéria-prima, é necessária a criação de uma estrutura diferente daquela já estabelecida no regime dos plásticos. Os fornecedores de matéria-prima para o PLA não são os mesmos envolvidos na extração e refino de petróleo, presentes no regime do SST dos plásticos. Pelo contrário, os fornecedores para a produção de PLA estão presentes no SST de agronegócio. Mostra-se, portanto, necessária a criação de relações com atores de outros SST. Não obstante, a longo prazo, caso o PLA e outros bioplásticos tenham uma participação maior no regime do SST dos plásticos, deve ser considerada uma alteração na estrutura original do regime com a inclusão de novos fornecedores e atores provenientes de outro SST, como do SST de agronegócio.

O PLA também possui propriedades intrinsecamente diferentes dos plásticos convencionais, exigindo processamento diferenciado e caracterizando-se como não *drop-in*. A grande dificuldade de difusão do PLA no mercado pode estar atribuída ao seu carácter não *drop-in* e suas propriedades novas, em relação aos plásticos convencionais. Por não possuir análogo fóssil, os esforços de difusão do PLA naturalmente precisam envolver toda a construção da cadeia de produção, utilização e destinação de um novo plástico. Tais esforços mostram-se evidentes ao se analisar a quantidade de aplicações desenvolvidas para este bioplástico, assim como as diversas associações com *end users* e *brand owners*. Vale destacar que o papel dos *end users*, presentes no regime, também é importante na difusão do PLA e que esforços no sentido de conquistá-los também devem ser realizados, uma vez que durante o histórico de desenvolvimento do PLA não se observa iniciativas dos *end users* em busca da aceleração do PLA no mercado, como ocorre por atores produtores de plásticos do regime (Dow e Teijin).

No que tange à tecnologia de produção do PLA, percebe-se a utilização de fermentação para a transformação de matéria-prima e produção de ácido láctico, com pouco aproveitamento das tecnologias disponíveis no regime do SST dos plásticos. Conforme mencionado anteriormente, a utilização de biotecnologia não se faz comum no regime do SST dos plásticos, fazendo-se necessário o acesso a novas bases de

conhecimentos localizados em outros SST - como o SST de agronegócio. Talvez, por essa razão, o desenvolvimento da tecnologia tenha ocorrido por atores de outro SST, com maior familiaridade tanto com a matéria-prima agrícola quanto com o tipo de tecnologia utilizada. Além disso, a produção de grandes quantidades de gesso (passivo ambiental) – até o desenvolvimento da tecnologia *gypsum free* da Corbion – também pode ter dificultado a difusão do bioplástico, uma vez que a geração do passivo ambiental tem impacto negativo sobre o ciclo de vida do PLA.

Em relação ao processamento do PLA, como mencionado anteriormente, devido às diferentes propriedades do bioplástico, faz-se necessária a adaptação das máquinas existentes para que seja possível o processamento adequado do biopolímero. O mesmo deve ser considerado para a análise da reciclagem do PLA.

Uma vez que a tecnologia de produção de PLA já está desenvolvida a nível comercial, percebe-se que um dos maiores desafios para a disseminação do biopolímero consiste na conquista de mercado e no estabelecimento de redes de suporte para o maior consumo do mesmo. Além disso, haja vista o interesse da NatureWorks no desenvolvimento de outras rotas de produção de ácido láctico, como o desenvolvimento de nova rota partir de fermentação de CH₄, pode-se pensar que outro desafio importante para a maior difusão do PLA é a competitividade em custo com os demais polímeros.

Observa-se, durante o histórico de desenvolvimento do PLA, esforços no estabelecimento de relações com atores incumbentes do regime para a superação deste desafio. Apesar de os atores dedicados ao desenvolvimento da tecnologia estarem primariamente posicionados em um SST diferente daquele dos plásticos, percebe-se o relacionamento simbiótico entre esses atores novos entrantes no SST e atores incumbentes ao regime do SST dos plásticos em prol do avanço da produção de PLA. Mesmo com o PLA representando alguma ameaça aos plásticos já estabelecidos no regime, a postura de alguns atores do regime – ao investir capital e esforços na introdução do PLA ao mercado de plásticos – durante todo o histórico de desenvolvimento do biopolímero era de apoio, construindo relações simbióticas. No entanto, não se nota a postura de atores do regime como figuras de liderança no desenvolvimento do PLA, mas sim da Cargill e da Corbion, atores novos entrantes.

É também importante ressaltar que, durante o desenvolvimento do PLA, na tentativa de consolidação do PLA no mercado dos plásticos, além das parcerias *upstream* mencionadas para o desenvolvimento e produção do PLA, diversas parcerias com empresas *brand owners* também foram e continuam sendo realizadas no *downstream*. A quantidade e diversidade de aplicações para o PLA – em contraste com polímeros já estabelecidos como o PET – já é um indicativo do esforço da difusão do novo plástico não *drop in* no mercado.

Segundo Geels e Schot (2007), um dos caminhos possíveis de transição do regime de um SST é o caminho de reconfiguração. Este ocorre quando inovações desenvolvidas nos nichos são absorvidas pelo regime de forma simbiótica, geralmente para a resolução de problemas no regime incumbente, sem que haja pressões muito fortes provenientes da paisagem. A partir desta adoção, novas pressões da paisagem desencadeiam transformações na estrutura regime.

Analisando-se o caso do PLA, pode-se pensar que o desenvolvimento do PLA como bioplástico tem se assemelhado ao caminho de reconfiguração para a transição do regime do SST dos plásticos. Principalmente ao longo do desenvolvimento da NatureWorks, é evidente a relação de simbiose entre os atores do regime e as inovações da produção de PLA do nicho, de forma a agregá-las ao regime e ceder às pressões e tendências ambientais provenientes da paisagem. Além disso, tais agregações, a longo prazo, também configurariam uma nova estrutura ao regime para tornar possível a produção do PLA. Dessa forma, sob o ponto de vista do PLA, pode-se pensar que a transição do SST dos plásticos se inicia como um caminho de reconfiguração, conforme descrito por Geels *et al.* (2016) e Geels e Schot (2007).

5.2 BIO-PET

Diferentemente do PLA, o interesse pelo bio-PET é recente, datando de pouco antes de 2009. Em 2009, o biopolímero já estava disponível em escala comercial, expandindo-se rapidamente sob a forma da PlantBottle, desenvolvida pela Coca-Cola Company – um dos maiores clientes do PET convencional presente no regime do SST dos plásticos.

Conforme mencionado para o PLA, entre 1970 e 2009, diversos acontecimentos a nível global influenciaram a paisagem do SST dos plásticos a exercer pressões (ainda que moderadas) de seleção sobre o regime, criando tendências para o desenvolvimento de plásticos *biobased*. Ao longo do desenvolvimento do PLA, pode-se perceber a influência de tendências a favor da redução do uso de matérias-primas fósseis, assim como em vista da diminuição de impactos ambientais na produção de plásticos, com efeitos sobre o ritmo de desenvolvimento do PLA. No entanto, durante o desenvolvimento do bio-PET, pode-se perceber tais pressões de forma acumulada, levando os atores do regime à busca por novas alternativas, a fim de estarem conforme as novas demandas da paisagem – como a redução da dependência do petróleo e busca por métodos produtivos mais sustentáveis.

O bio-PET surgiu como uma iniciativa da Coca-Cola, que buscava soluções como resposta às pressões da paisagem, como métodos de produção mais sustentáveis para garrafas utilizadas como embalagens de seu produto principal: bebidas gaseificadas ou não. Apesar de a empresa não estar envolvida diretamente na produção de polímeros como o PET, sua presença global assim como sua força como cliente do regime do SST dos plásticos, permitiram o estabelecimento de uma nova rota de produção de garrafas, porém de forma mais sustentável.

Inicialmente, o objetivo da empresa de bebidas era a produção de garrafas a base de bio-PET 30% renovável. Para isso, era necessário que fosse estabelecida uma rede de suprimentos e distribuição do monômero MEG – utilizado na produção de PET – derivado de matéria-prima renovável. A partir desse monômero seria realizada a reação de polimerização junto do outro monômero (ácido tereftálico) proveniente do petróleo para a produção de bio-PET 30%.

Para esse fim, a Coca-Cola estabeleceu parcerias com a India Glycols, - empresa produtora de bio-MEG para aplicações no setor médico e alimentício e, portanto, externa ao regime do SST dos plásticos - capaz de produzir bio-MEG em escala industrial a partir de rotas biotecnológicas desde 1989.

