

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS ERECHIM
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

LEONARDO LUÍS ROSSETTO

**AVANÇOS E DESAFIOS NA PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE POLÍMEROS
DE BASE BIOLÓGICA**

Ciente e de acordo,

ERECHIM

2024

LEONARDO LUÍS ROSSETTO

**AVANÇOS E DESAFIOS NA PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE POLÍMEROS
DE BASE BIOLÓGICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Helen Treichel

ERECHIM

2024

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Rossetto, Leonardo Luís

Avanços e desafios na pesquisa e desenvolvimento de
polímeros de base biológica / Leonardo Luís Rossetto. --
2024.

41 f.:il.

Orientadora: Dr.^a Helen Treichel

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária,
Erechim, RS, 2024.

1. bioplásticos. 2. polímeros. 3. sustentabilidade.
4. poluição ambiental. I. Treichel, Helen, orient. II.
Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

LEONARDO LUÍS ROSSETTO

**AVANÇOS E DESAFIOS NA PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DE POLÍMEROS
DE BASE BIOLÓGICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 18/06/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Helen Treichel – UFFS
Orientadora

M.^a Aline Frumi Camargo – Doutoranda UFSC
Avaliadora

M.^a Natalia Klanovicz – Doutoranda USP
Avaliadora

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Darci Luiz Rossetto e Neide Maria Rossetto que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória.

Às minhas irmãs Neisa Fátima Rossetto e Cristiane Regina Rossetto pela amizade e atenção dedicadas quando precisei.

À minha orientadora Helen Treichel pelas valiosas contribuições dadas durante todo o processo.

À banca examinadora do meu TCC Aline Frumi Camargo e Natalia Klanovicz pela atenção dedicada e pelas valiosas sugestões que tornaram este trabalho ainda mais consistente e relevante.

A todos os meus professores da Universidade Federal da Fronteira Sul pela excelência da qualidade técnica de cada um.

A todos os meus colegas do curso de graduação que compartilharam dos inúmeros desafios que enfrentamos, sempre com o espírito colaborativo.

Aos meus amigos, que sempre me encorajaram a perseguir meus objetivos e me ajudaram a manter a motivação em momentos difíceis.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que fizeram parte desta etapa decisiva em minha vida.

RESUMO

Atualmente, é quase impossível imaginar um mundo sem plásticos. Eles são amplamente utilizados em diversos setores da economia, como embalagens, construção, transporte, saúde e eletrônicos, devido ao seu baixo custo, versatilidade, durabilidade e alta relação resistência/peso. No entanto, a durabilidade dos plásticos após o uso se torna um problema ambiental, já que grande parte dos resíduos plásticos acaba em aterros sanitários, é incinerada, ou descartada ilegalmente, contaminando ecossistemas e contribuindo para o aquecimento global. Uma alternativa promissora para mitigar esses impactos é o desenvolvimento de bioplásticos, que são materiais de base biológica, biodegradáveis ou ambos. Entre os bioplásticos, destacam-se o poli (ácido lático) (PLA), os polihidroxialcanoatos (PHA), além da poliamida (PA) e do polipropileno (PP) de base biológica, que têm potencial para substituir os plásticos convencionais em diversas aplicações. A produção global de bioplásticos está crescendo, com estimativas de alcançar 7,43 milhões de toneladas até 2028, impulsionada pela demanda por alternativas mais sustentáveis. Apesar dos desafios, como os altos custos de produção e propriedades ainda inferiores em comparação aos plásticos sintéticos, os investimentos em pesquisa e desenvolvimento prometem melhorar esses materiais. Com o avanço tecnológico e a crescente conscientização ambiental, espera-se que os bioplásticos desempenhem um papel crucial na transição para uma economia circular de baixo carbono.

Palavras-chave: bioplásticos; polímeros; sustentabilidade; poluição ambiental.

ABSTRACT

Currently, it is almost impossible to imagine a world without plastics. They are widely used in various sectors of the economy, such as packaging, construction, transportation, healthcare, and electronics, due to their low cost, versatility, durability, and high strength/weight ratio. However, the durability of plastics after use becomes an environmental curse, as much of the plastic waste ends up in landfills, is incinerated, or discarded illegally, contaminating ecosystems and contributing to global warming. A promising alternative to mitigate these impacts is the development of bioplastics, which are bio-based, biodegradable materials, or both. Bioplastics include poly (lactic acid) (PLA), polyhydroxyalkanoates (PHA), bio-based polyamide (PA), and polypropylene (PP), which have the potential to replace conventional plastics in various applications. Global production of bioplastics is growing, estimated to reach 7.43 million tons by 2028, driven by demand for more sustainable alternatives. Despite challenges, such as high production costs and even inferior properties compared to synthetic plastics, investments in research and development promise to improve these materials. With technological advancement and growing environmental awareness, bioplastics are expected to play a crucial role in transitioning to a low-carbon circular economy.

Keywords: bioplastics; polymers; sustainability; environment pollution.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema de coordenadas de materiais para bioplásticos.....	12
Gráfico 1 - Capacidades globais de produção de bioplásticos 2022-2028 em 1 milhão de toneladas	13
Gráfico 2 - Capacidades globais de produção de bioplásticos em 2023 por tipo de material ..	14
Gráfico 3 - Estimativa das capacidades globais de produção de bioplásticos em 2028 por tipo de material	14
Figura 2 - Estrutura química do PLA	16
Figura 3 - Aplicações práticas do PLA.....	17
Figura 4 - Ciclo de produção e degradação de PLA.....	18
Figura 5 - Estrutura química do PHA.....	22
Figura 6 - Ciclo de produção e degradação de PHAs.....	24
Figura 7 - Aplicações práticas dos PHAs	25
Figura 8 - Estrutura química da amida	29
Gráfico 4 - Pegada de carbono das poliamidas produzidas pela <i>Arkema</i> (kg CO ₂ /kg)	33
Figura 9 - Estrutura química do polipropileno	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação dos resultados da literatura sobre os custos de PLA	19
Tabela 2 - Comparação dos custos de diferentes tipos de plástico de origem fóssil	20

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	POLI (ÁCIDO LÁTICO) (PLA).....	16
2.2	POLIHIDROXIALCANOATOS (PHA)	22
2.3	POLIAMIDA (PA).....	29
2.4	POLIPROPILENO (PP).....	33
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
	REFERÊNCIAS.....	38

1 INTRODUÇÃO

Os plásticos estão cada vez mais presentes em toda a economia, servindo como um facilitador essencial para setores tão diversos quanto embalagens, construção, transporte, saúde e eletrônicos. Os plásticos trouxeram enormes benefícios econômicos para esses setores, graças à combinação de baixo custo, versatilidade, durabilidade e alta relação resistência/peso. O sucesso dos plásticos se reflete no crescimento exponencial de sua produção ao longo do último meio século e na substituição cada vez maior de outros materiais para embalagens (Neufeld *et al.*, 2016).

A palavra "plástico" refere-se a um grupo de materiais sintéticos feitos a partir de hidrocarbonetos. Esses materiais são formados através da polimerização, que consiste em uma série de reações químicas com matérias-primas orgânicas, principalmente gás natural e petróleo bruto. Diferentes tipos de polimerização permitem a produção de plásticos com propriedades específicas, como duro ou macio, opaco ou transparente, flexível ou rígido (Zamora *et al.*, 2020).

O plástico é considerado por muitos como uma simplificação da vida moderna, por sua usabilidade e facilidade, porém a sua grande durabilidade pós-uso o transforma num grave problema. Uma parte significativa dos resíduos plásticos termina em aterros sanitários ou é incinerada, causando mais poluição e colaborando para o aquecimento global. Outra parcela destes resíduos é descartada ilegalmente em ruas, praias, rios e oceanos contaminando os ecossistemas. Nos oceanos, o plástico se degrada em microplásticos que são ingeridos pela fauna marinha, a qual é frequentemente capturada e comercializada para consumo humano. Uma boa alternativa para estes problemas seria aumentar o aproveitamento do plástico através da reciclagem, entretanto a sua qualidade se deteriora a cada ciclo de reuso. Isso implica que mais cedo ou mais tarde os resíduos precisam de uma destinação final (Zamora *et al.*, 2020).

Assim, os polímeros biodegradáveis representam uma alternativa para lidar com os problemas citados. Esses materiais combinam as propriedades esperadas dos plásticos, permitem o processamento eficiente e a usabilidade dos produtos, e são ao mesmo tempo biodegradáveis (Šprajcar; Horvat; Kržan, 2012).

Os polímeros são compostos de alta massa molecular, construídos através da interligação de blocos básicos perenes, chamados monômeros. Os organismos vivos em processos metabólicos, sintetizam diferentes polímeros que necessitam para desempenhar várias funções como: transportar informações genéticas (DNA), fornecer rigidez nas paredes celulares (celulose), armazenar energia (em alguns microrganismos, poliéster) etc. Além dos

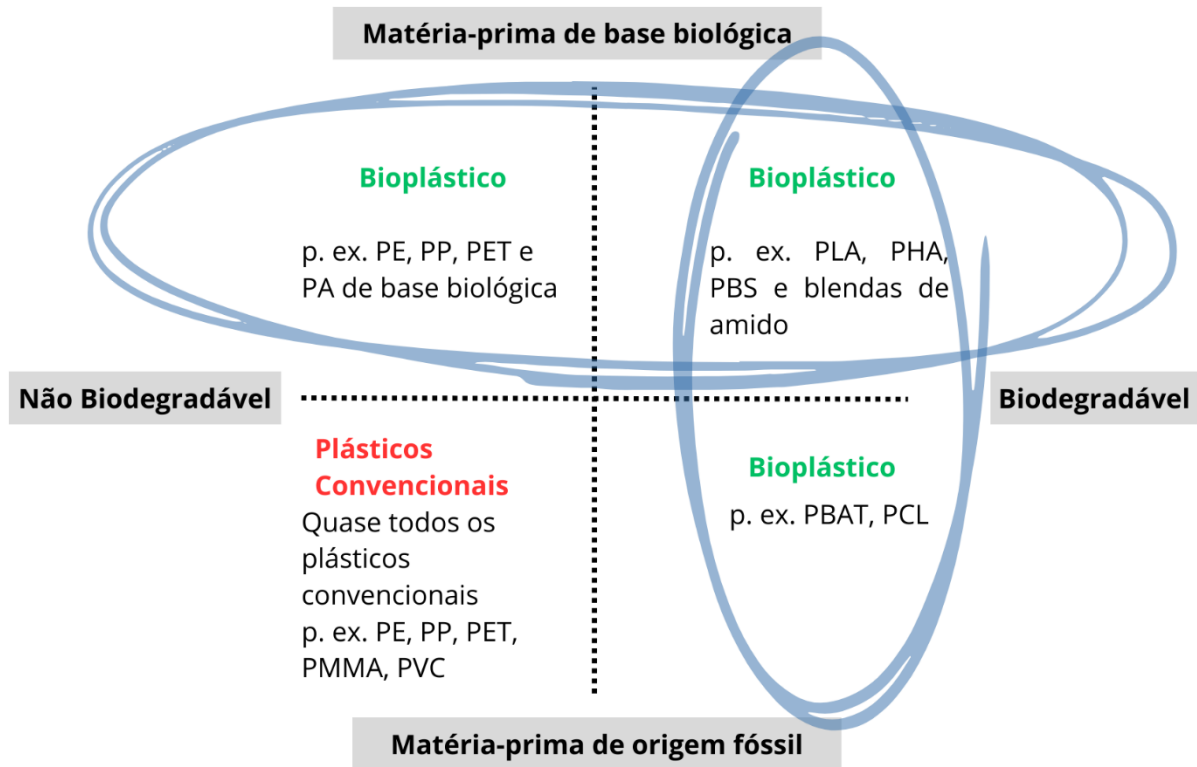
polímeros naturais citados, existem também numerosos polímeros sintéticos que são, em princípio, mais ou menos semelhantes aos naturais, mas são produzidos artificialmente pelo homem, e na natureza não existem. Este grupo é responsável por quase todos os plásticos que usamos, sendo que cerca de 75% de toda produção mundial de plástico é representada por politereftalato de etileno (PET), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e polietileno (PE) (Šprajcar; Horvat; Kržan, 2012).

