

Polímeros de base ecológica: Uma revisão sobre bioplásticos com maior potencial de fabricação

 <https://doi.org/10.56238/sevened2024.026-027>

Leonardo Luís Rossetto

Laboratório de Microbiologia e Bioprocessos,
Universidade Federal da Fronteira Sul, Ciência e
Tecnologia Ambiental.

Altemir José Mossi

Laboratório de Microbiologia e Bioprocessos,
Universidade Federal da Fronteira Sul, Ciência e
Tecnologia Ambiental.

Nycollas Stefanello Vianna

Laboratório de Microbiologia e Bioprocessos,
Universidade Federal da Fronteira Sul, Ciência e
Tecnologia Ambiental.

Helen Treichel

Laboratório de Microbiologia e Bioprocessos,
Universidade Federal da Fronteira Sul, Ciência e
Tecnologia Ambiental.
E-mail: helentreichel@gmail.com

RESUMO

Atualmente, é quase impossível imaginar um mundo sem plásticos. Estes são amplamente utilizados em vários setores da economia, como embalagens, construção, transporte, saúde e eletroeletrônicos, devido ao seu baixo custo, versatilidade, durabilidade e alta relação resistência/peso. No entanto, a durabilidade dos plásticos após o uso torna-se um problema ambiental, pois 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 e/ou ambos. Os bioplásticos incluem poli(ácido láctico) (PLA), polihidroxialcanoatos (PHA), poliamida de base biológica (PA) e polipropileno (PP), que têm o potencial de substituir os plásticos convencionais em várias aplicações. A produção global de bioplásticos está crescendo, estimada em 7,43 milhões de toneladas até 2028, impulsionada pela demanda por alternativas mais sustentáveis. Apesar dos desafios, como altos custos de produção e até propriedades inferiores em relação aos plásticos sintéticos, os investimentos em pesquisa e desenvolvimento prometem melhorar esses materiais. Este escopo analisa os bioplásticos com o potencial de fabricação mais significativo nos próximos anos. Com o avanço tecnológico e a crescente conscientização ambiental, espera-se que os bioplásticos sejam cruciais na transição para uma economia circular de baixo carbono.

Palavras-chave: Bioplásticos, Poli (ácido láctico), Poliamida, Polihidroxialcanoatos, Polímeros, Polipropileno.

1 INTRODUÇÃO

Os plásticos estão cada vez mais presentes em toda a economia, servindo como um facilitador essencial para setores tão diversos como embalagens, construção, transporte, saúde e eletrônica, e têm trazido enormes benefícios económicos a estes setores, graças à combinação de baixo custo, versatilidade, durabilidade e elevada relação resistência/peso. O sucesso dos plásticos se reflete no crescimento exponencial de sua produção no último meio século e na crescente substituição de outros materiais de embalagem (Neufeld et al., 2016).

A palavra "plástico" refere-se a um grupo de materiais sintéticos feitos de hidrocarbonetos, materiais formados por 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 duros ou macios, opacos ou transparentes, flexíveis ou rígidos (Zamora et al., 2020).