Para atender à demanda de bio-PET 30% imposta pela própria empresa, também foi necessária a elaboração de uma cadeia de suprimento de bio-etanol, necessário para a produção de bio-MEG e também a formação de parceria com o transformador dos

monômeros a polímero, no caso, a Indorama - empresa do regime do SST dos plásticos produtora de PET fóssil.

Uma vez formada a cadeia de produção de bio-PET 30%, praticamente todo o biopolímero produzido era consumido para a fabricação das garrafas PlantBottle da Coca-Cola. A produção do bioplástico, no entanto, ainda não era suficiente para suprir toda a demanda, que estipulava metas crescentes para a utilização de bioplásticos na embalagem de seus produtos – como a substituição de garrafas PET por garrafas de bio-PET até 2020.

Apesar de apresentar bons resultados quanto à redução da emissão de GEEs com as garrafas de bio-PET até 30% renovável, a Coca-Cola também apostava em outras soluções. Nesse sentido, 2 anos após o lançamento da PlantBottle, a Coca-Cola já possuía projetos para o desenvolvimento de garrafas PET 100% renováveis, ou seja, produzidas a partir de bio-PET de base 100% biológica. Por parte da Coca-Cola, observa-se nesse momento, novas parcerias com as empresas Gevo e Virent (externas ao SST dos plásticos, provenientes do SST de químicos intermediários) desenvolvedoras de rotas biotecnológicas de produção de bio-p-xileno para a produção de bio-ácido tereftálico.

Além disso, parcerias com outras empresas donas de marca também clientes no regime do SST dos plásticos foram realizadas com o intuito de acelerar a difusão do bio-PET e o desenvolvimento do bio-PET 100%, como a criação do grupo PTC. Assim, já em 2015, a Coca-Cola anuncia pela primeira vez a produção da PlantBottle 2.0, produzida a partir de bio-PET 100% renovável. A produção em escala comercial desta nova garrafa, no entanto, ainda não se encontra disponível.

Além da Coca-Cola, nesse período, observa-se também esforços de outras empresas incumbentes no regime do SST dos plásticos (produtoras de plástico ou não) em prol do desenvolvimento do bio-PET. Exemplos são a Toray, produtora de PET convencional, que em 2014 já era capaz de produzir fibras bio-PET a partir de bio-PX desenvolvido pela Gevo, e a Heinz e a Ford, como utilizadoras de bio-PET em suas embalagens de ketchup e interior de carros, respectivamente.

A partir do estudo de caso para o desenvolvimento do bio-PET, também pode-se consolidar um quadro descritivo resumido dividido em 3 dimensões principais: a natureza do bioplástico, a tecnologia utilizada e os atores envolvidos. O quadro está representado pela tabela 7.

Tabela 7. Quadro descritivo para o desenvolvimento do bio-PET.

Dimensão de análise	Observação
Natureza do bioplástico	Bioplástico <i>drop-in</i> até 30% ou 100% renovável; produzido a partir de bio-MEG e/ou bio ácido tereftálico, derivados de milho e cana-de-açúcar ou petróleo como matéria-prima; possui aplicações em mercados já estabelecidos para o PET convencional, variando desde embalagens até aplicações na indústria têxtil.
Tecnologia utilizada	Utiliza fermentação no início da cadeia <i>upstream</i> e catálise química para a produção bio-MEG, bio-ácido tereftálico e para polimerização destes monômeros a bio-PET; apresenta tecnologia para a produção de bio-PET 30% em escala comercial, porém tecnologias para produção de bio-PET 100% em desenvolvimento; tecnologias de reciclagem já desenvolvidas e disponíveis.
Atores envolvidos	Atores <i>end users</i> do regime do SST dos plásticos iniciaram o desenvolvimento da tecnologia de produção de bio-PET 30% e 100%; houve associações com atores do SST de intermediários químicos em busca de tecnologias de transformação de matéria-prima vegetal e produção de bio-MEG e de bio-ácido tereftálico (externos ao SST dos plásticos); para a polimerização do bio-PET houve associação com atores do próprio regime do SST dos plásticos; há também iniciativa da Toray - ator do regime, produtora de plástico - em associação com empresas de intermediários químicos, externas ao regime, em busca de tecnologias de produção dos monômeros <i>biobased</i> .

Analisando-se a natureza do bio-PET, percebe-se que o bioplástico é idêntico ao seu análogo fóssil, no entanto, o bio-PET pode ser 30% ou 100% renovável - oriundo de açúcares vegetais e biomassa como matérias-primas. Assim, como no caso do PLA, espera-se que seu caráter renovável e de produção mais sustentável sejam as principais características responsáveis pelos esforços em seu desenvolvimento, haja vista as pressões de seleção da paisagem e o custo mais elevado de produção, se comparado com sua versão fóssil.

Além disso, para a obtenção de matéria-prima, também é necessária a criação de uma estrutura diferente daquela já estabelecida no regime dos plásticos. Os fornecedores de matéria-prima para o bio-PET também não são os mesmos envolvidos na extração e refino de petróleo, presentes no regime do SST dos plásticos. Ao contrário, os fornecedores de matéria-prima para a produção de bio-PET são externos ao SST dos plásticos. A Virent e a Gevo, por exemplo, são *start-ups* provenientes do SST de combustíveis. A India Glycols, por outro lado, está presente no SST de químicos. Além desses, considerando-se a integração para trás, desde a transformação de matéria-prima vegetal, os fornecedores também estariam presentes no SST do agronegócio. Dessa forma, assim como observado pelas ações da Coca-Cola, é evidente a necessidade de estabelecimento de relações com atores de outros SST. Não obstante, a médio e longo prazo, caso o bio-PET tenha uma participação maior no regime do SST dos plásticos, deve ser considerada uma alteração na estrutura original do regime com a inclusão de novos fornecedores.

O bio-PET, por se tratar de um polímero *drop-in*, possui as mesmas propriedades do PET fóssil, podendo utilizar os mesmos ativos presentes na cadeia de produção, distribuição e processamento do PET convencional. A alta demanda da Coca-Cola e também de outros clientes do regime do SST dos plásticos, conforme descrito no estudo de caso, são maiores que a capacidade produtiva atual. Quanto à adesão do usuário final, de acordo com a Coca-Cola (COCA-COLA, 2015), a difusão das garrafas PlantBottle têm sido um sucesso.

Diferentemente do PLA, a grande dificuldade do bio-PET não consiste em sua difusão no mercado, uma vez que ele acessa os mesmos mercados já desenvolvidos para o PET convencional, porém consiste no desenvolvimento de tecnologias de produção

adequadas e a baixo custo, assim como a estruturação de uma nova cadeia *upstream* para obtenção de matérias-primas.

No que tange à tecnologia de produção do bio-PET, apesar de se utilizar tecnologias de catálise para a polimerização do bio-PET e produção de seus precursores, também se utilizam tecnologias de biofermentação para a transformação de matéria-prima vegetal em intermediários para a produção dos monômeros bio-MEG e bio-ácido tereftálico no *upstream*. A produção destes monômeros, no entanto, também ainda não se encontra bem desenvolvida haja vista os esforços recentes no desenvolvimento de rotas produtivas.

No caso do bio-PET 30%, ainda que seja necessária utilização de biotecnologia (praticamente ausente no regime do SST dos plásticos) no início da cadeia de produção do ácido tereftálico, o bio-monômero é o mesmo derivado fóssil utilizado para a produção do PET convencional. Dessa forma, utiliza-se ainda ativos consolidados do regime. Além disso, na própria polimerização para a produção do PET, independente da origem de seus monômeros, os ativos utilizados para o PET convencional podem ser aproveitados para a produção do bio-PET, conforme pode ser observado com a parceria entre a Coca-Cola e a Indorama para a produção de bio-PET.

Entretanto, o grau de utilização de ativos do regime decresce no caso de produção de bio-PET 100%. Ainda que os mesmos ativos do regime possam ser utilizados na polimerização do bio-PET e na conversão de químicos intermediários a ácido tereftálico, a produção deste se inicia por rotas bioquímicas, diferentes da tradicionalmente usada para o PET fóssil. Dessa forma, sob o ponto de vista de atores do regime, maiores seriam os esforços para a produção de bio-PET 100%, o que pode reduzir o interesse dos atores incumbentes pelo biopolímero. Pode-se pensar que a ausência de grandes atores produtores de PET convencional, além da Toray, possa estar relacionada a essa questão.