Os bioplásticos, por sua vez, são compostos por toda uma família de materiais com diferentes propriedades e aplicações. De acordo com a *European Bioplastics*, um material plástico é definido como bioplástico se for de base biológica, biodegradável ou apresentar ambas as propriedades. O termo “de base biológica” significa que o material ou produto é derivado de biomassa, como milho, cana-de-açúcar ou celulose. Já, o termo “base fóssil” ou “origem fóssil”, significa que o material ou produto é derivado do petróleo. Assim, existem três grupos de bioplásticos conforme demonstrado na Figura 1 (European Bioplastics, 2022):

- Plásticos de base biológica (ou parcialmente de base biológica) não biodegradáveis, como polietileno (PE), polipropileno (PP), politereftalato de etileno (PET) e polímeros de desempenho técnico, tais como poliamida (PA), tereftalato de politrimetileno (PTT) ou polímeros totalmente novos, como furanoato de polietileno (PEF);
- Plásticos de base biológica e biodegradáveis, como poli (ácido láctico) (PLA), polihidroxialcanoatos (PHAs), polibutileno succinato (PBS) ou diferentes blendas poliméricas de amido;
- Plásticos baseados em recursos fósseis e biodegradáveis, como polibutileno adipato co-tereftalato (PBAT), mas que poderão ser produzidos, pelo menos parcialmente, a partir de matérias-primas de base biológica no futuro.

O aumento desenfreado na produção e consumo de materiais plásticos, juntamente com o descarte inadequado, e a crescente preocupação com a poluição por microplásticos, está impulsionando tanto as pessoas quanto a indústria a buscar alternativas mais sustentáveis. Nesse contexto, a fabricação de bioplásticos está ganhando destaque. De acordo com a *European Bioplastics*, em 2022, a capacidade global de produção de bioplásticos atingiu 1,81 milhões de toneladas, e estima-se que esse número alcance 7,43 milhões de toneladas até 2028.

Figura 1 - Sistema de coordenadas de materiais para bioplásticos

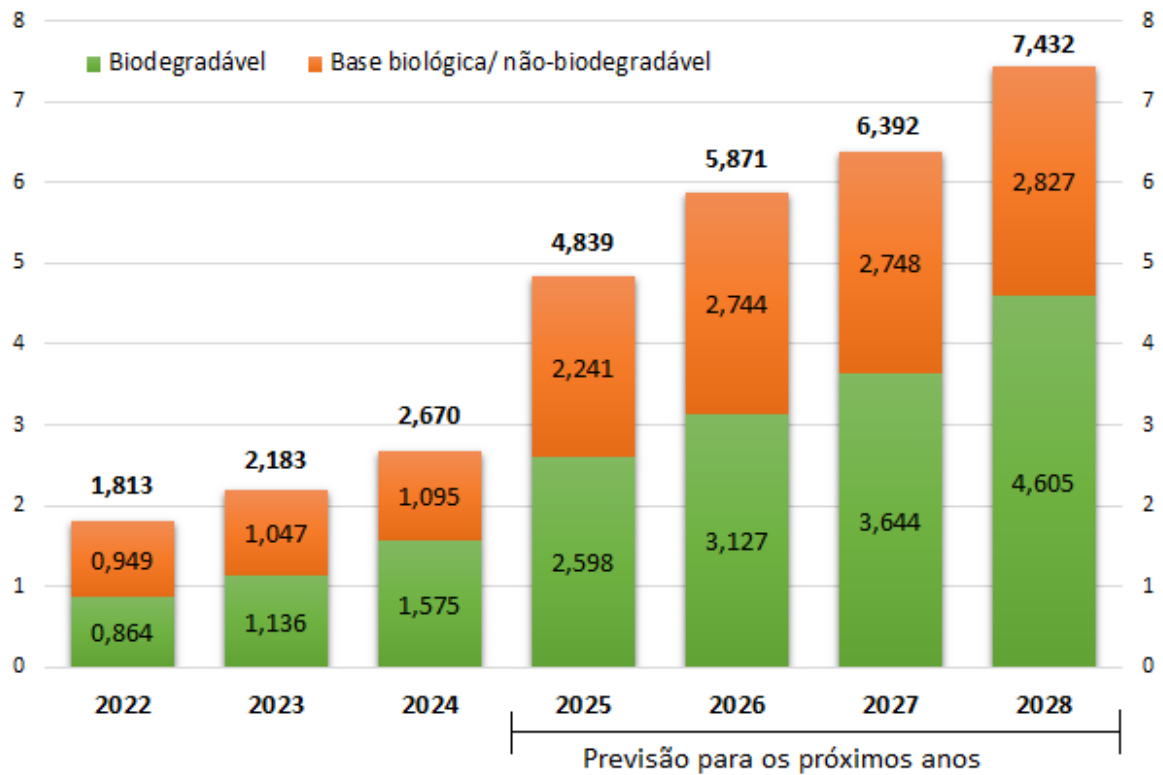


Fonte: Adaptado de European Bioplastics (2022).

O Gráfico 1 apresenta a crescente estimativa da capacidade mundial de produção desses materiais, dividida entre plásticos não biodegradáveis feitos a partir de fontes renováveis e plásticos biodegradáveis.

Esses novos materiais plásticos podem ser processados em uma vasta gama de produtos usando tecnologias convencionais de processamento de plásticos. A indústria de bioplásticos é um setor jovem e inovador com um notável potencial econômico e ecológico, sendo capaz de utilizar os recursos de forma mais eficiente, auxiliando na transição para uma bioeconomia circular de baixo carbono. Estima-se que o mercado global de bioplásticos cresça continuamente nos próximos anos, ultrapassando a marca de dois por cento da produção global de plásticos (European Bioplastics, 2022).

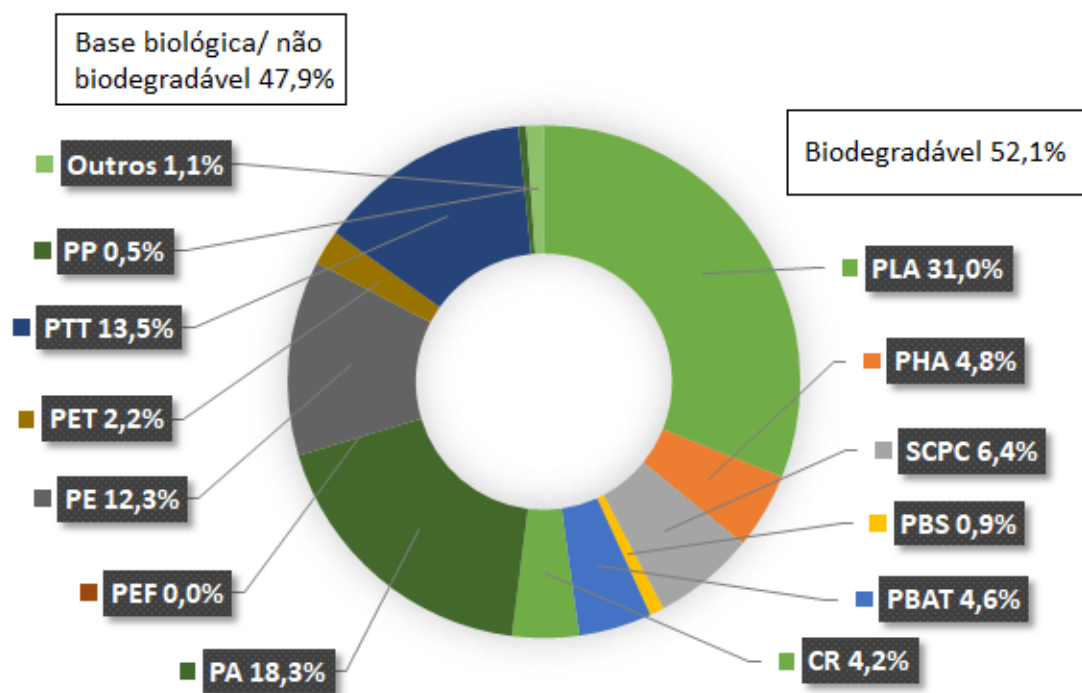
Gráfico 1 - Capacidades globais de produção de bioplásticos 2022-2028 em 1 milhão de toneladas



Fonte: Adaptado de European Bioplastics (2022).