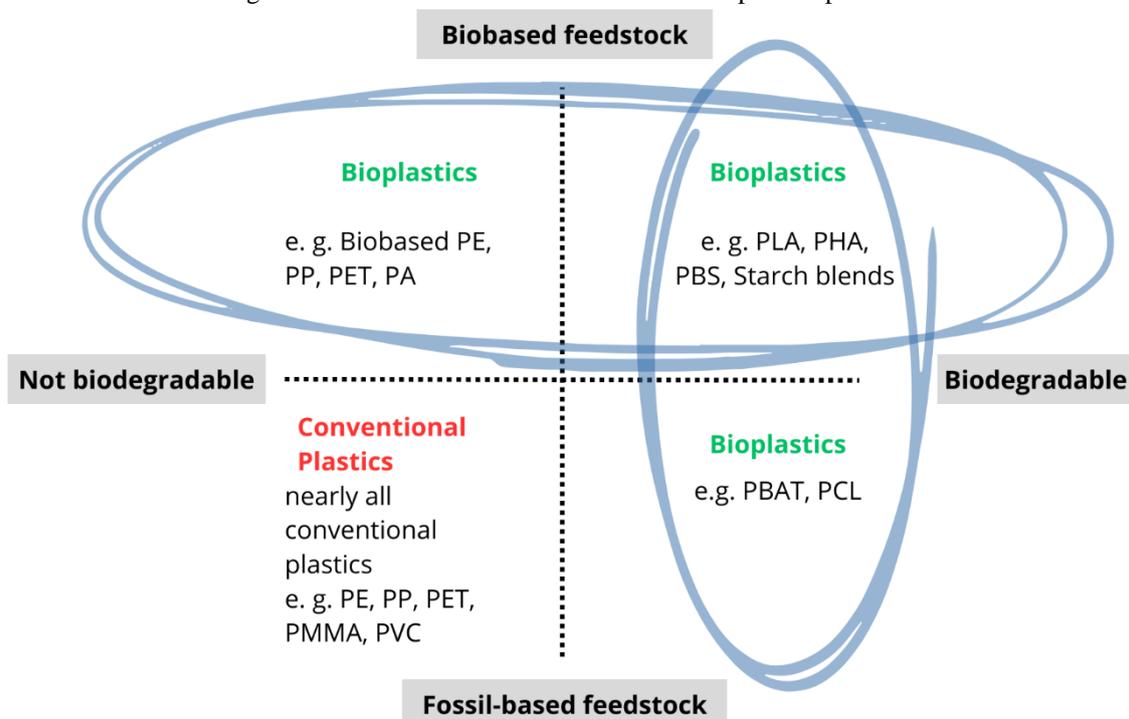
O plástico é considerado por muitos como uma simplificação da vida moderna devido à sua usabilidade e facilidade, mas sua excelente durabilidade pós-uso o torna um problema grave. Uma parcela significativa dos resíduos plásticos é incinerada em aterros sanitários, causando mais poluição e contribuindo para o aquecimento global. Outra parcela desse lixo é descartada ilegalmente em ruas, praias, rios e oceanos, contaminando ecossistemas. Nos oceanos, o plástico se degrada em microplásticos que a fauna marinha ingere, muitas vezes capturados e vendidos para consumo humano. Uma excelente alternativa para esses problemas seria aumentar o uso de plástico por meio da reciclagem; no entanto, sua qualidade se deteriora a cada ciclo de reutilização. Isso implica que, mais cedo ou mais tarde, os resíduos precisam de disposição final (Zamora et al., 2020).

Assim, os polímeros biodegradáveis representam uma alternativa para lidar com os problemas acima. Esses materiais combinam as propriedades esperadas dos plásticos, permitem processamento e usabilidade eficientes dos produtos e são, ao mesmo tempo, biodegradáveis (Šprajcar et al., 2012).

Os polímeros são compostos de alta massa molecular construídos através da interconexão de blocos básicos perenes chamados monômeros. Os organismos vivos em processos metabólicos sintetizam diferentes polímeros de que necessitam para desempenhar várias funções, como transportar informação genética (DNA), fornecer rigidez nas paredes celulares (celulose), armazenar energia (em alguns microrganismos, poliéster), etc. Além dos polímeros naturais mencionados, vários polímeros sintéticos são, em princípio, mais ou menos semelhantes aos naturais. Ainda assim, eles são produzidos artificialmente pelo homem e não existem na natureza. Este grupo é responsável por quase todos os plásticos que utilizamos, sendo que cerca de 75% de toda a produção global de plástico é representada por tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP), poliestireno (PS) e polietileno (PE) (Šprajcar et al., 2012).

Os bioplásticos, por sua vez, compreendem 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 tiver ambas as propriedades. O termo "base biológica" significa que o material ou produto é derivado de biomassa, como milho, cana-de-açúcar ou celulose. O termo "base fóssil" ou "origem fóssil" significa que o material ou produto é derivado do petróleo. Assim, existem três grupos de bioplásticos, conforme mostrado na Figura 1: plásticos de base biológica (ou parcialmente de base biológica), plásticos de base biológica e biodegradáveis e plásticos baseados em recursos fósseis e biodegradáveis (European Bioplastics, 2022).