Assim, como no caso do PLA, também para o bio-PET observa-se atores de fora do SST dos plásticos desenvolvendo as tecnologias de transformação de biomassa para a produção dos monômeros para o bio-PET. Esse fato só confirma a suspeita de que o desenvolvimento destas tecnologias tenha ocorrido por atores de outro SST devido

à maior familiaridade tanto com a matéria-prima agrícola quanto com o tipo de tecnologia utilizada, ainda que apoiados financeiramente por atores do regime incumbente. No entanto, para o caso do bio-PET, percebe-se a liderança do desenvolvimento do bioplástico a partir de atores *end users* do próprio regime do SST dos plásticos.

Em relação ao processamento do bio-PET, como mencionado anteriormente, devido a sua característica *drop-in*, não se faz necessária a adaptação das máquinas existentes para que seja possível o processamento adequado do biopolímero. O bio-PET pode ser processado exatamente da mesma forma que o PET convencional por se tratar da mesma molécula e, portanto, possuir as mesmas propriedades. O mesmo ocorre para a sistemática de reciclagem do bio-PET: pode-se utilizar a mesma infraestrutura desenvolvida para o PET convencional.

Uma vez que a tecnologia de produção de bio-PET 100% ainda não está suficientemente desenvolvida a nível comercial, percebe-se que o maior desafio para a disseminação do biopolímero 100% renovável consiste na otimização de tecnologias de produção. Além disso, a redução de custo para a produção do bio-PET 30% também é um fator que pode acelerar a produção e difusão deste bioplástico no mercado.

Durante o histórico de desenvolvimento do bio-PET, pode-se notar esforços no estabelecimento de relações com atores externos ao SST dos plásticos por atores incumbentes do regime. Uma vez que os primeiros atores dedicados ao desenvolvimento da tecnologia - como a Coca-Cola, a Pepsico e a Heinz - estarem posicionados no regime, percebe-se a busca por outros atores - Virent e Gevo, novos entrantes no SST, Indian Glycols, ator de outro SST - em prol do avanço da produção de bio-PET. Mesmo com o bio-PET representando uma ameaça ao PET convencional já estabelecido no regime, a postura dos atores do regime, majoritariamente os *end users*, até então tem sido de exploradores do desenvolvimento do bio-PET.

É também importante ressaltar que na tentativa de aceleração do bio-PET como alternativa ao PET, além das parcerias *upstream* para o desenvolvimento de tecnologias de produção do biopolímero, parcerias com outras empresas donas de marca também foram e continuam sendo realizadas no *downstream*.

Nesse movimento dos atores do regime em busca do desenvolvimento e aceleração do bio-PET como alternativa ao seu análogo fóssil, pode-se pensar que os atores possivelmente o fazem com o intuito de definir e comandar a forma como são realizados o desenvolvimento e introdução do novo bioplástico ao SST. Apesar da importância de atores produtores dos intermediários PTA e bio-MEG, novos entrantes no SST dos plásticos, pode-se notar que o desenvolvimento do bio-PET é liderado por atores do próprio regime. Na ausência de forças maiores advindas da paisagem, a busca por conhecimento externo ao SST para desenvolver o bio-PET como solução às pressões da paisagem pode ser uma forma de controlar a transformação e transição do regime.

Segundo Geels e Schot (2007), outro possível caminho de transição do regime de um SST, além da reconfiguração, é o caminho de transformação. Segundo os autores, este ocorre quando pressões da paisagem atuam sobre o regime sem que haja inovações dos nichos suficientemente desenvolvidas. Nesse caso, os atores do regime respondem à pressão da paisagem com a modificação da direção dos caminhos de desenvolvimento e as atividades de inovação dos nichos conforme seus interesses.

Analisando-se o caso do bio-PET, pode-se pensar que o desenvolvimento do biopolímero tem se assemelhado ao caminho de transformação para a transição do regime do SST dos plásticos. Desde o início do desenvolvimento do bio-PET pela Coca-Cola, havia pressões da paisagem sobre o regime na direção de adoção de processos com menor impacto ambiental. No entanto, ainda não havia (e nem há) tecnologias suficientemente desenvolvidas nos nichos passíveis de causarem mudanças disruptivas no regime.

Frente a essa situação, a Coca-Cola e outros atores do regime tomaram atitudes em resposta às pressões da paisagem quanto ao desenvolvimento do bio-PET como novo biopolímero. Dessa forma, uma vez que são atores do próprio regime que comandam a transformação, é evidente que eles também têm o poder de direcionar as transformações ocorridas de acordo com seus próprios interesses. Assim sob o ponto de vista do bio-PET, pode-se pensar que a transição do regime do SST dos plásticos se inicia como um caminho de transformação, conforme descrito por Geels *et al.* (2016) e Geels e Schot (2007).

5.3 PEF

De acordo com De Jong *et al.* (2012), o primeiro registro do PEF foi feito em 1946, logo após a descoberta do PET. No entanto, apesar de o PET ter sido rapidamente desenvolvido, o PEF teve um período latente de desenvolvimento de mais de 60 anos. Uma das razões certamente reside na diferença em complexidade de produção dos monômeros de cada um dos polímeros, assim como a disponibilidade de matéria-prima para a produção dos mesmos.

O PET convencional, por utilizar fontes fósseis, baratas e abundantes à época, foi rapidamente desenvolvido no período pós-guerra e a obtenção dos monômeros MEG e ácido tereftálico do petróleo já era uma realidade em larga escala pouco após o descobrimento do PET. Nesse momento, no entanto, pouca importância era dada para fontes renováveis como matéria-prima, haja vista a diferença em complexidade de processamento e custo quando comparadas ao petróleo.

Além disso, por 60 anos, a tecnologia de produção de FDCA não esteve suficientemente desenvolvida para a produção em larga escala, dificultando o estudo sobre o PEF e desenvolvimento do biopolímero. Somente em 2006, a Avantium foi capaz de otimizar os métodos de produção de HMF e, portanto, de FDCA até então descritos na literatura.

A partir do sucesso do novo método de produção do ácido furânico, a empresa viu também a oportunidade de produção do PEF como alternativa renovável aos plásticos convencionais. Da mesma forma que descrito nos casos do PLA e do bio-PET, no início deste século, a paisagem do regime dos plásticos exercia pressões de seleção para rotas sustentáveis para a produção de polímeros em larga escala.

A partir desta janela de oportunidade, a Avantium – que até então era uma empresa desenvolvedora de tecnologias para produção de químicos, externa ao SST dos plásticos – passou a fazer parte desse SST, atuando no desenvolvimento do PEF protegido da competição do mercado, no nicho. Dessa forma, o PEF surgiu como uma resposta às pressões de seleção da paisagem, uma que já havia a possibilidade de

produção de PEF 100% renovável, utilizando a tecnologia e cadeia de produção de bio-MEG já explorada pela Coca-Cola.

Assim que a planta piloto de produção de FDCA da Avantium começou a funcionar com sucesso, diversos outros atores estabeleceram parcerias com a empresa, tanto para o desenvolvimento do PEF quanto para o desenvolvimento de outros químicos a partir das plataformas produzidas pela empresa holandesa. Dentre os primeiros parceiros figuram a Coca-Cola e a Danone, clientes presentes no regime, e a ALPLA, empresa transformadora de plástico também presente no regime do SST dos plásticos.

Em 2016, a BASF, gigante petroquímica de grande influência no SST dos plásticos também se associou à Avantium. No caso, a associação entre as duas empresas visava a formação da JV Synvina, que tornou-se responsável pela produção e marketing tanto do FDCA quanto do PEF, produzidos a partir da tecnologia desenvolvida pela Avantium. Tal associação configura uma forma de a Avantium acessar recursos financeiros, os conhecimentos e redes já estabelecidos pela BASF no regime do SST dos plásticos, na tentativa de acelerar o desenvolvimento do PEF.

Assim, a partir do estudo de caso sobre o desenvolvimento do PEF, pode-se consolidar um quadro descritivo resumido dividido nas 3 mesmas dimensões: a natureza do bioplástico, a tecnologia utilizada e os atores envolvidos. O quadro está representado pela tabela 8.

Tabela 8. Quadro descritivo para o desenvolvimento do PEF.