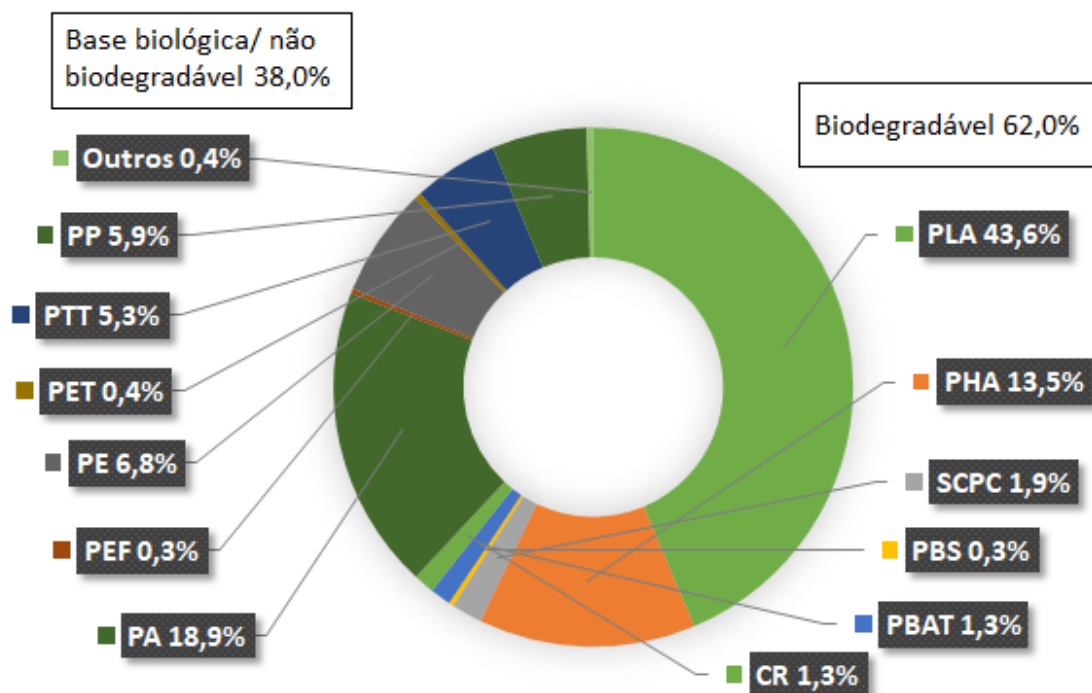
Existem alternativas bioplásticas para quase todos os materiais plásticos convencionais, e aplicações correspondentes. Devido ao forte desenvolvimento de polímeros, como o poli (ácido láctico) (PLA), polihidroxialcanoatos (PHA), poliamidas (PA), bem como um crescimento constante do polipropileno (PP), as capacidades de produção continuarão a aumentar significativamente nos próximos 5 anos. Os bioplásticos são usados para uma variedade cada vez maior de aplicações, desde embalagens e produtos de consumo até eletrônicos, automotivos e têxteis. As embalagens continuam a ser o maior segmento de mercado de bioplásticos, com 43% (934 mil toneladas) do mercado total de bioplásticos em 2023. O Gráfico 2 mostra os tipos de bioplásticos mais produzidos em 2023 e o Gráfico 3 mostra os bioplásticos que potencialmente serão os mais produzidos em 2028 (European Bioplastics, 2023):

Gráfico 2 - Capacidades globais de produção de bioplásticos em 2023 por tipo de material



Fonte: Adaptado de European Bioplastics (2023).

Gráfico 3 - Estimativa das capacidades globais de produção de bioplásticos em 2028 por tipo de material



Fonte: Adaptado de European Bioplastics (2023).

Com base nas informações apresentadas, buscou-se realizar uma revisão da literatura sobre os bioplásticos que provavelmente terão as maiores capacidades de produção em 2028: Poli (ácido láctico) (PLA), Polihidroxialcanoatos (PHA) e Poliamida (PA). Além do Polipropileno (PP) que deve avançar de apenas 0,5% de capacidade global de produção em 2023 para 5,9% em 2028.

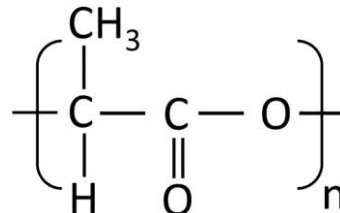
A metodologia utilizada neste trabalho foi a pesquisa bibliográfica e exploratória, onde foi realizada uma extensa busca de material em artigos científicos e livros publicados no intervalo de 2000 até 2024. As bases de dados utilizadas nessa pesquisa foram: Periódicos CAPES, Google Acadêmico e Science Direct. A partir dessas bases de dados foram investigados os seguintes tópicos: plásticos, bioplásticos e polímeros de base biológica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 POLI (ÁCIDO LÁTICO) (PLA)

O poli (ácido lático) (PLA) é atualmente o líder de mercado no segmento de plásticos de base biológica e biodegradáveis e, ao mesmo tempo, é o polímero frequentemente considerado como o mais próximo dos plásticos convencionais em termos de custos de produção. O PLA é um poliéster alifático termoplástico obtido pela polimerização do ácido lático a partir de recursos renováveis, como amido de milho, raízes de tapioca e cana-de-açúcar. A estrutura química geral do PLA é mostrada na Figura 2. Por ser um poliéster termoplástico, este amolece quando aquecido e endurece quando resfriado. Pode ser resfriado e aquecido diversas vezes sem alterar suas propriedades mecânicas e químicas. Isto permite que o material seja moldado e processado por técnicas de liquefação e moldagem e depois reciclado por processos semelhantes. Devido às suas propriedades físicas e químicas, como flexibilidade, brilho e transmitância de luz, o PLA pode competir tecnicamente com os plásticos convencionais, sendo comparável ao PE, PP, PVC, PS e outros plásticos (Wellenreuther; Wolf; Zander, 2022).

Figura 2 - Estrutura química do PLA



O PLA é usado principalmente na indústria alimentícia para preparar artigos de mesa descartáveis, como copos, talheres, bandejas, pratos, recipientes, e embalagens para produtos alimentícios sensíveis (Atiweh *et al.*, 2021). Ele possui alta resistência, mas baixa tenacidade, por isso o uso de aditivos é necessário para alcançar o equilíbrio entre rigidez e tenacidade, juntamente com uma resistência aceitável ao calor (Nagarajan; Mohanty; Misra, 2016). Vários graus comerciais de PLA são projetados especificamente para processos como termoformação e moldagem por extrusão/injeção. Também pode ser usado para revestimentos de retenção de solo, filmes agrícolas, sacolas de compras e uso de material de embalagem. Além disso, o PLA pode ser convertido em fibras, por fiação, e usado para fabricar artigos de tecido descartáveis.

e biodegradáveis, como roupas descartáveis, produtos de higiene feminina e fraldas (Atiweh *et al.*, 2021). Algumas aplicações práticas do PLA são apresentadas na Figura 3.

Figura 3 - Aplicações práticas do PLA



A produção de PLA geralmente envolve as seguintes etapas do processo: extração de matéria-prima, extração de glicose, fermentação e polimerização. O PLA pode ser preparado por condensação direta de ácido láctico ou por polimerização por abertura de anel de dímeros de lactídeo cíclicos (Elsawy *et al.*, 2017). As rotas exatas do processo diferem na escolha das matérias-primas biológicas utilizadas como ponto de partida na produção desses polímeros. Dependendo da matéria-prima, são necessárias diferentes etapas de produção e insumos, o que por sua vez afeta os custos do processo. Em condições naturais, o PLA pode ser degradado em água e dióxido de carbono num tempo controlado e sem causar poluição ambiental grave, ao contrário dos plásticos à base de petróleo (Wellenreuther; Wolf; Zander, 2022).

A Figura 4 representa o ciclo de vida de um produto baseado em PLA. O processo inicial é a fotossíntese (1). Então, o amido é extraído do milho e de outros grãos (2), o qual é

fermentado em ácido láctico (3), que sofre polimerização para a produção de PLA (4). Este plástico é utilizado para fabricação de utensílios de mesa, embalagens, entre outros produtos (5). Após a fase de utilização, o PLA pode ser tratado e descartado de maneira ecologicamente correta (6). Através da compostagem, o PLA sofre biodegradação (6) liberando água e dióxido de carbono que são essenciais para ocorrer a fotossíntese (1), reiniciando o ciclo (Peng; Sun, 2017).

Figura 4 - Ciclo de produção e degradação de PLA



Fonte: Adaptado de Peng e Sun (2017).

O processo de escolha da matéria-prima para a produção de PLA é crucial tanto economicamente, quanto tecnologicamente. Atualmente, o milho e a cana-de-açúcar dominam as fontes vegetais utilizadas para o PLA, mas novos recursos estão sendo explorados para a produção de ácido láctico. Estes incluem resíduos agrícolas e industriais, como palha e bagaço de cana-de-açúcar, bem como subprodutos da indústria alimentícia, como soro de queijo e resíduos de processamento de alimentos. Além disso, há uma tendência crescente de explorar

recursos marinhos, tais como algas, como fontes de matéria-prima. Os custos de produção dependem dos preços das matérias-primas, do progresso tecnológico e dos custos do escalonamento do processo. Medidas políticas e flutuações nos preços do petróleo também influenciam a demanda por plásticos de base biológica e a expansão das capacidades de produção de PLA (Wellenreuther; Wolf; Zander, 2022).

A Tabela 1 compara os resultados de alguns estudos realizados e apresenta o custo médio de produção para uma tonelada de PLA em dólares americanos. Os valores mostram uma ampla faixa de 1.048 a 3.558 USD por tonelada de PLA. Os principais fatores de custos identificados nos estudos foram: custos de matérias-primas, custos de energia, custos de mão-de-obra e custos de capital (Wellenreuther; Wolf; Zander, 2022).

Tabela 1 - Comparação dos resultados da literatura sobre os custos de PLA

Artigo	Matéria-prima(s)	Capacidade de produção anual (t)	Custo médio por ton PLA (USD)
Chiarakorn <i>et al.</i> (2014)	Mandioca	100.000	2.515
Jim Lunt & Associados (2010)	Batata; Madeira	50.000	2.393
Kwan <i>et al.</i> (2018)	Desperdício de comida	10.624	3.558
Manandhar e Shah (2020)	Grão de milho	100.000	1.048
Sanaei e Stuart (2018)	Triticale	100.000	1.204

Fonte: Wellenreuther; Wolf; Zander (2022).

A ampla variação nos resultados decorre das diferentes abordagens de processo consideradas, com diferenças na seleção das matérias-primas e nas suposições sobre o processo de produção. Portanto, os resultados não são diretamente comparáveis. A escolha da matéria-prima é um fator crucial que influencia não apenas os custos diretos associados à entrada de matéria-prima, mas também impacta as etapas subsequentes do processo. Além disso, o uso de energia e a tecnologia envolvida, especialmente na refinaria de PLA, são significativos para os custos de produção, especialmente quando matérias-primas inovadoras são utilizadas. Os custos com aditivos e eliminação de resíduos também variam de acordo com a matéria-prima escolhida e as etapas subsequentes do processo tecnológico (Wellenreuther; Wolf; Zander, 2022).

A Tabela 2 apresenta o preço médio por tipo de plástico de origem fóssil (petróleo) por tonelada. Há uma faixa de variação de preços entre 1.045 e 1.274 USD dependendo do tipo de

plástico. Comparando as Tabelas 1 e 2 verifica-se que embora o PLA possa competir com os plásticos convencionais do ponto de vista técnico, os preços do PLA ainda não conseguem acompanhar os dos plásticos convencionais. Os custos de produção do PLA excedem ou no máximo se igualam aos custos de produção de plásticos de base fóssil.