Figura 1 - Sistema de coordenadas de materiais para bioplásticos

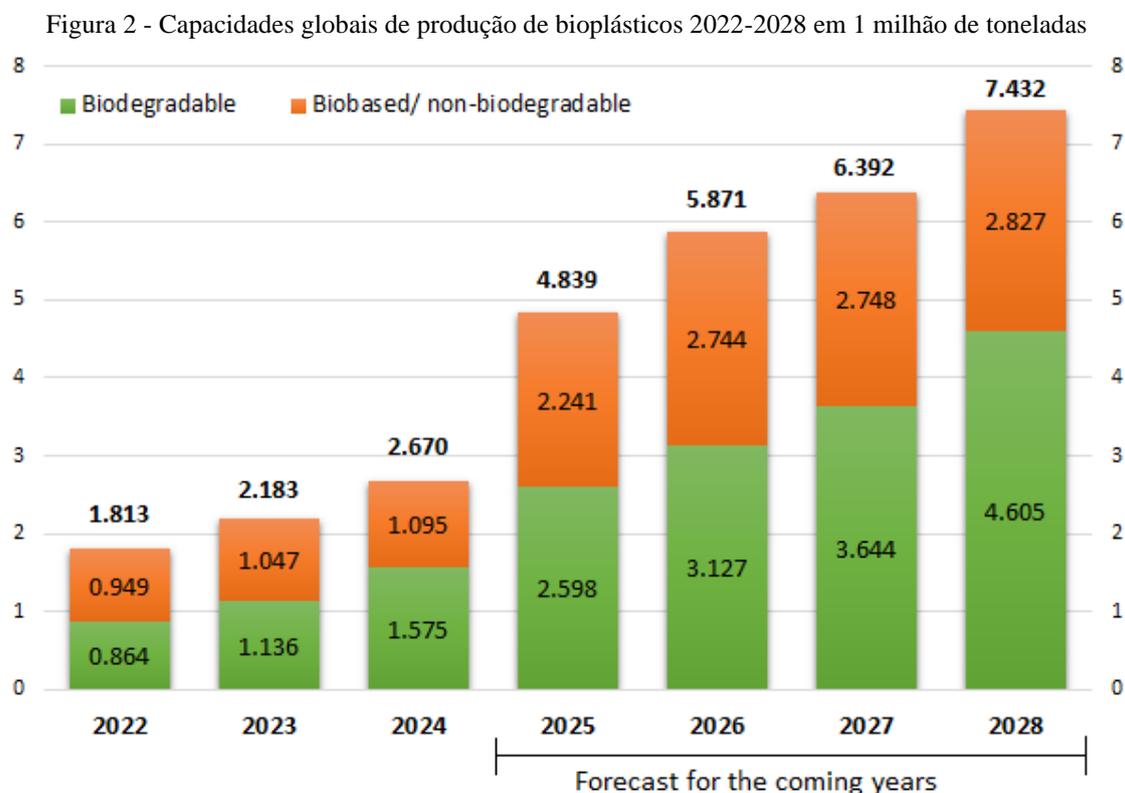


Fonte: Adaptado de Bioplásticos Europeus (2022).

O aumento desenfreado da produção e consumo de materiais plásticos, o descarte inadequado e a crescente preocupação com a poluição por microplásticos estão levando as pessoas e a indústria a buscar alternativas mais sustentáveis. Nesse contexto, a fabricação de bioplásticos vem ganhando destaque, pois, segundo a European Bioplastics, em 2022, a capacidade global de produção desses materiais atingiu 1,81 milhão de toneladas, e estima-se que esse número chegue a 7,43 milhões de toneladas até 2028.