Dimensão de análise	Observação
Natureza do bioplástico	Bioplástico não <i>drop-in</i> de base 100% renovável; produzido a partir de bio-MEG e FDCA, derivado de milho, de cana-de-açúcar ou de biomassa como matéria-prima; possui propriedades semelhantes às do PET e, portanto, pode ser aplicado em mercados já estabelecidos para o polímero fóssil, variando desde embalagens até aplicações na indústria têxtil.
Tecnologia utilizada	Utiliza fermentação no início da cadeia upstream e catálise química para a produção bio-MEG a partir de etanol, FDCA e para polimerização destes monômeros a PEF. Apresenta apenas uma tecnologia para a produção de PEF em escala piloto; tecnologias de reciclagem ainda em desenvolvimento.
Atores envolvidos	<i>Start-up</i> produtora de químicos, inicialmente externa ao SST dos plásticos, iniciou o desenvolvimento da tecnologia de produção do PEF; houve associações de atores end users e produtores de plásticos incumbentes ao regime no SST dos plásticos para aceleração do desenvolvimento do PEF.

Analisando-se a natureza do PEF, percebe-se que o bioplástico é bem semelhante ao PET / bio-PET, no que tange à estrutura química e suas propriedades. O PEF pode ser obtido de forma 100% renovável - oriundo de açúcares vegetais como matérias-primas. Pode-se imaginar que, da mesma forma que o PLA e o bio-PET já analisados, tais características sejam as principais responsáveis pelos esforços em seu desenvolvimento, considerando-se as pressões de seleção da paisagem e a diferença de custo de produção em relação aos polímeros convencionais.

Além disso, uma vez que a matéria-prima é de origem vegetal, para a obtenção dos precursores do PEF, é necessária a criação de uma estrutura diferente daquela já

estabelecida no regime dos plásticos. Os fornecedores de matéria-prima para nenhum dos 3 biopolímeros analisados são os mesmos envolvidos na extração e refino de petróleo, presentes no regime do SST dos plásticos. Os fornecedores de matéria-prima para a produção do PEF estão, na verdade, presentes no SST do agronegócio.

Faz-se, portanto, necessária para o desenvolvimento do PEF também a criação de relações com atores de outros SST - em busca de conhecimento, tecnologia e fornecedores de matérias-primas. Assim como para os demais bioplásticos investigados, a longo prazo, caso o PEF tenha uma participação maior no regime do SST dos plásticos, deve ser considerada uma alteração na estrutura original do regime com a inclusão de novos fornecedores de matéria-prima.

Apesar de sua característica não *drop-in*, o PEF possui propriedades bem semelhantes às do PET, segundo os detentores da tecnologia de produção. Porém, é possível que continue exigindo processamento diferenciado em sua transformação e também tecnologias de produção diferentes.

Uma vez que suas aplicações podem ser as mesmas que as do PET, diferentemente do PLA, o PEF a princípio não apresenta dificuldade de difusão. Somente a Mitsui já garantiu em um acordo realizado em 2015 a compra de grandes quantidades de PEF de uma planta que ainda nem está pronta (DIGEST, 2015). Além disso, haja vista as propriedades superiores às do PET, as expectativas sobre o PEF são altas para o desenvolvimento de outras aplicações mais avançadas que as do plástico fóssil, como por exemplo, a utilização de PEF para embalagem de bebidas altamente gaseificadas como a cerveja.

No entanto, ainda há incertezas quanto às propriedades do PEF e sua proximidade com o PET – conforme é caracterizado pela Avantium. Nesse sentido, pode ser que o biopolímero possa ter dificuldades de difusão, caso tais expectativas não se cumpram. Além disso, assim como o bio-PET 100% renovável, é possível que os maiores desafios para o PEF sejam a produção em larga escala (com tecnologia de produção e/ou disponibilidade de FDCA como limitantes), assim como o alto custo de produção quando comparado com os plásticos convencionais. Além disso, uma vez que o PEF ainda não é comercializado em larga escala, vale destacar que a aceitação dos usuários finais ainda não está definida.

No que tange à tecnologia de produção do PEF, percebe-se a utilização de fermentação de matéria-prima vegetal e na cadeia *upstream* de produção tanto do bio-MEG quanto do FDCA. Nesse processo, observa-se, no entanto, aproveitamento das tecnologias disponíveis no regime do SST dos plásticos, como catálise química, para a transformação de químicos intermediários aos monômeros e para a polimerização e produção de PEF.

Em relação ao processamento do PEF, como indicado anteriormente, devido às diferentes propriedades do bioplástico, faz-se necessária a adaptação das máquinas existentes para que seja possível o processamento adequado do biopolímero. Em relação à reciclagem, apesar de o PEF ter recebido aprovação da EPBP (*European PET Bottle Platform*) para ser reciclado junto com o PET (GREENCHEMICALSBLOG, 2017), conforme descrito no estudo de caso e na seção 4.3.4, para grandes volumes de PEF ainda se faz necessário o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem específicas para este biopolímero.

Observa-se também durante o histórico de desenvolvimento do PET e do PLA, o estabelecimento de relações com atores incumbentes do regime como forma de acelerar a difusão do PEF. Apesar de a Avantium, principal ator dedicado ao desenvolvimento da tecnologia estar inicialmente posicionada em um SST diferente, percebe-se, assim como no caso do PLA, um relacionamento simbiótico entre este novo entrante no SST com atores já incumbentes ao regime do SST dos plásticos (*end users* e, mais recentemente, atores produtores de plástico), na tentativa de desenvolver e acelerar a produção de PEF. Mesmo que o PEF represente alguma ameaça ao PET já estabelecido no regime, a postura dos atores do regime – ao unir esforços para a introdução do PEF ao mercado de plásticos – é de construção de relações simbióticas.

Em relação às parcerias *downstream*, destacam-se algumas com donas de marcas e grandes clientes consumidores de plástico como a Coca-Cola, a Danone e a Mitsui-Suntory. No entanto, diferentemente das diversas parcerias desenvolvidas pelos produtores de PLA, até o momento as parcerias com a Avantium e a Synvina focam em uma quantidade limitada de aplicações do PEF, tendo como principal aplicação o setor de embalagens.

Dessa forma, analisando-se o caso do PEF, pode-se pensar que o desenvolvimento deste bioplástico também tem se assemelhado ao caminho de reconfiguração para a transição do regime do SST dos plásticos, assim como no caso do PLA. Principalmente nos últimos 5 anos, após o sucesso da planta piloto de PEF, é evidente a relação de simbiose entre os atores do regime e a Avantium, de forma a trazer as inovações do PEF desenvolvidas no nicho ao regime e estar de acordo com as pressões e tendências ambientais provenientes da paisagem. Além disso, tais agregações, a longo prazo, também configurariam uma nova estrutura ao regime para tornar possível a produção do PEF, assim como dos demais bioplásticos analisados. Dessa forma, sob o ponto de vista do PEF, pode-se pensar que a transição do regime do SST dos plásticos inicia-se também como um caminho de reconfiguração, conforme descrito por GEELS *et al.*, 2016; GEELS; SCHOT, 2007.

5.4 SIMILARIDADES E DIFERENÇAS ENTRE OS CASOS ESTUDADOS

Ao analisar os três casos estudados sob a ótica das dimensões definidas no capítulo de metodologia, formulou-se de um quadro analítico resumido abordando os principais aspectos da transição para cada um dos bioplásticos estudados – representado pela tabela 9. Dessa forma, comparando-o com a tabela 1, consolidada a partir da literatura a respeito dos diferentes caminhos para transição sócio-técnica (GEELS *et al.*, 2016; GEELS; SCHOT, 2007), é possível a análise coletiva do desenvolvimento dos bioplásticos e da transição em curso no SST dos plásticos.

Analisando-se conjuntamente a paisagem do SST dos plásticos para os 3 bioplásticos, não se percebe pressões intensas, abruptas ou de desestabilização do regime - tais como guerras, colapso econômico ou crises sociais. Entretanto, percebe-se pressões moderadas sob a forma de preocupação social com o meio ambiente, aumento da quantidade de regulamentações com o objetivo de controlar e amenizar os impactos ambientais causados pela produção e consumo de plástico e também sob a forma de momentos de alta e baixa do preço do petróleo. Dessa forma, pela análise da dinâmica da paisagem durante o desenvolvimento dos bioplásticos analisados, imagina-se que em nenhum dos três casos há indícios da transição por caminhos de desalinhamento e realinhamento ou de substituição tecnológica.