Tabela 2 - Comparação dos custos de diferentes tipos de plástico de origem fóssil

Tipo de Plástico (fóssil)	Preço médio por t em 2019 (USD)
Filme PEAD	1.110
Filme PEBD	1.045
Fibra homopolímero PP	1.092
PS cristal	1.259
EPS (isopor)	1.274

Fonte: Plastic Portal (2024).

Os bioplásticos à base de PLA são bastante biodegradáveis sob condições de compostagem industrial e digestão anaeróbica, mas dificilmente são biodegradáveis no solo e em ambientes aquáticos. O PLA requer condições específicas de alta temperatura e se degrada por meio de hidrólise abiótica. Por isso, ele é rotulado como compostável na maioria dos países ocidentais (Choe *et al.*, 2021).

Ao mesmo tempo, os bioplásticos também possuem características ecológicas. Por exemplo, a produção de PLA economiza dois terços da energia necessária para fabricar plásticos tradicionais. Além disso, foi cientificamente estabelecido que durante a biodegradação dos bioplásticos PLA, não há aumento líquido no gás dióxido de carbono. Isso foi evidenciado pelo fato de que as plantas a partir das quais foram produzidos absorverem, por meio da fotossíntese, a mesma quantidade de dióxido de carbono que foi liberada durante a biodegradação destes plásticos. Notavelmente, o PLA emite 70% menos gases de efeito estufa quando é degradado em aterros. Outros estudos também citam que a substituição do plástico tradicional por bioplásticos PLA à base de milho pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 25%. Tais exemplos fornecem garantias de que a produção futura de novos bioplásticos pode ser realizada através da utilização de energias renováveis e, ao mesmo tempo, reduzir substancialmente as emissões de gases de efeito de estufa (Atiwehsh *et al.*, 2021).

No Brasil, uma das principais distribuidoras de PLA é a empresa *Entec Polymers*, que comercializa o bioplástico da marca *Ingeo*TM. Este é produzido a partir de fontes como cana-

de-açúcar e mandioca pela empresa estadunidense *Natureworks*, o qual é usado nos filamentos para impressão 3D. Outra grande fabricante é a *BASF*, empresa química alemã global e líder mundial na área química, fundada em 1865 (Equipe eCycle, 2024). Além destas fabricantes, outros importantes agentes do mercado internacional incluem *TotalEnergies Corbion* (Países Baixos), *Futero* (Bélgica), *COFCO* (China), *Mitsubishi Chemicals Corporation* (Japão), *Danimer Scientific* (EUA), *Unitika Ltd.* (Japão), *Evonik Industries* (Alemanha).

Em novembro de 2001, a *NatureWorks* iniciou a produção de 140.000 toneladas por ano de PLA em sua fábrica em Blair, Nebraska. Atualmente, a *NatureWorks* é uma fornecedora líder mundial de biopolímeros. Seu principal produto é o biopolímero *Ingeo™* feito de matérias-primas como milho, mandioca, cana-de-açúcar ou beterraba. Ele é usado em uma ampla gama de aplicações, incluindo utensílios para serviços de alimentação; filmes e folhas; embalagens rígidas termoformadas; fibras; impressão tridimensional; e produtos duráveis. Ao contrário dos plásticos convencionais à base de petróleo, o *Ingeo™* pode ser reciclado de forma simples e econômica. Por exemplo, uma garrafa *Ingeo™* pode ser transformada em outra garrafa repetidas vezes. Por outro lado, as garrafas plásticas tradicionais à base de petróleo são normalmente “recicladas” em produtos de menor valor agregado, como *decks*, e são, por fim, destinadas a aterros sanitários. (NatureWorks, 2024).

A *BASF* conta com duas tecnologias em seu portfólio. Uma delas é o *ecoflex®*, primeiro polímero compostável biodegradável e certificado da *BASF* com base fóssil, e o *ecovio®*, que consiste em um plástico também biodegradável e compostável, originado a partir da combinação do *ecoflex®* e PLA (poli (ácido láctico)), em geral à base de amido de milho. Embora biodegradável, ele não pode ser descartado diretamente na natureza ou em aterros sanitários. O produto deve ser descartado em plantas de compostagem em conjunto com os demais resíduos orgânicos. Assim, em até 180 dias e nas condições ideais, o *ecovio®* converterá 90% de sua massa em CO₂ (dióxido de carbono) e água, e 10% em biomassa que pode ser utilizada como adubo para jardins, hortas e cultivos em geral (BASF, 2020).

Em 2016, a *TotalEnergies* e a *Corbion* uniram forças para desenvolver bioplásticos, criando um empreendimento conjunto para produzir e comercializar polímeros de poli (ácido láctico) (PLA). Com sede nos Países Baixos, as empresas operam uma unidade de produção de PLA de 75.000 toneladas por ano em Rayong, Tailândia. A produção de *Luminy®* PLA de base biológica tem uma pegada de carbono 75% reduzida, incluindo carbono biogênico, em comparação com plásticos convencionais. Esse biopolímero é feito a partir da cana-de-açúcar, mas, em tempos de escassez, a fábrica pode funcionar com matérias-primas alternativas, como a fécula de mandioca. A *TotalEnergies Corbion* aderiu à iniciativa do Pacto Global das Nações

Unidas, comprometendo-se com os dez princípios sobre direitos humanos, trabalho, meio ambiente e combate à corrupção. Esse pacto visa alinhar as empresas com os princípios de sustentabilidade e acelerar a concretização dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU (TotalEnergies Corbion, 2024).

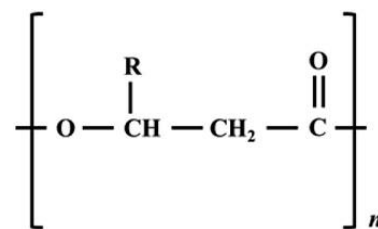
Em suma, o PLA é uma alternativa promissora aos plásticos convencionais, pois é obtido a partir de recursos renováveis e possui propriedades semelhantes aos plásticos petroquímicos, além de ser biodegradável em condições específicas. O desenvolvimento contínuo da indústria de bioplásticos juntamente com avanços em tecnologia e políticas favoráveis, pode permitir que o PLA se torne uma alternativa mais competitiva aos plásticos convencionais, favorecendo a transição para uma economia mais sustentável.

2.2 POLIHIDROXIALCANOATOS (PHA)

Algumas bactérias podem produzir bioplásticos como forma de armazenamento de energia e carbono. Estes bioplásticos são biocompatíveis e, como são comestíveis por microrganismos, são totalmente biodegradáveis. Eles são produzidos pela fermentação bacteriana de lipídios ou açúcar. Polihidroxialcanoatos (PHA), polihidroxibutirato (PHB) e seus subprodutos são os bioplásticos microbianos mais amplamente produzidos (Kumar *et al.*, 2024).

Os PHAs são poliésteres de hidroxialcanoato (HA) e a sua estrutura química é mostrada na Figura 5. Eles são sintetizados por diversos microrganismos, habitando diferentes nichos ecológicos. Essa síntese ocorre na célula em condições adversas, como na escassez de oxigênio e nutrientes essenciais como fósforo ou nitrogênio. No entanto, a presença de uma fonte de carbono é um pré-requisito para a biossíntese de PHAs (Behera *et al.*, 2022).

Figura 5 - Estrutura química do PHA



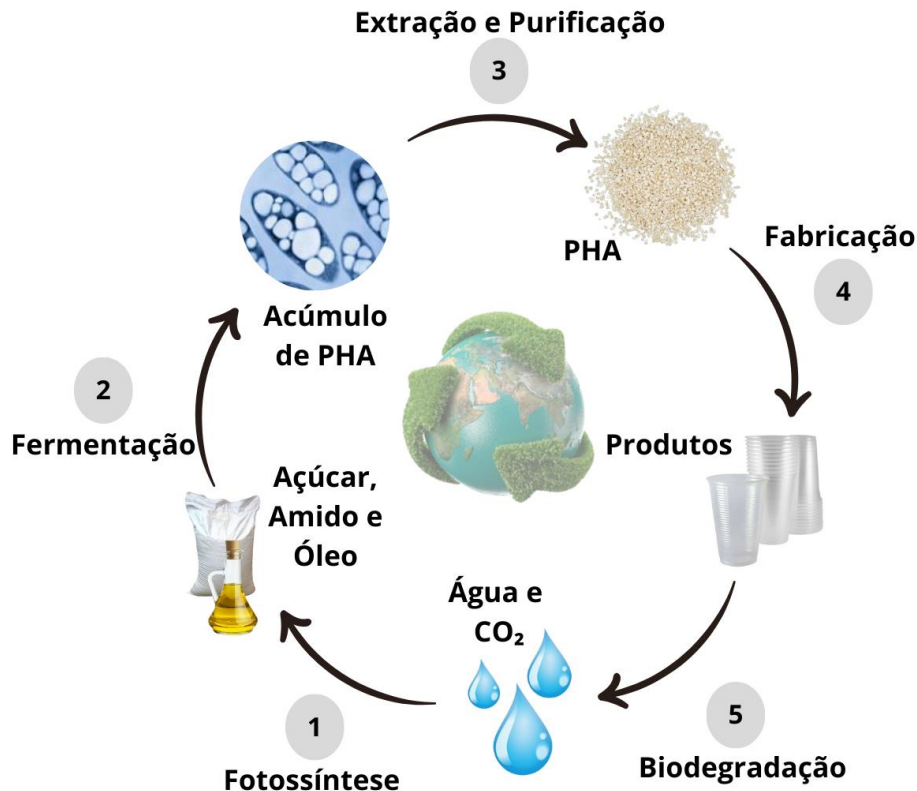
Em particular, o PHA pode ser produzido a partir de metano liberado a partir de matéria-prima em instalações de tratamento de águas residuais, aterros sanitários, instalações de

compostagem, transportadores de resíduos e operadores de biorrefinarias. Desta maneira, uma produção comercial de PHA bem-sucedida e de baixo custo pode ser alcançada. O PHA também pode ser produzido a partir de biomassa de madeira, grama e resíduos de culturas, ao invés de biomassa mais cara obtida de culturas comestíveis. Essa nova tecnologia separa a biomassa da água, e utiliza calor em vez de ácidos, solventes ou enzimas para produzir bioplásticos. O PHA assim produzido pode ser utilizado para fins comerciais, como embalagens de bioplástico, frascos de xampu ou fibras de poliéster que podem ser combinadas com materiais naturais para roupas. Os bioplásticos PHA podem ser digeridos naturalmente por microrganismos marinhos quando são decompostos em metano e chegam ao oceano. No final do seu ciclo de vida, o bioplástico desenvolvido pode ser decomposto em plástico virgem, uma vez que é compostável e degradável no mar (Atiweh *et al.*, 2021).