Esses novos materiais plásticos podem ser processados em vários produtos usando tecnologias convencionais de processamento de plástico. A indústria dos bioplásticos é um setor jovem e inovador com notável potencial econômico e ecológico, podendo utilizar os recursos de forma mais eficiente, ajudando na transição para uma bioeconomia circular de baixo carbono. Estima-se que o mercado

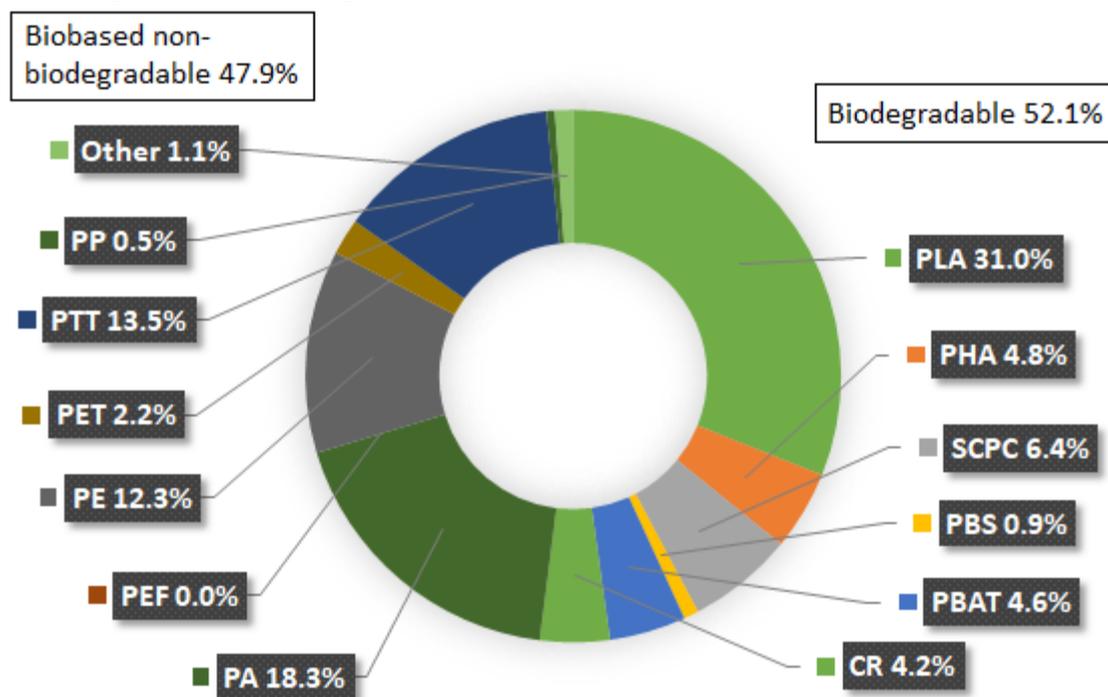
global de bioplásticos cresce continuamente nos próximos anos, ultrapassando a marca de dois por cento da produção global de plásticos (European Bioplastics, 2022). A Figura 2 apresenta a estimativa crescente da capacidade mundial de produção desses materiais, dividida entre plásticos não biodegradáveis feitos a partir de fontes renováveis e plásticos biodegradáveis.



Fonte: Adaptado de Bioplásticos Europeus (2022).

Existem alternativas de bioplástico para quase todos os materiais plásticos convencionais e suas aplicações correspondentes. Devido ao forte desenvolvimento de polímeros como 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 cinco anos. Os bioplásticos são usados para uma variedade crescente de aplicações, desde embalagens e produtos de consumo até eletrônicos, automotivos e têxteis. As embalagens continuam sendo o maior segmento desses produtos, com 43% (934 mil toneladas) do mercado total de bioplásticos em 2023. A Figura 3 mostra os tipos de bioplásticos mais produzidos em 2023, de acordo com a European Bioplastics (2023).