Sob o ponto de vista do nicho, em momento algum do desenvolvimento do PLA, bio-PET ou PEF a tecnologia de produção dos bioplásticos se mostrou suficientemente desenvolvida para assumir as demandas do regime. Pelo contrário, observa-se que os três biopolímeros apresentam baixa competitividade (em custo e em escala) em relação aos polímeros fósseis. Além disso, principalmente no caso do PLA, também se observa dificuldades de aplicação, difusão e aceitação do biopolímero no mercado. Dessa forma, a partir da análise do nicho, pode-se pensar que até então, o desenvolvimento dos bioplásticos não tem seguido o caminho de substituição tecnológica – caracterizado pela maturidade das tecnologias e inovações do nicho em substituição às do regime.

Quanto ao regime, para nenhum dos casos estudados há descrença ou desestabilização grave do regime. Ainda que possam apresentar uma ameaça aos plásticos convencionais, os bioplásticos representam somente cerca de 1% da quantidade mundial de plásticos produzidos, o que evidencia o domínio dos plásticos convencionais no regime. Além disso, o próprio regime não apresenta descrença nele mesmo, o que é evidenciado pela crescente taxa de produção anual de plásticos, conforme evidenciado na seção 2.1.2. Dessa forma, a ideia de que a transição não tem ocorrido pelos caminhos de desalinhamento e realinhamento ou por substituição tecnológica é reforçada.

No entanto, a partir das iniciativas observadas de grandes atores incumbentes do regime com relação ao desenvolvimento dos três bioplásticos, pode-se perceber que o regime responde às pressões exercidas pela paisagem. Como discutido, as pressões da paisagem criam, ao longo do período estudado, tendências crescentes para a redução dos impactos ambientais gerados pela produção e utilização intensiva dos plásticos. Nesse sentido, os bioplásticos se apresentam como uma das possíveis soluções, ao ponto em que são derivados de matéria-prima renovável – o que reduz as emissões de GEE e reduz a dependência de matéria-prima fóssil – e, como no caso do PLA, são anunciados como biodegradáveis – o que, em tese, reduz os danos causados pela disposição final incorreta dos bioplásticos.

Tabela 9. Quadro analítico para o desenvolvimento do PLA, bio-PET e PEF.

Bioplástico	Natureza	Paisagem	Nicho	Regime	Atores	Tecnologias
PLA	Bioplástico não <i>drop-in</i> 100% renovável; produzido a partir de açúcares vegetais; aplicações em diferentes mercados (embalagens para alimentos frescos, indústria têxtil, agrícola e biomédica).	Exerce pressões moderadas sobre o regime sob a forma de regulações da produção e utilização de plásticos.	PLA tem dificuldades em aplicações em larga escala, difusão no mercado e competitividade em custo. Ou seja, insuficiente para substituir os plásticos do regime.	A adoção da produção de PLA proveniente do nicho necessita de mudanças no regime como nova lógica <i>upstream</i> para produção de PLA.	Novas alianças entre atores incumbentes no regime SST (Dow, Teijin, PTT e Total) e novos entrantes no SST como a NatureWorks e Corbion.	A produção de PLA desenvolvida por atores externos ao SST dos plásticos (NatureWorks e Corbion) e presente no nicho é adotada por atores do regime (Dow, Teijin, PTT e Total) para resolução de problemas do próprio regime, como impactos causados por plásticos fósseis e não biodegradáveis.
bio-PET	Bioplástico <i>drop-in</i> até 30% ou 100% renovável; matérias-primas: bio-MEG e/ou bio ácido tereftálico; aplicações em mercados já estabelecidos para o PET convencional.	Exerce pressões moderadas sobre o regime sob a forma de regulações da produção e utilização de plásticos.	Escala de produção e tecnologias de produção de bio-PET 30% ou 100% insuficientes (em escala e custo) para substituir o PET convencional do regime.	Atores do regime como a Coca-Cola respondem às pressões da paisagem e buscam formas de produção de bio-PET como possível solução, direcionando a transição.	Atores incumbentes (grupo PTC, Toray) orientam o regime a partir das inovações desenvolvidas no nicho (bio-PET);	Tecnologias de produção de bio-MEG e bio-ácido tereftálico desenvolvidas no nicho melhoram a tecnologia de produção de PET do regime, tornando o novo produto (bio-PET 30% ou 100%) mais sustentável.
PEF	Bioplástico não <i>drop-in</i> 100% renovável; produzido a partir de bio-MEG e FDCA; propriedades semelhantes às do PET; aplicações em mercados já estabelecidos (PET) e novos em potencial.	Exerce pressões moderadas sobre o regime sob a forma de regulações da produção e utilização de plásticos.	Escala de produção e tecnologias de produção de PEF insuficientes (em escala e custo) para substituir o PET convencional do regime.	A adoção da produção de PEF proveniente do nicho necessita de mudanças no regime como nova lógica <i>upstream</i> para produção de PEF.	Novas alianças entre atores incumbentes no regime SST (Coca-Cola, BASF) e novos entrantes no SST (Avantium).	A produção de PEF desenvolvida por atores externos ao SST dos plásticos (Avantium) e presente no nicho é adotada por atores do regime (Coca-Cola e BASF) para resolução de problemas do próprio regime, como os impactos causados por plásticos fósseis.

Apesar de apresentados como possível solução para as pressões exercidas pela paisagem ao regime, cabe ressaltar que os bioplásticos não são a única solução e que tampouco resolvem todos os problemas do regime. Como evidenciado na seção 2.1.4, outras possíveis respostas às pressões da paisagem incluem iniciativas como otimização da cadeia de reciclagem e implementação do sistema de EC. Além disso, no que tange à reciclagem dos bioplásticos, a curto prazo a utilização de grandes quantidades de PLA e PEF pode prejudicar a cadeia de reciclagem de plásticos convencionais, sendo considerados como contaminantes, uma vez que ambos os biopolímeros ainda não possuem infraestrutura desenvolvida para sua reciclagem.

Além disso, a produção de bioplástico não depende de matéria-prima fóssil e, como pode ser observado nos estudos de caso, faz-se necessária, portanto, a busca de fornecedores de matéria-prima renovável localizados fora do SST dos plásticos, mas incumbentes no SST de agronegócio. Assim, percebe-se que, aos poucos, caso a participação dos bioplásticos no mercado dos plásticos cresça, serão necessárias mudanças na estrutura do regime incumbente, com alteração e inclusão de novos fornecedores de matéria-prima, consolidando uma nova lógica *upstream* de produção de bioplásticos. Dessa forma, considerando-se as características do regime, pode-se pensar que a transição do SST dos plásticos possa ocorrer pelos caminhos de transformação e/ou de reconfiguração.

Em relação aos atores, para os três casos estudados, é evidente a aproximação de atores incumbentes do regime em relação aos biopolímeros estudados. No caso do PLA, percebe-se diversas associações de grandes empresas do regime (Dow, Teijin, PTTGC e Total) às empresas Cargill e Corbion-Purac do SST de agronegócio, em prol do desenvolvimento e aceleração da introdução do PLA ao mercado. Para o bio-PET, houve a busca, por parte da Coca-Cola (grande empresa *end user* do regime), por tecnologias de desenvolvimento de PET renovável e pela estruturação de cadeia de produção do mesmo. Além disso, há também outras empresas do regime com iniciativas para o desenvolvimento do bio-PET como a Toray – produtora de PET convencional - e a Heinz. Para o PEF, observam-se parcerias entre a Coca-Cola, ALPLA e BASF – grandes atores do regime – com a Avantium, empresa desenvolvedora do PEF externa ao SST dos plásticos.

Apesar de haver relação simbiótica – ou seja, de cooperação – entre atores do regime e do nicho durante o desenvolvimento dos três bioplásticos, há dois fatores principais que diferenciam o desenvolvimento dos bioplásticos quanto às iniciativas dos atores envolvidos: o posicionamento (nicho ou regime) dos principais atores desenvolvedores do bioplástico e o grau de orientação da transição por parte dos atores envolvidos. A partir desta variedade, pode-se diferenciar os possíveis caminhos de transição para cada um dos bioplásticos estudados.