Embora ambas as abordagens químicas e biológicas possam ser aplicadas para a síntese de PHA, os com maior peso molecular podem ser facilmente produzidos por meios biológicos em comparação com abordagens químicas. A via metabólica para a produção de PHA varia significativamente entre os diferentes grupos microbianos. Esses biopolímeros são sintetizados nas fases estacionária e exponencial do crescimento microbiano. Na fase exponencial, os PHAs são produzidos sob condições favoráveis de crescimento equilibrado. Na fase estacionária, a limitação de nutrientes como nitrogênio, fósforo, oxigênio e fontes excessivas de carbono leva à síntese e acúmulo de PHAs. O excesso de nutrientes é armazenado pelas células microbianas na forma de PHAs, sendo então mobilizado no advento de condições favoráveis de crescimento (Behera *et al.*, 2022).

A Figura 6 representa o ciclo de vida de um produto baseado em PHA. O processo inicial é a fotossíntese (1). Através dela os vegetais produzem açúcar, amido ou óleo, que são fermentados por microrganismos (2). Ocorre o acúmulo microbiano de PHA devido à degradação de hidrocarbonetos. Após esse acúmulo, o PHA é extraído e purificado (3), dando origem ao bioplástico que é utilizado em aplicações industriais, biomédicas e ambientais (4). Com o fim da vida útil do produto, o PHA é descartado sofrendo biodegradação (5), produzindo biomassa, água e dióxido de carbono que, posteriormente, serão consumidos durante o processo de fotossíntese (1), reiniciando o ciclo (Choiniere, 2015).

Figura 6 - Ciclo de produção e degradação de PHAs



Fonte: Adaptado de Choiniere (2015).

As características como biodegradabilidade, biocompatibilidade, não toxicidade e outras propriedades mecânicas tornam os PHAs adequados para uma ampla gama de aplicações em diversos setores. A aplicação industrial destes biopolímeros inclui a sua utilização como material de embalagem, revestimento e sacolas ecológicas. As propriedades antibacterianas relatadas dos polímeros levaram a um interesse crescente no seu uso em produtos sanitários, incluindo fraldas, produtos de higiene feminina e recipientes cosméticos. A natureza de biocompatibilidade destes polímeros é benéfica para a sua utilização em setores biomédicos, incluindo implantes, enxertos ósseos, engenharia de tecidos, e sistemas de administração de medicamentos. É possível utilizar o PHA como matriz para liberação controlada de fármacos como antibióticos, imunógenos, contraceptivos, hormônios e outras substâncias ativas (Behera *et al.*, 2022).

Os PHAs são biodegradáveis no solo em condições aeróbicas e anaeróbicas, portanto, seu uso na agricultura é muito promissor. Eles costumam ser utilizados em redes agrícolas, filmes de cobertura morta e sacos de cultivo agrícola. Os PHAs produzidos em biofilmes ou

bioplásticos para cobertura morta são utilizados não só para proteger as culturas, mas também para aumentar o seu rendimento (Saravanan; Umesh; Kathirvel, 2022).

Como fonte de biocombustíveis, os PHAs são biopoliésteres muito promissores, uma vez que não necessitam ser de alta pureza. Assim, os PHAs podem ser obtidos a partir de culturas, lodos ativados ou águas residuais nutritivas, tornando-os rentáveis, ao mesmo tempo que abordam as controvérsias entre alimentos *versus* combustível e combustível *versus* terra. Depois de serem utilizados como bioplásticos, os PHAs podem sofrer esterificação metílica em biocombustíveis, o que amplia ainda mais seu valor de aplicação. No entanto, ainda é necessária muita pesquisa para torná-los rentáveis, para que os biocombustíveis à base de PHAs possam ser utilizados como alternativa aos biocombustíveis existentes, como o biodiesel, o etanol, o gás metano e o hidrogênio. Além disso, o conceito de biorrefinarias pode ser empregado para a produção de vários outros metabólitos juntamente com PHAs (Riaz; Rhee; Park, 2021).

O uso contínuo de plásticos sintéticos tem sido um dos principais motivos da poluição ambiental, assim os PHAs podem ser um excelente substituto para esses plásticos. A Figura 7 descreve várias aplicações dos polímeros PHA.

Figura 7 - Aplicações práticas dos PHAs



Diferentes microrganismos produzem PHA com uma variedade de estruturas moleculares, proporções de monômeros e pesos moleculares. O poli-3-hidroxibutirato (PHB) destaca-se como o mais abundante e extensivamente estudado, sintetizado por muitas bactérias, incluindo *Cupriavidus necator* Gram negativo, *Ralstonia eutropha*, *Halomonas bluephagesesis* e certos *Bacillus* Gram positivos e *Streptomyces* sp. Até o momento, aproximadamente 92 gêneros bacterianos demonstraram a capacidade de produzir PHA em condições anaeróbicas e aeróbicas, com conhecimento de um número maior que 160 monômeros de PHA, e novos monômeros sintéticos estão sendo adicionados a cada ano (Park *et al.*, 2024).

Vários fatores contribuem para o impacto ambiental do PHA e de outros biomateriais. Conforme mencionado anteriormente, o PHA traz benefícios em termos de impacto ambiental devido à sua biodegradabilidade e origem renovável utilizando matérias-primas verdes. O consumo de energia durante o processo de fermentação para a produção de PHAs é considerado menos intenso do que a produção tradicional de plástico, que envolve a extração e refino de combustíveis fósseis. Os processos petroquímicos emitem gases de efeito estufa significativos, e consomem quantidades substanciais de energia. Minimizar o gasto de energia e o uso de produtos químicos agressivos durante o processamento a jusante da produção de PHA é importante para reduzir o impacto ambiental deste biomaterial. São necessárias mais pesquisas para reduzir os custos deste processamento (Park *et al.*, 2024).

A produção comercial de PHAs de valor agregado foi alcançada através da utilização de microrganismos como bactérias, microalgas e fungos. As propriedades químico-mecânicas destes biopolímeros podem ser alteradas por copolimerização. Assim, vários PHAs exibindo propriedades físicas modificadas podem ser sintetizados variando a sua composição química (Behera *et al.*, 2022).

No entanto, a síntese microbiana de PHAs ainda não foi totalmente explorada. Uma vasta gama de microrganismos com um vasto potencial para a produção em larga escala destes biopolímeros ainda está inexplorada. Os principais obstáculos na produção microbiana de PHAs incluem a seleção eficiente de cepas, o alto custo das fontes de carbono, a energia necessária para o processo de cultivo e fermentação, e a seleção de métodos de extração eficientes e ecologicamente corretos. O desenvolvimento de estratégias avançadas e energeticamente eficientes e a utilização de fontes renováveis de carbono poderiam ser úteis para a produção econômica destes materiais biodegradáveis. Além disso, o desenvolvimento de microrganismos geneticamente modificados pode aumentar o rendimento de PHA. A utilização

destes biopolímeros como substitutos dos plásticos pode, em última análise, reduzir a poluição ambiental causada pelos plásticos derivados do petróleo (Behera *et al.*, 2022).

O custo de produção continua a ser um desafio e o PHA permanece mais caro do que os polímeros à base de petróleo. A demanda por PHA em diferentes indústrias e especialmente em aplicações de ponta pode desempenhar um papel estratégico na redução dos custos de produção. À medida que aumenta a procura de alternativas sustentáveis e biodegradáveis, as economias de escala e os avanços tecnológicos podem contribuir para tornar os PHAs mais competitivos em termos de custos com os plásticos tradicionais no futuro (Park *et al.*, 2024).

Atualmente, mais de 25 empresas, que produzem 30 marcas diferentes, integram o PHA nos seus processos de produção ou nos seus produtos finais. No entanto, apesar dos extensos esforços de investigação, apenas uma seleção limitada de PHAs conseguiu uma produção bem-sucedida em larga escala e está comercialmente disponível como materiais biodegradáveis (Koller; Mukherjee, 2022).

Fundada em 2000 no Brasil, a *PHB Industrial S/A* é considerada atualmente como a maior produtora de açúcar orgânico do mundo. Em conjunto com a criação da empresa foi criada a marca *BIOCYCLE®* que comercializa o homopoliéster P(3HB) e também os copoliésteres P(3HB-co-3HV). Neste processo, *C. necator* é cultivado em modo descontínuo alimentado com sacarose hidrolisada. Esse processo produtivo está integrado à fábrica de açúcar e bioetanol *Usina da Pedra* em Serrana/SP. A tecnologia utilizada foi originalmente desenvolvida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) da Universidade Estadual Paulista (Koller; Mukherjee, 2022). Atualmente não há informações sobre a produção deste bioplástico, o site da marca (<http://www.biocycle.com.br/>) encontra-se fora de operação.

A *Danimer Scientific* foi fundada em 2004 para fabricar polímeros de base biológica e seus compostos como PLA e PHA. Em 2007, a *Danimer Scientific* adquiriu os ativos dos biopolímeros PHA *Nodax™* da *Proctor & Gamble* (P&G). Esse biopolímero é produzido comercialmente em Bainbridge e Winchester nos EUA com capacidade de produção estimada em 10 mil toneladas por ano. Ele está atualmente em uso em uma variedade de aplicações, incluindo filmes, canudos e recipientes para alimentos, sendo aprovado pela *Food and Drug Administration* (FDA). O *Nodax™* é criado através de um processo de fermentação usando uma bactéria que usa como nutrientes óleos derivados de plantas de canola. Segundo a fabricante, na presença de atividade microbiana, como solo, água ou composto industrial, o *Nodax™* se biodegradará em apenas três meses – em vez das centenas de anos dos plásticos petroquímicos (Sustainable Packaging News, 2023).

Em 2020, a empresa de bebidas *Bacardi* firmou parceria com a *Danimer Scientific* para converter suas garrafas de poli (tereftalato de etileno) (PET) em garrafas à base de PHA, reduzindo assim cerca de 3 mil toneladas anuais (correspondendo a 80 milhões de garrafas) de PET atualmente usadas para engarrafar suas bebidas alcoólicas. A nova garrafa será a base de *Nodax™* e deverá se biodegradar numa vasta gama de ambientes, incluindo instalações de compostagem industrial, solo, água doce e ambientes marinhos, e após 18 meses desaparecer sem gerar microplásticos nocivos (Koller; Mukherjee, 2022).