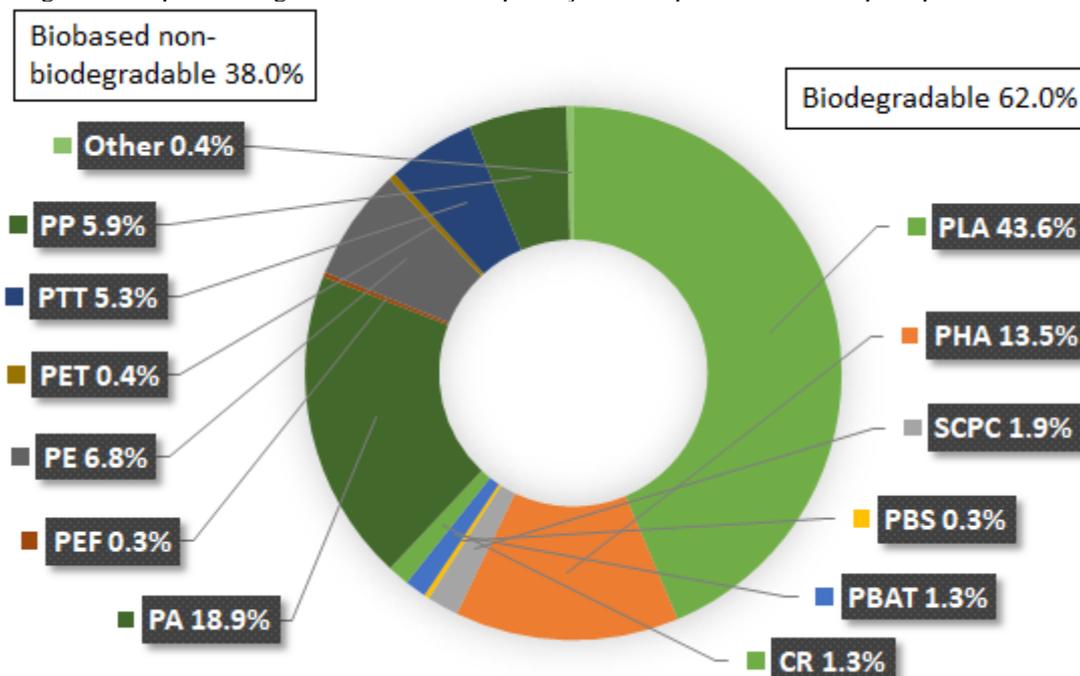
Figura 3 - Capacidades globais de produção de bioplásticos em 2023 por tipo de material.



Fonte: Adaptado de Bioplásticos Europeus (2023).

A seguir, a Figura 4 mostra os bioplásticos que potencialmente serão os mais produzidos em 2028 (European Bioplastics, 2023). Com base nessas informações, é apresentada uma revisão da literatura sobre os bioplásticos que provavelmente terão as maiores capacidades de produção em 2028: Poli (ácido láctico) (PLA), Polihidroxicanoatos (PHA) e Poliamida (PA). Além disso, espera-se que o polipropileno (PP) aumente de apenas 0,5% da capacidade de produção global em 2023 para 5,9% em 2028.

Figura 4 - Capacidades globais estimadas de produção de bioplástico em 2028 por tipo de material.



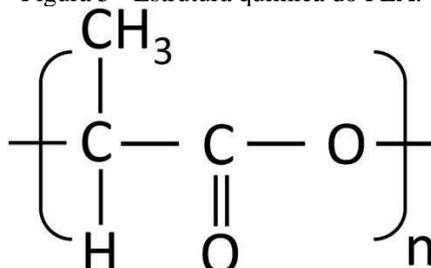
Fonte: Adaptado de Bioplásticos Europeus (2023).

A metodologia utilizada neste estudo foi a pesquisa bibliográfica e exploratória, onde foi realizada uma extensa busca de material em artigos científicos e livros publicados entre 2000 e 2024, e as bases de dados utilizadas nesta pesquisa foram Periódicos CAPES, Google Acadêmico e ScienceDirect. Os seguintes tópicos foram investigados a partir desses bancos de dados: plásticos, bioplásticos e polímeros de base biológica.

2 POLI (ÁCIDO LÁCTICO) (PLA)

O poli(ácido lático) (PLA) é atualmente o líder de mercado no segmento de plásticos de base biológica e biodegradáveis. Ao mesmo tempo, o polímero é frequentemente considerado 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 5.

Figura 5 - Estrutura química do PLA.



Como um poliéster termoplástico, amolece quando aquecido e endurece quando resfriado. Pode ser resfriado e aquecido várias vezes sem alterar suas propriedades mecânicas e químicas. Isso 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, flexibilidade, brilho e transmitância de luz, o PLA pode competir tecnicamente com plásticos convencionais comparáveis a PE, PP, PVC, PS e outros plásticos (Wellenreuther et al., 2022).