Tanto para o PLA quanto para o PEF, o início de seu desenvolvimento ocorreu por atores externos ao SST dos plásticos e, portanto, novos entrantes neste SST. A Cargill e a Corbion, principais atores desenvolvedores do PLA, são tradicionalmente atores do SST de agronegócio e de alimentos. No entanto, com a iniciativa de produção de PLA, estes atores passam também a atuar no SST dos plásticos, porém no nicho, uma vez que a tecnologia de produção de PLA é desenvolvida protegida da competição de mercado do regime dos plásticos e pela baixa escala de produção, quando comparada aos plásticos tradicionais. No caso do PEF, a Avantium é o principal ator desenvolvedor do PEF e também é inicialmente externo ao SST dos plásticos, pertencendo ao SST de químicos intermediários. Entretanto, ao começar a desenvolver a tecnologia de produção de PEF, a empresa holandesa também passa a atuar no nicho do SST dos plásticos, da mesma forma que a NatureWorks e a Corbion.

Após a entrada desses novos entrantes no SST dos plásticos, observa-se para ambos os casos estudados, a formação de alianças entre grandes atores incumbentes do regime. Dessa forma, sob o ponto de vista da dinâmica dos atores durante o desenvolvimento do PLA e do PEF, pode-se pensar que o caminho de transição percorrido por esses bioplásticos se aproxima do caminho de reconfiguração.

No caso do bio-PET, no entanto, o início de seu desenvolvimento ocorreu por um ator interno ao regime do SST dos plásticos – a Coca-Cola. De acordo com o estudo de caso, a Coca-Cola buscou conhecimento e novos atores, externos ao SST dos plásticos – para a estruturação de uma cadeia de produção do biopolímero. Da mesma forma que o PLA e o PEF, o bio-PET foi (e continua a ser) desenvolvido protegido da competição de mercado do regime dos plásticos, o que o posiciona como uma inovação em desenvolvimento no nicho. Dessa forma, ao contrário dos casos do PEF

e do PLA, o principal ator a desenvolver o bio-PET é um ator do regime, que deu início ao desenvolvimento do biopolímero no nicho como resposta às pressões provenientes da paisagem. Nesse sentido, pode-se imaginar que tal iniciativa da Coca-Cola é uma tentativa de reorientação do regime a partir das inovações desenvolvidas no nicho, de acordo com seus interesses e como solução para os problemas do regime. Assim, a empresa de bebidas pode tentar evitar medidas mais drásticas (ou indesejadas) como respostas às pressões da paisagem, como por exemplo, a proibição de garrafas PET para embalagem de bebidas.

Portanto, sob o ponto de vista da dinâmica de atores, o desenvolvimento do bio-PET aparenta ter um maior grau de orientação do regime por parte de seus próprios atores. Assim, o desenvolvimento do bio-PET parece iniciar a transição do SST dos plásticos por um caminho diferente do PLA e do PEF: pelo caminho de transformação.

No que tange às tecnologias, para todos os biopolímeros estudados, a aliança formada entre atores do regime e do nicho promovem combinações de tecnologias. Atores do nicho contribuem com o *know-how* e expertise de produção de bioplástico e obtenção de químicos intermediários a partir de matéria-prima, e os atores do regime com o *know-how* e expertise de produção e marketing de plástico convencional. Nesse sentido, observa-se novas combinações de tecnologias posicionadas tanto no nicho quanto no regime em prol do desenvolvimento em conjunto da inovação desenvolvida no nicho (PLA, bio-PET e PEF), como tentativas de solucionar os problemas do regime.

Para o caso do bio-PET, em especial, uma vez que o bio-PET até 30% renovável é uma combinação de tecnologias desenvolvidas no nicho – para a produção da parcela renovável do biopolímero, o bio-MEG – e de tecnologias já utilizadas no regime – para a produção de PTA – pode-se considerar ainda que há incorporação das tecnologias do nicho para a melhoria daquelas já presentes no regime. Dessa forma, de acordo com as caracterizações dos caminhos de transição propostas por Geels *et al.* (2016) e Geels e Schot (2007) e representadas na tabela 1, novamente há indícios de que o desenvolvimento do PLA e do PEF seguem um caminho de reconfiguração e que o desenvolvimento do bio-PET segue, por sua vez, um caminho de transformação para a transição do SST dos plásticos.

Portanto, considerando-se todos os principais aspectos para a transição em conjunto, pode-se pensar que a transição do SST dos plásticos vem ocorrendo por dois caminhos diferentes, dependendo do bioplástico analisado. Para o PLA e para o PEF, a transição parece se iniciar por um caminho de reconfiguração – com pressões moderadas da paisagem, com alianças entre atores do regime e novos entrantes, e desenvolvimento de combinações entre as tecnologias do nicho e do regime, provocando reestruturação do regime. Por outro lado, para o bio-PET, a transição parece se iniciar por um caminho de transformação – com pressões moderadas da paisagem, orientação do regime a partir de atores incumbentes em resposta a essas pressões e com a incorporação de tecnologias do nicho para melhoria daquelas do regime.

Cabe ressaltar, no entanto, que da mesma forma que para o PLA e para o PEF, caso o bio-PET 30% ou 100% venha a se estabelecer no regime, com produção em larga escala, será necessária a incorporação de novos atores (e novos entrantes do SST) ao regime – principalmente fornecedores e transformadores de matéria-prima renovável – desencadeando reestruturação do regime incumbente, como nova lógica de produção *upstream*. Nesse sentido, não se deve descartar a possibilidade de alteração de caminho de transição do bio-PET, como mudança de um caminho de transformação para reconfiguração.

Além disso, também é importante frisar que, de acordo com a análise realizada, bioplásticos de naturezas diferentes tendem a se desenvolverem por caminhos de transição diferentes. No caso, o PLA e o PEF – ambos bioplásticos não *drop-in* – se desenvolvem pelo caminho de reconfiguração e o bio-PET – *drop-in* – pelo caminho de transformação.

De acordo com Oroski; Alves e Bomtempo (2014), bioplásticos *drop-in* requerem investimentos concentrados no fornecimento e logística de matéria-prima renovável. Por outro lado, polímeros não *drop-in* requerem investimentos em ativos específicos, tanto para o fornecimento de matéria-prima quanto para o processamento do biopolímero e seus *end users*. Analisando-se os casos estudados sob essa lógica, percebe-se que pode haver uma tendência de polímeros *drop-in* serem desenvolvidos mais facilmente sob o caminho de transformação.

No caso do bio-PET, a Coca-Cola – *end user* do regime dos plásticos – iniciou o desenvolvimento do bioplástico em resposta às pressões da paisagem sobre o regime. Assim, como já discutido, pode-se imaginar que tal iniciativa da empresa de bebidas seja uma tentativa de reorientar o regime de acordo com seus interesses. Nesse sentido, considerando a menor necessidade de investimento no *downstream* da produção de biopolímeros *drop-in*, é possível que a Coca-Cola, posicionada justamente no *downstream*, tenha iniciado o desenvolvimento do bio-PET na tentativa de desenvolver uma solução aos problemas do regime de forma que a empresa *end user* fosse menos afetada.

Seguindo essa lógica, atores do regime – principalmente *end users* que preferem manter a estrutura do regime e ter controle sobre a transição do mesmo – podem preferir o desenvolvimento de biopolímeros *drop-in* como solução para os problemas do regime, na tentativa de controle da orientação da transição do regime e manutenção da estrutura do regime, seguindo assim o caminho de transformação. Pela mesma lógica, o desenvolvimento de bioplásticos não *drop-in* é mais provável de ser iniciado por atores externos ao regime e portanto, novos entrantes, uma vez que a necessidade de reestruturação do regime pode ser maior para a produção em larga escala deste bioplástico, permitindo a entrada de novos atores no SST dos plásticos. No entanto, após o desenvolvimento do bioplástico, atores do regime podem se associar aos novos entrantes como resposta às pressões da paisagem e como tentativa de solucionar os problemas do regime. Dessa forma, bioplásticos não *drop-in* tenderiam a iniciar seu desenvolvimento pelo caminho de transição de reconfiguração.

Apesar de o presente trabalho apontar essa possibilidade de tendência de caminhos de transição para diferentes naturezas de bioplásticos (*drop-in* e não *drop-in*), o material aqui desenvolvido não é suficiente para se concluir essa tendência. Para isso, seria necessário estudar um maior número de casos de biopolímeros de naturezas diferentes e analisá-los sob a discussão aqui levantada.