Fundada na Universidade de Princeton e na Universidade Northwestern em 2003, a *Newlight Technologies* desenvolveu, patenteou e comercializou a primeira tecnologia de sequestro de carbono em escala comercial do mundo, capaz de produzir termoplásticos de alto desempenho que podem igualar o desempenho dos plásticos à base de petróleo. O bioplástico fundível da empresa, chamado *AirCarbon*, tem sido usado para fabricar mais de 50 milhões de produtos, incluindo canudos e talheres, bem como óculos de sol e carteiras, e em breve será encontrado em produtos *Nike* e *Sumitomo*. A tecnologia da *Newlight* pode ser operada utilizando uma ampla gama de fontes de carbono, incluindo gases de efeito estufa derivados de sistemas de tratamento de águas residuais, aterros sanitários e instalações de energia. Os microrganismos da *Newlight* retiram o oxigênio do ar, o carbono e o hidrogênio do metano e os combinam em moléculas de PHB dentro das células. Depois que o PHB é extraído, purificado, processado e transformado em pellets de *AirCarbon*, ele está pronto para ser transformado nos objetos do cotidiano. No início de 2021, a *Newlight* inaugurou a *Eagle 3*, sua primeira planta em escala comercial (Mount, 2023).

A *Kaneka Corporation* é uma fabricante de produtos químicos de US\$ 5 bilhões fundada em 1949 em Osaka, Japão. Os compostos *Kaneka Green Planet™* (PHBH) são biopolímeros da família dos PHAs produzidos desde 2011. Esses biopolímeros são poliésteres produzidos a partir de um processo inovador de fermentação usando óleos vegetais como matéria-prima. O que torna os compostos *Kaneka Green Planet™* tão diferentes é que, através de um processo patenteado, combina os monômeros 3-Hidroxihexanoato e 3-Hidroxibutirato para produzir diferentes tipos de biopolímeros. A concentração de cada monômero durante o processo de polimerização criará um tipo diferente de copolímero que pode levar a diferentes tipos de aplicações como canudos, sacolas de compras, talheres e embalagens de alimentos. A *Kaneka Green Planet™* alcançou excelente biodegradabilidade não apenas no solo, mas também na água do mar, o que tem sido um desafio difícil (Kaneka Green Planet, 2024).

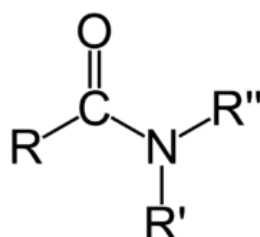
Em resumo, os PHAs são produzidos por microrganismos a partir de fontes renováveis de carbono e representam uma alternativa promissora aos plásticos convencionais devido às

suas propriedades sustentáveis e versáteis. A pesquisa e o desenvolvimento contínuos podem ajudar a tornar sua produção e uso ainda mais eficientes no futuro.

2.3 POLIAMIDA (PA)

As poliamidas (PAs) são provavelmente mais conhecidas pelo nome coloquial de “náilon”, originadas da introdução amplamente bem-sucedida da *PA66* pela *DuPont* para meia-calça feminina na década de 1940. Embora o nome “náilon” tenha sido originalmente limitado à marca registrada *PA66*, desde então passou a ser sinônimo da nomenclatura de todas as poliamidas. As resinas de poliamida são polímeros de condensação linear com alto grau de cristalinidade com repetições de ligações amida ($-\text{CO}-\text{NH}-$) em sua cadeia molecular (Brehmer, 2013). A Figura 8 apresenta a estrutura química da função orgânica amida.

Figura 8 - Estrutura química da amida



Atualmente, a maior parte das matérias-primas das poliamidas é sintetizada a partir de recursos petroquímicos. Com o crescente esgotamento dos recursos petroquímicos, a pesquisa em poliamidas de base biológica está se tornando cada vez mais importante. O custo de produção de monômeros aromáticos de base biológica é alto, e o desempenho das poliamidas aromáticas de base biológica ainda apresenta uma certa lacuna em comparação com as poliamidas aromáticas tradicionais à base de petróleo. As poliamidas de base biológica atualmente produzidas industrialmente ainda estão limitadas às poliamidas alifáticas. De modo geral, se a fonte de monômeros poliméricos contiver materiais derivados de biomassa e/ou forem obtidos por meio de biofabricação, ela poderá ser chamada de poliamida de base biológica. Felizmente, com o desenvolvimento da engenharia metabólica e da biocatálise, cada vez mais matérias-primas podem vir da biologia. Embora as poliamidas possam ser sintetizadas e produzidas através de matérias-primas de monômeros de base biológica, isso não garante sua

biodegradabilidade. Atualmente, apenas o PA-4 e o PA derivado do ácido itacônico foram relatados como poliamidas biodegradáveis (Zheng *et al.*, 2024).

Poliamidas alifáticas de base biológica (bio-PAs) são PAs que foram total ou parcialmente sintetizadas a partir de recursos renováveis como óleos vegetais, ácidos graxos, celulose e lignina. Os bio-PAs são obtidos por diversos métodos: (i) a partir de polímeros naturais brutos ou quimicamente modificados; (ii) por meio da reação de uma mistura de matérias-primas monoméricas obtidas de biomassa e de petróleo; (iii) através da polimerização de monômeros quimicamente adaptados que são totalmente obtidos a partir de matérias-primas de biomassa após complexas transformações químicas para sintetizar bio-PAs. A baixa solubilidade desses polímeros naturais limita seu processamento e aplicações além da dificuldade de remoção de diversas impurezas orgânicas e compostos químicos indesejáveis, os quais exercem influência negativa nas propriedades desses polímeros. Bio-PAs sintetizados a partir de misturas de recursos à base de petróleo e de base biológica ou recursos exclusivamente de base biológica são rotas mais aplicáveis neste campo. Óleos e gorduras vegetais têm sido utilizados há muito tempo como principais matérias-primas de biomassa para a síntese de bio-PAs. O óleo foi a mais antiga fonte conhecida de matéria-prima monomérica obtida a partir de seu processo de transformação química (Khedr, 2023).

Na produção de bio-PAs comercialmente disponíveis, o óleo de mamona da planta *Ricinus communis* é usado como principal matéria-prima de biomassa. O óleo de mamona tem sido considerado há muito tempo como matéria-prima para a fabricação de importantes produtos de consumo, como sabões, lubrificantes e revestimentos. Hoje, o óleo de mamona aparece como uma matéria-prima valiosa para biorrefinarias. Ele é não comestível e não concorrente da cadeia alimentar, portanto, tornando-se adequado para a fabricação de biocombustíveis, bioquímicos e biopolímeros (Khedr, 2023).

Descobriu-se recentemente que as poliamidas 4,4 e 5,4 de base biológica, consistindo de 1,4-diaminobutano, 1,5-diaminopentano e ácido succínico, que são produzidas por bactérias recombinantes, são degradadas por *Brevundimonas vesicularis*. Elas surgiram como soluções eficazes para os atuais problemas plásticos, enquanto as poliamidas produzidas nas últimas décadas apresentaram baixa biodegradabilidade devido às suas ligações de hidrogênio entre cadeias moleculares de poliamida. Essas descobertas abriram um novo capítulo na produção de poliamidas de base biológica, sugerindo a possibilidade de utilizá-las como poliamidas recicláveis e, como resultado, proporcionando benefícios ambientais através da reciclagem. Assim, espera-se também que a produção de monômeros de poliamida, como diaminas, ácidos aminocarboxílicos e diácidos a partir de recursos renováveis, tenha um grande impacto nas

indústrias de bioplásticos. No entanto, os processos de base biológica para a produção destes produtos químicos de plataforma ainda estão em fase de pesquisa e desenvolvimento (Son *et al.*, 2023).

Em direção ao objetivo de substituição imediata de monômeros derivados de petróleo por monômeros derivados de biomassa, há esforços contínuos para desenvolver um processo de biorrefinaria completo – fábrica de células microbianas superiores e processos eficientes de fermentação e purificação em escala piloto. Tendo o processo de biorrefinaria completo desenvolvido, um processo bioquímico híbrido para a produção biológica de monômeros de poliamida pode ser ainda previsto através da conversão química de monômeros de base biológica em poliamida. Além disso, este processo híbrido pode ser melhorado pela identificação e/ou desenvolvimento de enzimas que catalisam eficientemente a reação de formação de anel, polimerização de abertura de anel e degradação de poliamida; com o objetivo de estabelecer chassis microbianos para produção de poliamida de base biológica e biodegradável totalmente sustentável (Son *et al.*, 2023).

A *Evonik* é uma das empresas líderes mundiais em especialidades químicas. Ela está sediada na Alemanha e opera fábricas de 27 países em seis continentes. Sob o nome *Vestamid® Terra*, a *Evonik* comercializa um grupo de novas poliamidas baseadas em matérias-primas renováveis. Os monômeros são obtidos parcial ou totalmente a partir do óleo de mamona. A mamona cresce principalmente em áreas secas e não é utilizada como alimento e nem ração animal. As biopoliamidas produzidas pela *Evonik* são polímeros de alto desempenho, não são descartáveis, não têm limite de tempo de utilização e não apresentam fragilidades técnicas em comparação com produtos equivalentes de origem fóssil. Os campos de aplicação incluem as indústrias automotiva e têxtil, como roupas esportivas ou materiais de estofamento. Atualmente existem duas variantes do *Vestamid® Terra*, uma poliamida 610 e uma poliamida 1010, que diferem em seu perfil de propriedades e preenchem lacunas no espectro de propriedades anteriormente acessível das poliamidas. A PA 610 é um polímero com 62% de base biológica, possuindo melhor resistência térmica, menor densidade e maior resistência química. Já, a PA 1010 é um material derivado de 100% de fonte renovável, apresentando uma menor absorção de umidade e melhor estabilidade dimensional. Estudos demonstraram que as poliamidas de base biológica apresentam um desempenho positivo, especialmente no seu potencial de redução de gases de efeito de estufa e em termos de demanda de energia primária (Evonik Industries AG, 2024).