O PLA é usado principalmente na indústria alimentícia para preparar talheres descartáveis, como copos, talheres, bandejas, pratos, recipientes e embalagens para produtos alimentícios sensíveis (Atiwesh et al., 2021). Tem alta resistência, mas baixa tenacidade, portanto, os aditivos são necessários para equilibrar rigidez e tenacidade, juntamente com resistência ao calor aceitável (Nagarajan et al., 2016). Vários tipos comerciais de PLA são explicitamente projetados para processos de termoformagem e extrusão/moldagem por injeção. Também pode ser usado para revestimentos de retenção de solo, filmes agrícolas, sacolas de compras e material de embalagem. Além disso, o PLA pode ser convertido em fibras por fiação e usado para fabricar itens de tecido descartáveis e biodegradáveis, como roupas, produtos de higiene feminina e fraldas (Atiwesh et al., 2021).

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 de abertura de anel de dímeros de lactídeo cíclicos (Elsawy et al., 2017). As rotas exatas do processo diferem na escolha das matérias-primas biológicas usadas como ponto de partida na produção desses polímeros. Diferentes etapas de produção e insumos são necessários dependendo da matéria-prima, afetando os custos do processo. Em condições naturais, o PLA pode ser degradado em água e dióxido de carbono em um tempo controlado e sem causar poluição ambiental severa, ao contrário dos plásticos à base de petróleo (Wellenreuther et al., 2022).

A Figura 6 representa o ciclo de vida de um produto baseado em PLA. O processo inicial é a fotossíntese (1). Em seguida, o amido é extraído do milho e de outros grãos (2), que é fermentado em ácido láctico (3), que sofre polimerização para produzir PLA (4). Este plástico é utilizado para fabricar embalagens de louça, entre outros produtos (5). Após a fase de uso, o PLA pode ser tratado e descartado de forma ecologicamente correta (6). Por meio da compostagem, o PLA sofre biodegradação (6), liberando água e dióxido de carbono, essenciais para que ocorra a fotossíntese (1), reiniciando o ciclo (Peng e Sun, 2017).

Figura 6 - Ciclo de produção e degradação do PLA



Fonte: Adaptado de Peng e Sun (2017).

A escolha da matéria-prima para a produção de PLA é crucial tanto econômica quanto tecnologicamente. 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. Isso inclui resíduos agrícolas e industriais, como palha e bagaço de cana-de-açúcar, e subprodutos da indústria alimentícia, como soro de queijo e resíduos de processamento de alimentos. Além disso, há uma tendência crescente de explorar os recursos marinhos para obter matérias-primas como as algas. Os custos de produção dependem dos preços das matérias-primas, do progresso tecnológico e dos custos de escala 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 et al., 2022).

A Tabela 1 compara os resultados de alguns estudos e apresenta o custo médio de produção de uma tonelada de PLA em dólares americanos. Os valores variam de 1.048 a 3.558 USD por tonelada de PLA. Os principais fatores de custo identificados nos estudos foram matérias-primas, energia, mão de obra e capital (Wellenreuther et al., 2022).

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

Referência	Matéria(s) prima(s)	Capacidade de produção anual (t)	Custo médio por tonelada de PLA (USD)
Chiarakorn et al. (2014)	Mandioca	100,000	2,515
Jim Lunt & Associados (2010)	Batata; Madeira	50,000	2,393
Kwan et al. (2018)	Desperdício de alimentos	10,624	3,558
- Manandhar E. Shah (2020)	Grão de milho	100,000	1,048
Sanaei por Stuart (2018)	Triticale	100,000	1,204

A grande variação nos resultados decorre de diferentes abordagens de processo, com diferenças na seleção de matérias-primas e premissas sobre o processo produtivo. Portanto, os resultados não são diretamente comparáveis. A escolha da matéria-prima é um fator crucial que influencia não apenas os custos diretos associados ao seu insumo, 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, principalmente quando são utilizadas matérias-primas inovadoras. Os custos de aditivos e descarte de resíduos também variam de acordo com a matéria-prima escolhida e as etapas subsequentes do processo tecnológico (Wellenreuther et al., 2022).