Capítulo 6

6 CONCLUSÃO

Ao longo dos últimos anos tem-se percebido o crescente desenvolvimento de bioplásticos e sua introdução no mercado de plásticos convencionais. Diversos novos biopolímeros têm sido descobertos e produzidos, a fim de trazer inovações em tecnologia, produtos e aplicações para a indústria dos plásticos. Alguns, inclusive, apresentam propriedades melhoradas em relação aos plásticos convencionais e representam alternativas renováveis a seus análogos fósseis.

A introdução dos bioplásticos na indústria dos plásticos, no entanto, acompanha alterações necessárias em sua estrutura para que a produção e utilização dos biopolímeros possa ocorrer da maneira mais eficiente. Assim, pode-se imaginar que a introdução dos bioplásticos desencadeia uma transformação na indústria de plásticos e, assim, uma transição no sistema sócio-técnico dos plásticos.

A partir desse cenário de valoração dos bioplásticos e transição do SST dos plásticos, o presente trabalho buscou responder a algumas questões a respeito do desenvolvimento dos bioplásticos e transição do SST dos plásticos, como: haverá integração dos bioplásticos no setor de plásticos convencionais? Quem são os principais atores no desenvolvimento de bioplásticos? Qual é a relação entre eles e o setor estabelecido dos plásticos convencionais? Como ocorrerá a transição tecnológica e social para a maior adoção dos bioplásticos? Há formas de transição diferenciadas entre os bioplásticos?

Para isso, estudou-se o desenvolvimento de 3 bioplásticos particulares: o PLA, o bio-PET e o PEF. Com base nas informações e evidências apontadas pelos estudos de caso, aplicou-se uma metodologia de análise do SST dos plásticos dividida em 6 dimensões principais: a caracterização do regime, do nicho e da paisagem do SST dos plásticos; a natureza do bioplástico estudado; os atores envolvidos no desenvolvimento de cada bioplástico; e as tecnologias utilizadas nesse SST.

Por meio da análise realizada foi possível perceber que aos poucos há a introdução dos bioplásticos no mercado de plásticos, a partir de iniciativas lideradas tanto por atores inicialmente externos ao SST dos plásticos como por atores incumbentes do regime. Dentre os atores envolvidos, destaca-se a diversidade dos mesmos, no que tange ao seu posicionamento na cadeia de produção e utilização de plásticos (fornecedores de matéria-prima e químicos intermediários, produtores de plásticos e *end users*) e ao seu SST de origem. Além disso, para os três casos estudados, percebe-se relações de simbiose entre atores novos entrantes no SST dos plásticos e atores incumbentes do regime.

Dessa forma, sob o ponto de vista do desenvolvimento dos bioplásticos em questão, também se observou evidências e esforços indicativos da ocorrência da transição do SST dos plásticos. Segundo a análise realizada, no entanto, essa transição parece ocorrer de formas diferentes a depender do bioplástico analisado. Conforme discutido, o desenvolvimento dos bioplásticos PLA e PEF parece seguir o caminho de reconfiguração e o bio-PET, o caminho de transformação descritos por Geels (2007, 2016).

Além disso, a análise também aponta que bioplásticos de naturezas diferentes (como *drop-in* ou não *drop-in*) podem ter caminhos preferenciais para a transição. Entretanto, ainda que se possa identificar características nos estudos de caso que apontem a um caminho ou outro, deve-se considerar a possibilidade de alteração de caminhos ao longo da transição. Ainda assim, os resultados encontrados neste trabalho podem auxiliar formuladores de políticas e atores envolvidos na transição a tomar decisões estratégicas relacionadas aos bioplásticos, facilitando (ou dificultando) o desenvolvimento de bioplásticos a partir de orientação de caminhos de transição.

Por fim, deve-se destacar que o trabalho aqui apresentado tem o intuito de contribuir para o enriquecimento da discussão acerca do desenvolvimento dos bioplásticos e da transição do sistema sócio-técnico dos plásticos. Contudo, a transição sócio-técnica ainda é um processo em curso e pode sofrer alterações não previstas neste trabalho. Dessa forma, diante deste cenário dinâmico e em desenvolvimento, a discussão aqui realizada deve ser revisada e atualizada conforme novas iniciativas são tomadas e desenvolvidas, podendo representar alteração dos resultados aqui discutidos.

Além disso, embora a metodologia utilizada tente abranger diferentes naturezas de bioplásticos, nem todos os pontos aqui discutidos são aplicáveis de forma generalizada a todos os bioplásticos. Dessa forma, para o melhor entendimento da introdução dos bioplásticos no SST dos plásticos e a da transição deste, sugere-se que outros biopolímeros sejam estudados assim como o PLA, o bio-PET e o PEF foram no presente trabalho. Além disso, outra sugestão para trabalhos futuros é a análise mais detalhada da paisagem sócio-técnica e das pressões por ela exercida sobre o regime dos plásticos.

7 REFERÊNCIAS

- ABIPET. **Resina PET - Fabricação**. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=65>>. Acesso em: 4 nov. 2017a.
- ABIPET. **Reciclagem - Aplicações de PET, bio-PET e PEF**. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/index.html?method=mostrarInstitucional&id=72>>. Acesso em: 4 nov. 2017b.
- ABIPLAST. Perfil 2016. p. 43, 2016.
- AVANTIUM. **Products & Applications**. Disponível em: <<https://www.avantium.com/yxy/products-applications/>>. Acesso em: 4 nov. 2017.
- BOMTEMPO, J.-V.; CHAVES ALVES, F.; DE ALMEIDA OROSKI, F. Developing new platform chemicals: what is required for a new bio-based molecule to become a platform chemical in the bioeconomy? **Faraday Discuss.**, v. 202, p. 213–225, 2017.
- BROCKHAUS, S.; PETERSEN, M.; KERSTEN, W. A crossroads for bioplastics: Exploring product developers' challenges to move beyond petroleum-based plastics. **Journal of Cleaner Production**, 2015.
- CASTRO-AGUIRRE, E. et al. **Poly(lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life** *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2016.
- COCA-COLA. **2012 / 2013 GRI Report Table of Contents**. [s.l: s.n.].
- COLE, M. et al. **Microplastics as contaminants in the marine environment: A review** *Marine Pollution Bulletin*, 2011.
- COUNCIL, A. C. **Lifecycle of a Plastic Product**. Disponível em: <<https://plastics.americanchemistry.com/Lifecycle-of-a-Plastic-Product/>>. Acesso em: 6 ago. 2017.
- DE ALMEIDA OROSKI, F.; CHAVES ALVES, F.; BOMTEMPO, V. Bioplastics Tipping Point: drop-in or non-drop-in? **Journal of Business Chemistry**, v. 11, n. 1, p. 42–50, 2014.
- DE JONG, E. et al. **Furandicarboxylic acid (FDCA), A versatile building block for a very interesting class of polyesters**. ACS Symposium Series. **Anais...2012**
- DIGEST, B. **Avantium raises \$50M from Coca-Cola, Danone, Swire and more: renewable PEF plastic bottles take the spotlight**. Disponível em: <<http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2014/06/05/avantium-raises-50m-from-coca-cola-danone-swire-and-more-as-all-renewable-pef-plastic-bottles-take-the-spotlight/>>. Acesso em: 4 nov. 2017.
- DIGEST, B. **NatureWorks: Biofuels Digest's 2015 5-Minute Guide**. Disponível em: <<http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2015/03/16/natureworks-biofuels-digests-2015-5-minute-guide/>>.

DIVISION, S. B. Bioplastics Simplified: Attributes of Biobased and Biodegradable Plastics. **The Plastics Industry Trade Association (SPI) Bioplastics Division.**, 2016.

DUTT, K.; SONI, R. K. A review on synthesis of value added products from polyethylene terephthalate (PET) waste. **Polymer Science Series B**, v. 55, n. 7–8, p. 430–452, . **Polymer Science Series B**, v. 55, n. 7–8, p. 430–452, 2013.

EDQUIST, C. Systems of Innovation Approaches - Their Emergence and Characteristics. In: **Systems of Innovation: Technologies, Institutions and Organizations**. [s.l: s.n.]. p. 1–35.

EERHART, A. J. J. E.; FAAIJ, A. P. C.; PATEL, M. K. Replacing fossil based PET with biobased PEF; process analysis, energy and GHG balance. **Energy & Environmental Science**, v. 5, n. 4, p. 6407, 2012.