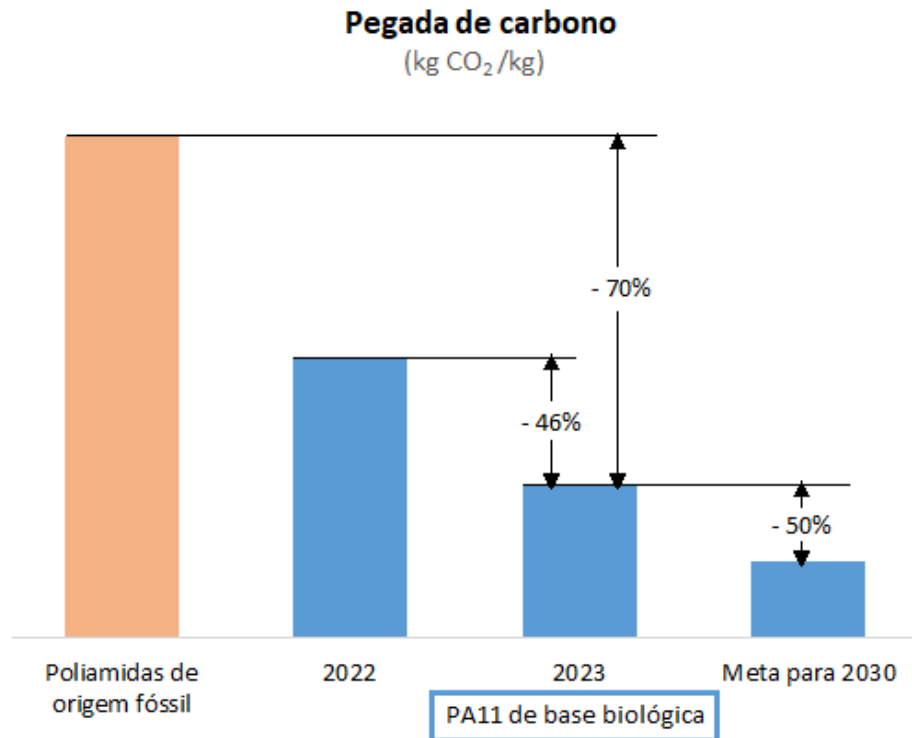
A *Cathay Biotech Inc.* foi fundada em 2000 e se dedica à pesquisa, desenvolvimento, produção e vendas de novos materiais de base biológica baseados na biologia sintética e outras

disciplinas, utilizando tecnologia de biofabricação. Sua sede está localizada no parque Zhangjiang Hi-Tech em Xangai na República Popular da China. Ela produz uma marca de fibra de poliamida de base biológica para a indústria têxtil chamada *Terryl®*. Essa fibra é feita com conteúdo de carbono renovável de 45% até 100%. Isto reduz efetivamente a utilização de produtos fabricados a partir de matérias-primas fósseis, como o petróleo, e reduz assim as emissões de carbono. Em comparação com fibras de poliamida provenientes de recursos fósseis como o petróleo, as fibras *Terryl®* têm excelentes características de desgaste, como fácil tingimento a baixas temperaturas, toque macio e agradável à pele, boa absorção de umidade e suor, boa resistência ao desgaste e às intempéries. Suas propriedades naturais de retardamento de chama também trazem vantagens exclusivas em algumas aplicações especiais como fios industriais, tiras de isolamento, conectores eletrônicos e elétricos, peças periféricas de motores automotivos e componentes leves para geração de eletricidade eólica (Cathay Biotech Inc., 2024).

A *Arkema* é uma fabricante multinacional de materiais especiais (soluções adesivas, materiais avançados e soluções de revestimento), com sede em Colombes, França. A empresa desenvolveu a partir de sementes de mamona, a poliamida 11 *Rilsan®* que é 100% de base biológica segregada. Ela é utilizada em um grande número de aplicações como as indústrias automotiva, têxtil, petróleo, gás, fios e eletrônica, por sua durabilidade a longo prazo. Inclusive, o monômero amino 11 e os polímeros são produzidos utilizando uma proporção significativa de energia renovável e de baixo carbono. Dessa forma, a *Arkema* atingiu menos de 2 kg CO₂/kg de pegada de carbono, representando uma melhoria de cerca de 70% em relação às resinas tradicionais de poliamida que utilizam matérias-primas fósseis e fontes de energia convencionais. Além disso, conforme o Gráfico 4, há uma projeção para que em 2030 a pegada de carbono seja a metade de 2023 (Arkema, 2023).

Outras empresas que produzem poliamida totalmente ou parcialmente de base biológica são: *Envalior* (Alemanha), *Avient* (EUA), *Fulgar* (Itália), *NILIT* (Israel), *Solvay* (Bélgica) e *Indorama* (Tailândia).

De maneira resumida, os “náilons” de base biológica podem ser total ou parcialmente derivados de origens renováveis, exibindo excelentes propriedades mecânicas, térmicas e de absorção de água. Eles oferecem um caminho para reduzir a pegada de carbono de uma empresa e, ao mesmo tempo, satisfazer as atuais expectativas dos consumidores por produtos e materiais mais sustentáveis.

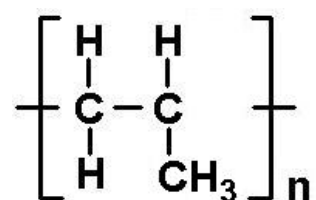
Gráfico 4 - Pegada de carbono das poliamidas produzidas pela *Arkema* (kg CO₂/kg)

Fonte: Adaptado de Arkema (2023).

2.4 POLIPROPILENO (PP)

O polipropileno (PP), como polímero preparado cataliticamente a partir do propileno, foi descoberto em 1954 e ganhou forte popularidade muito rapidamente devido à sua densidade mais baixa entre os plásticos comerciais. A estrutura química geral do PP é mostrada na Figura 9. Ele é um dos termoplásticos mais utilizados, pois oferece uma combinação vantajosa de propriedades como tenacidade, tensão, rasgo e resistência à flexão, bem como resistência química ao calor e à umidade (Gijsman; Fiorio, 2023).

Figura 9 - Estrutura química do polipropileno



Ademais, o PP pode ser processado pelas técnicas mais relevantes, por exemplo, moldagem por injeção, extrusão de filmes e fibras, termoformagem e moldagem por sopro. Como material polimérico fundamental, o PP tem sido intensamente utilizado em diversas áreas, abrangendo automóveis, cosméticos, têxteis e embalagens de consumo devido à grande processabilidade, resistência química e barreiras à umidade. Quase um quarto da demanda mundial de termoplásticos é de polipropileno (Gijsman; Fiorio, 2023).

O PP é o segundo plástico de base mais popular na indústria petroquímica, no entanto, mais de 90% dos seus impactos ambientais são atribuídos à fase de fabricação, de acordo com uma recente avaliação do ciclo de vida (ACV) dos produtos PP. Consequentemente, estão sendo realizados esforços contínuos para produzir PP de base biológica em nível industrial através de processos ecológicos. Atualmente, o biopolipropileno (bio-PP) ainda está em fase de produção piloto e não foi totalmente comercializado, respondendo por 1,9% do mercado de bioplásticos. Métodos sustentáveis de obtenção de propileno a partir de recursos biológicos renováveis estão sendo investigados para diminuir o efeito ambiental e o esgotamento dos combustíveis fósseis (Wang *et al.*, 2023).

O propileno pode ser gerado de diversas maneiras a partir de fontes biológicas. O mais popular é a fermentação da cana-de-açúcar para produzir bioetanol, um dos principais intermediários para a síntese do bio-PP. Esse método bioquímico está sendo comercializado pela empresa petroquímica *Braskem*, que é líder na fabricação de biopolietileno (bio-PE). O bioetanol é primeiro convertido em etileno por meio de desidratação, que é posteriormente transformado em buteno por meio de dimerização. Finalmente, o monômero de propileno é obtido por metátese de etileno e buteno. Outra abordagem é através de um processo termoquímico, que emprega diferentes tipos de matéria-prima de biomassa rica em carbono (por exemplo, milho, grama, resíduos agrícolas, etc.) que poderiam ser gaseificadas para gerar biogás de síntese. No entanto, a abordagem de gaseificação tem despesas de capital muito maiores do que a rota de fermentação. Além disso, o hidrotratamento de óleo vegetal ou óleo de cozinha usado também pode ser utilizado para produzir propileno verde, procedimento atualmente empregado pela *Neste* (Wang *et al.*, 2023).

O principal desafio enfrentado pelos produtores de bio-PP é o desenvolvimento de tecnologias de processo que sejam competitivas em termos de custos com o PP produzido a partir de combustíveis fósseis. Como a produção em larga escala de PP de base biológica começou em 2019, o mercado ainda está em fase inicial. Devido às suas propriedades versáteis e diversificadas, prevê-se que o bio-PP se torne mais popular em uma série de setores de

utilização final. Com base na sua aplicação, o mercado é dominado principalmente pelo setor de embalagens, devido à forte demanda em diversas indústrias, incluindo alimentos e bebidas, produtos de consumo e automóveis. Este material também pode ser utilizado no setor de construção, para fabricação de painéis, tubos, materiais isolantes ou retardadores de chama (Wang *et al.*, 2023).

Kikuchi *et al.* (2017) fizeram a avaliação de ciclo de vida para verificar a redução das emissões de gases de efeito estufa devido à substituição de produtos derivados de combustíveis fósseis por produtos derivados de biomassa. Os resultados mostram redução nas emissões de gases de efeito estufa no uso de resinas de bio-PE e bio-PP. Porém, a taxa de redução do bio-PE é maior que a do bio-PP, porque as etapas da reação são aumentadas e consomem energia adicional na síntese do propileno.

Em 2019, a *Neste*, maior produtora mundial de diesel renovável a partir de resíduos, e a *LyondellBasell*, uma das maiores empresas de plásticos, produtos químicos e refino do mundo, anunciaram em conjunto a primeira produção paralela de polipropileno de base biológica e polietileno de baixa densidade de base biológica em escala comercial. O projeto conjunto utilizou hidrocarbonetos renováveis da *Neste* derivados de matérias-primas de base biológica sustentáveis, como resíduos e óleos residuais. O projeto produziu com sucesso vários milhares de toneladas de plásticos de base biológica que são aprovados para a produção de embalagens de alimentos e comercializados com o nome de *Circulen Renew*. Esses plásticos são equivalentes à qualidade da resina virgem, enquanto diminuem o uso de matéria-prima fóssil e contribuem para a redução das emissões de dióxido de carbono ao longo do ciclo de vida do produto (Neste Corporation, 2019).

A *Braskem* é uma empresa global líder na produção de resinas termoplásticas de origem fóssil (PE, PP e PVC) nas Américas e também em biopolímeros de PE a partir de matéria-prima renovável. Em janeiro de 2023 ela anunciou um projeto para avaliar um investimento na produção de polipropileno (PP) de base biológica com pegada de carbono negativa nos EUA. O projeto utilizaria a tecnologia comprovada e proprietária da *Braskem* para converter bioetanol em polipropileno de base biológica fisicamente segregado. Os EUA abrigam a maior produção industrial de etanol do mundo e contam com ampla tecnologia, infraestrutura e disponibilidade de suprimentos para um projeto na cadeia de valor de polímeros. O PP de base biológica seria uma solução imediata que possui as mesmas propriedades técnicas e reciclabilidade encontradas hoje no atual portfólio de PP da *Braskem*, com o benefício adicional de uma pegada de carbono negativa. A empresa tem a meta de ter 1 milhão de toneladas de capacidade de biopolímeros até 2030 e tornar-se neutra em carbono até 2050 (Braskem, 2023).

Outras participantes da indústria de bio-PP incluem *Mitsui Chemicals, Inc.* (Japão), *Borealis AG.* (Áustria) e *NaturePlast* (França).

Em síntese, o bio-PP ainda está em fase de produção piloto, respondendo por uma pequena fração do mercado de bioplásticos. O seu desenvolvimento enfrenta desafios significativos, incluindo a competição de custos com o PP convencional. No entanto, espera-se que o bio-PP ganhe popularidade em diversos setores devido às suas propriedades versáteis e sustentabilidade.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os avanços na pesquisa e desenvolvimento de polímeros de base biológica, como poli(ácido láctico) (PLA), polihidroxialcanoatos (PHAs), poliamida (PA) e polipropileno (PP), representam uma mudança significativa na indústria de plásticos em direção a materiais mais sustentáveis e ecologicamente corretos. Esses polímeros estão encontrando novas aplicações em uma variedade de setores industriais, havendo uma demanda crescente impulsionada por preocupações ambientais e regulatórias.

Embora os biopolímeros representem uma alternativa promissora aos plásticos tradicionais, eles enfrentam vários desafios significativos. Primeiramente, a sua produção em larga escala ainda é mais cara do que a dos plásticos convencionais. Além disso, alguns polímeros de base biológica podem apresentar propriedades inferiores quando comparados aos seus equivalentes sintéticos. Outro ponto crítico é que a produção de certos biopolímeros pode competir com a produção de alimentos devido ao uso das mesmas matérias-primas. Esses fatores combinados criam obstáculos consideráveis para a adoção generalizada destes novos polímeros pela sociedade.

No entanto, investimentos em pesquisa e desenvolvimento têm o potencial de conduzir a avanços que não apenas diminuam os custos de produção, mas também aprimorem o desempenho dos polímeros de base biológica. Colaborações entre empresas, instituições acadêmicas e entidades governamentais podem catalisar a inovação e agilizar a adoção de polímeros sustentáveis. Adicionalmente, educar os consumidores sobre as vantagens dos biopolímeros e destacar a importância da reciclagem pode fomentar uma maior aceitação desses materiais.

Em resumo, os polímeros de base biológica, como PLA, PHAs, PA e PP, oferecem uma alternativa promissora aos plásticos tradicionais derivados de combustíveis fósseis. Com o contínuo avanço da tecnologia e o aumento do foco na sustentabilidade, espera-se que esses materiais desempenhem um papel vital na transição para uma economia mais verde e circular.

REFERÊNCIAS

- ARKEMA. **Arkema continues to lower the carbon footprint of the global production of its bio-based polyamide 11 chain.** 9 out. 2023. Disponível em: <https://www.arkema.com/usa/en/media/news/global/investorrelations/2023/20231009-lower-carbon-footprint-bio-based-rilsan/>. Acesso em: 21 abr. 2024.
- ATIWESH, G. *et al.* Environmental impact of bioplastic use: A review. **Heliyon**, v. 7, n. 9, 1 set. 2021.
- BASF. **O uso de ecovio® - plástico biodegradável e compostável da BASF - ajuda a beneficiar a natureza:** Medição da Sustentabilidade. Brasil, 2020. Disponível em: https://www.basf.com/br/documents/pt/Empresa/Sustentabilidade/msu/PDF_Case_Detalhado_Ecovio%20Copapa.pdf. Acesso em: 28 abr. 2024.
- BEHERA, S. *et al.* Polyhydroxyalkanoates, the bioplastics of microbial origin: Properties, biochemical synthesis, and their applications. **Chemosphere**, v. 294, p. 133723, 1 maio 2022.
- BRASKEM. **Braskem anuncia projeto para avaliar produção de polipropileno de base biológica.** Filadélfia, Pensilvânia. 17 jan. 2023. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/usa/news-detail/braskem-announces-project-to-evaluate-production-of-bio-based-polypropylene>. Acesso em: 21 abr. 2024.
- BREHMER, B. Polyamides from Biomass Derived Monomers. **Bio-Based Plastics: Materials and Applications**, p. 275–296, 2013.
- CATHAY BIOTECH INC. Homepage. Disponível em: <https://www.cathaybiotech.com/en/index.aspx>. Acesso em: 15 maio 2024.
- CHOE, S. *et al.* Bridging Three Gaps in Biodegradable Plastics: Misconceptions and Truths About Biodegradation. **Frontiers in Chemistry**, v. 9, p. 671750, 14 maio 2021.
- CHOINIÈRE, Philip. Development of Polyhydroxyalkanoate Nanoparticles for Cancer Therapy. **Thesis Syracuse University**, 2015.
- ELSAWY, M. A. *et al.* Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 1346-1352, 2017.
- EQUIPE ECYCLE. **Plástico PLA: opção biodegradável e compostável.** Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/pla/>. Acesso em: 28 abr. 2024.
- EUROPEAN BIOPLASTICS. **Market data report 2023.** 2023. Disponível em: https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/2023/EUBP_Market_Data_Report_2023.pdf. Acesso em: 23 abr. 2024.
- EUROPEAN BIOPLASTICS. **What are bioplastics?:** Material types, terminology, and labels – an introduction. 2022. Disponível em: https://docs.european-bioplastics.org/publications/fs/EuBP_FS_What_are_bioplastics.pdf. Acesso em: 23 abr. 2024.

EVONIK INDUSTRIES AG. **Biobased Vestamid® Terra**. Disponível em: <https://www.vestamid.com/en/products-services/VESTAMID-terra>. Acesso em: 5 maio 2024.

FORTUNE BUSINESS INSIGHTS. **Bio-based Polypropylene Market Size & Share**. 1 abr. 2024. Disponível em: <https://www.fortunebusinessinsights.com/bio-based-polypropylene-market-102758>. Acesso em: 21 abr. 2024.

GIJSMAN, P.; FIORIO, R. Long term thermo-oxidative degradation and stabilization of polypropylene (PP) and the implications for its recyclability. **Polymer Degradation and Stability**, v. 208, p. 110260, 1 fev. 2023.

KANEKA GREEN PLANET. Homepage. Disponível em: <https://kanekagreenplanet.com/>. Acesso em: 02 maio 2024.

KHEDR, M. S. F. Bio-based polyamide. **Physical Sciences Reviews**, v. 8, n. 7, p. 827–847, 1 jul. 2023.

KIKUCHI, Y. *et al.* Greenhouse gas emissions and socioeconomic effects of biomass-derived products based on structural path and life cycle analyses: A case study of polyethylene and polypropylene in Japan. **Journal of Cleaner Production**, v. 167, p. 289–305, 20 nov. 2017.

KOLLER, M.; MUKHERJEE, A. A New Wave of Industrialization of PHA Biopolyesters. **Bioengineering**, v. 9, p. 74, 1 fev. 2022.

KUMAR, R. *et al.* An investigation of the environmental implications of bioplastics: Recent advancements on the development of environmentally friendly bioplastics solutions. **Environmental Research**, v.244, p. 117707, 1 mar. 2024.

MOUNT, Ian. **A California startup is turning greenhouse gas into a biodegradable plastic alternative that's being used by Shake Shack, Nike, and H&M**. 10 jan. 2023. Disponível em: <https://fortune.com/2023/01/10/newlight-startup-aircarbon-greenhouse-gas-plastic-alternative/>. Acesso em: 2 maio 2024.

NAGARAJAN, V.; MOHANTY, A. K.; MISRA, M. Perspective on Polylactic Acid (PLA) based Sustainable Materials for Durable Applications: Focus on Toughness and Heat Resistance. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 4, n. 6, p. 2899-2916, 6 jun. 2016.

NATUREWORKS. Homepage. Disponível em: <https://www.natureworksllc.com/>. Acesso em: 26 abr. 2024.

NESTE CORPORATION. **Neste e LyondellBasell anunciam produção em escala comercial de plástico de base biológica a partir de materiais renováveis**. 18 jun. 2019. Disponível em: <https://www.neste.com/news/neste-and-lyondell-basell-announce-commercial-scale-production-of-bio-based-plastic-from-renewable-materials>. Acesso em: 21 abr. 2024.

NEUFELD, Len *et al.* **The new plastics economy: rethinking the future of plastics**. In: WORLD ECONOMIC FORUM. 2016.

PARK, H. *et al.* PHA is not just a bioplastic! **Biotechnology Advances**, v. 71, p. 108320, 1 mar. 2024.

PENG, Tao; SUN, Wenjun. Energy modelling for FDM 3D printing from a life cycle perspective. **International Journal of Manufacturing Research**, v. 12, n. 1, p. 83-98, 2017.

PLASTIC PORTAL. **Weekly commodity price report**. Disponível em: <https://www.plasticportal.eu/en/cenove-reporty/>. Acesso em: 26 abr. 2024.

RIAZ, S.; RHEE, K. Y.; PARK, S. J. Polyhydroxyalkanoates (Phas): Biopolymers for biofuel and biorefineries. **Polymers**, v. 13, p. 253, 1 jan. 2021.

SARAVANAN, K.; UMESH, M.; KATHIRVEL, P. Microbial Polyhydroxyalkanoates (PHAs): A Review on Biosynthesis, Properties, Fermentation Strategies and Its Prospective Applications for Sustainable Future. **Journal of Polymers and the Environment**, v. 30, p. 4903-4935, 1 dez. 2022.

SON, J. *et al.* Recent advances in microbial production of diamines, aminocarboxylic acids, and diacids as potential platform chemicals and bio-based polyamides monomers. **Biotechnology Advances**, v. 62, p. 108070, 1 jan. 2023.

ŠPRAJCAR, M.; HORVAT, P.; KRŽAN, A. **Biopolymers and bioplastics**: plastics aligned with nature. Ljubljana: National Institute of Chemistry, 2012.

SUSTAINABLE PACKAGING NEWS. **Danimer Scientific**: Pioneering Biodegradable Materials for a Sustainable Future. 31 maio 2023. Disponível em: <https://spnews.com/danimer-scientific-pioneering-biodegradable-materials-for-a-/>. Acesso em: 1 maio 2024.

TOTALENERGIES CORBION. Homepage. Disponível em: <https://www.totalenergies-corbion.com/>. Acesso em: 28 abr. 2024.

WANG, S. *et al.* Bio-Polypropylene and Polypropylene-based Biocomposites: Solutions for a Sustainable Future. **Chemistry - An Asian Journal**, v. 18, n. 2, p. e202200972, 17 jan. 2023.

WELLENREUTHER, C.; WOLF, A.; ZANDER, N. Cost competitiveness of sustainable bioplastic feedstocks – A Monte Carlo analysis for polylactic acid. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 6, 1 fev. 2022.

YU, J. *et al.* PLA bioplastic production: From monomer to the polymer. **European Polymer Journal**, v. 193, p. 112076, 19 jul. 2023.

ZAMORA, A. M. *et al.* **Atlas do plástico**: Fatos e números sobre o mundo dos polímeros sintéticos. Rio de Janeiro: Fundação Heinrich Böll no Brasil, 2020.

ZHENG, L. *et al.* Recycling and Degradation of Polyamides. **Molecules**, v. 29, n. 8, p. 1742, 11 abr. 2024.