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

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Circular Economy Overview**. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/overview/concept>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

ERICKSON, L. E. Gone tomorrow: the hidden life of garbage. **Choice: Current Reviews for Academic Libraries**, v. 43, n. 9, p. 1855, 2006.

ERLER, C.; NOVAK, J. Bisphenol a exposure: Human risk and health policy. **Journal of Pediatric Nursing**, v. 25, n. 5, p. 400–407, 2010.

EUROPEAN BIOPLASTICS. **French law introduces measures to strengthen bioplastics market Biobased, biodegradable fruit and vegetable bags mandatory as of January 2017**. Disponível em: <http://www.european-bioplastics.org/pr_150723/>. Acesso em: 20 nov. 2017a.

EUROPEAN BIOPLASTICS. Bioplastics packaging - combining performance with sustainability. 2015b.

EUROPEAN BIOPLASTICS. What are bioplastics? **European Bioplastics Fact Sheet**, p. 1–4, 2016a.

EUROPEAN BIOPLASTICS. Bioplastic market data. **European bioplastics**, p. 4, 2016b.

EUROPEAN BIOPLASTICS. **French decree supports bio-based and home-compostable bags**. Disponível em: <<http://www.european-bioplastics.org/french-decree-supports-bio-based-and-home-compostable-bags/>>. Acesso em: 20 nov. 2017c.

FARAH, S.; ANDERSON, D. G.; LANGER, R. **Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive**

review **Advanced Drug Delivery Reviews**, 2016.

FREINKEL, S. **Plastic: A Toxic Love Story**. 1st. ed. New York: Houghton Mifflin Company, 2011.

GEELS, F. W. Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: a multi-level perspective and a case-study. **Research Policy**, v. 31, p. 1257–1274, 2002.

GEELS, F. W. From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory. **Research Policy**, v. 33, n. 6–7, p. 897–920, 2004.

GEELS, F. W. et al. The enactment of socio-technical transition pathways: A reformulated typology and a comparative multi-level analysis of the German and UK low-carbon electricity transitions (1990-2014). **Research Policy**, v. 45, n. 4, p. 896–913, 2016.

GEELS, F. W.; SCHOT, J. Typology of sociotechnical transition pathways. **Research Policy**, v. 36, n. 3, p. 399–417, 2007.

GOURMELON, G. et al. Global Plastic Production Rises, Recycling Lags. **Revista Tcnocientifica URU**, n. April 2016, p. 1–7, 2015.

GREENCHEMICALSBLOG. **PEF to be integrated in European PET recycling**. Disponível em: <<https://greenchemicalsblog.com/2017/05/24/pef-to-be-integrated-in-european-pet-recycling/>>. Acesso em: 4 nov. 2017.

GREENPEACE. **SAVE OUR SEAS FROM PLASTIC POLLUTION!** Disponível em: <<http://www.greenpeace.org/international/en/campaigns/detox/what-you-can-do/No-Plastic/>>. Acesso em: 20 nov. 2011.

HOPEWELL, J.; DVORAK, R.; KOSIOR, E. Plastics recycling: Challenges and opportunities. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 364, n. 1526, p. 2115–2126, 2009.

IBAMA. **Protocolo de Quioto**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto>>. Acesso em: 3 dez. 2017a.

IBAMA. **Acordo de Paris**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 3 dez. 2017b.

ILES, A.; MARTIN, A. N. Expanding bioplastics production: Sustainable business innovation in the chemical industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 45, p. 38–49, 2013.

JAMSHIDIAN, M. et al. Poly-Lactic Acid: Production, applications, nanocomposites, and release studies. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 9, n. 5, p. 552–571, 2010.

JANKAUSKAITE, V.; MACIJAUSKAS, G.; LYGAITIS, R. Polyethylene terephthalate

waste recycling and application possibilities: A review. **Medziagotyra**, v. 14, n. 2, p. 119–127, 2008.

KOMULA, D. Completing the Puzzle : 100% Plant-Derived PET. **Bioplastics Magazine**, v. 6, p. 14–17, 2011.

LIGHT, L. **Liquid Light Signs Agreement to Further Advance its CO₂-to-Chemicals Technology**. Disponível em: <<https://llchemical.com/news/liquid-light-signs-agreement-further-advance-its-cosub2sub-chemicals-technology/>>. Acesso em: 4 nov. 2017.

LUNT, J. Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers. **Polymer Degradation and Stability**, v. 59, n. 1–3, p. 145–152, 1998.

MADHAVAN NAMPOOTHIRI, K.; NAIR, N. R.; JOHN, R. P. **An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research***Bioresource Technology*, 2010.

MAGAZINE, B. **European PET Bottle Platform says existing recovery systems can handle PEF**. Disponível em: <<http://www.bioplasticsmagazine.com/en/news/meldungen/20170524-Synvina-PEF-gets-interim-approval-for-handling-in-existing-recycling-streams.php>>. Acesso em: 4 nov. 2017.

MANO, E. B. & M. **Introdução a polímeros**. Rio de Janeiro: Edgard Blücher, 2001.

NACHMANY, M. et al. The GLOBE Climate Legislation Study. p. 700, 2014.

NELSON, R.; WINTER, S. An Evolutionary Theory of Economic Change. **Belknap Press: Cambridge, MA**, 1982.

PACHECO, J. J. et al. Route to Renewable PET: Reaction Pathways and Energetics of Diels-Alder and Dehydrative Aromatization Reactions between Ethylene and Biomass-Derived Furans Catalyzed by Lewis Acid Molecular Sieves. **ACS Catalysis**, v. 5, n. 10, p. 5904–5913, 2015.

PANG, J. et al. Synthesis of ethylene glycol and terephthalic acid from biomass for producing PET. **Green Chem.**, v. 18, n. 2, p. 342–359, 2016.

PHILP, J. OECD Policies for Bioplastics in the Context of a Bioeconomy, 2013. **Industrial Biotechnology**, v. 10, n. 1, p. 19–21, 2014.

PHILP, J. C. et al. Bioplastics science from a policy vantage point. **New Biotechnology**, v. 30, n. 6, p. 635–646, 2013.

PLASTICS, E. ASSOCIATION OF. **Plastics – the Facts 2016**. 2016.

SAVIOLI LOPES, M.; JARDINI, A. L.; MACIEL FILHO, R. **Poly (lactic acid) production for tissue engineering applications**. *Procedia Engineering. Anais...2012*

SHELDON, R. A. Green and sustainable manufacture of chemicals from biomass:

state of the art. **Green Chem.**, v. 16, n. 3, p. 950–963, 2014.

SMITH, A.; STIRLING, A.; BERKHOUT, F. **Governing sustainable industrial transformation under different transition contexts**. Paper for the Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change: “Governance for Industrial Transformation”. **Anais...2003**

SMITH, A.; STIRLING, A.; BERKHOUT, F. The governance of sustainable socio-technical transitions. **Research Policy**, v. 34, n. 10, p. 1491–1510, 2005.

SONG, J. H. et al. Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, v. 364, n. 1526, p. 2127–2139, 2009.

STAPLES, C. A et al. A review of the environmental fate, effects, and exposures of Bisphenol A. **Chemosphere**, v. 36, n. 10, p. 2149–2173, 1998.

STORZ, H.; VORLOP, K.-D. Bio-based plastics: status, challenges and trends. **Landbauforschung**, v. 63, n. 4, p. 321–332, 2013.

TURNHEIM, B. et al. Evaluating sustainability transitions pathways: Bridging analytical approaches to address governance challenges. **Global Environmental Change**, v. 35, p. 239–253, 2015.

USDA, U. S. D. OF A. **WHAT IS BIOPREFERRED?** Disponível em: <<https://www.biopREFERRED.gov/BioPreferred/faces/pages/AboutBioPreferred.xhtml>>. Acesso em: 3 dez. 2017.

USEPA, U. S. E. P. A. **Summary of the Clean Air Act**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-air-act>>. Acesso em: 3 dez. 2017.

VAN BERKEL, J. G. et al. Isothermal crystallization kinetics of poly (ethylene 2,5-furandicarboxylate). **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 300, n. 4, p. 466–474, 2015.

VIRENT. **Bioforming**. Disponível em: <<http://www.virent.com/technology/bioforming/>>. Acesso em: 4 nov. 2017.

WEE, Y.; KIM, J.; RYU, H. Biotechnological Production of Lactic Acid and Its Recent Applications. **Food Technology and Biotechnology**, v. 44, n. 2, p. 163–172, 2006.