A Tabela 2 apresenta o preço médio por tipo de plástico de origem fóssil (petróleo) por tonelada. Há uma faixa de preço entre 1.045 e 1.274 USD, dependendo do tipo de plástico. Comparando as Tabelas 1 e 2, pode-se ver 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 tradicionais. Os custos de produção do PLA excedem ou, no máximo, igualam os custos de produção de plásticos de origem fóssil.

Os bioplásticos à base de LA são biodegradáveis em 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 hidrólise abiótica. Portanto, é rotulado como compostável na maioria dos países ocidentais (Choe et al., 2021).

Ao mesmo tempo, os bioplásticos também possuem características ecologicamente corretas. Por exemplo, a produção de PLA economiza dois terços da energia necessária para fazer plásticos tradicionais. Além disso, foi cientificamente estabelecido que não há aumento líquido no gás dióxido de carbono durante a biodegradação dos bioplásticos PLA. Isso foi evidenciado pelo fato de que as plantas das quais foram produzidas absorvem, por meio da fotossíntese, a mesma quantidade de dióxido de carbono liberado durante a biodegradação desses plásticos. Notavelmente, o PLA emite 70% menos gases de efeito estufa quando degradado em aterros sanitários. 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 garantem que a produção futura de novos bioplásticos possa ser realizada por meio de energia renovável e, ao mesmo tempo, reduzir substancialmente as emissões de gases de efeito estufa (Atiweh et al., 2021).

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

Tipo de plástico (fóssil)	Preço médio por tonelada em 2019 (USD)
Filme HDPE	1,110
Filme LDPE	1,045
Fibra de homopolímero PP	1,092
Cristal PS	1,259
EPS (isopor)	1,274

O PLA tem muitas aplicações no Brasil, incluindo utensílios de food service, filmes e lençóis; embalagens rígidas termoformadas; Fibras; impressão tridimensional; e produtos duráveis. Ao contrário dos plásticos convencionais à base de petróleo, este material pode ser reciclado economicamente.

Embora biodegradável, o PLA não pode ser descartado diretamente na natureza ou em aterros sanitários. O produto deve ser descartado em usinas de compostagem junto com outros resíduos orgânicos. Assim, em 180 dias e em condições ideais, converterá 90% de sua massa em CO₂ (dióxido de carbono) e água e 10% em biomassa que pode ser usada como fertilizante para jardins, hortas e plantações.

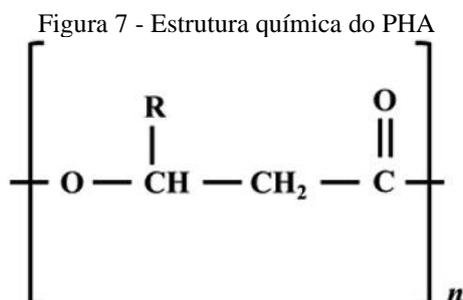
Em suma, o PLA é uma alternativa promissora aos plásticos convencionais, pois é obtido a partir de recursos renováveis, possui propriedades semelhantes aos plásticos petroquímicos e é biodegradável em condições específicas. O desenvolvimento contínuo da indústria de bioplásticos, os avanços tecnológicos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

3 POLIHIDROXIALCANOATOS (PHA)

Algumas bactérias podem produzir bioplásticos como forma de armazenar energia e carbono. Esses bioplásticos são biocompatíveis e, por serem comestíveis por microrganismos, são totalmente biodegradáveis. Eles são produzidos por fermentação bacteriana de lipídios ou açúcar. Os polihidroxicanoatos (PHA), o polihidroxibutirato (PHB) e seus subprodutos são os bioplásticos microbianos mais produzidos (Kumar et al., 2024).

Os PHAs são poliésteres hidroxialcanoato (HA) e sua estrutura química é mostrada na Figura 7. Eles são sintetizados por diferentes microrganismos que habitam diferentes nichos ecológicos. Essa síntese ocorre na célula em condições adversas, como falta 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).

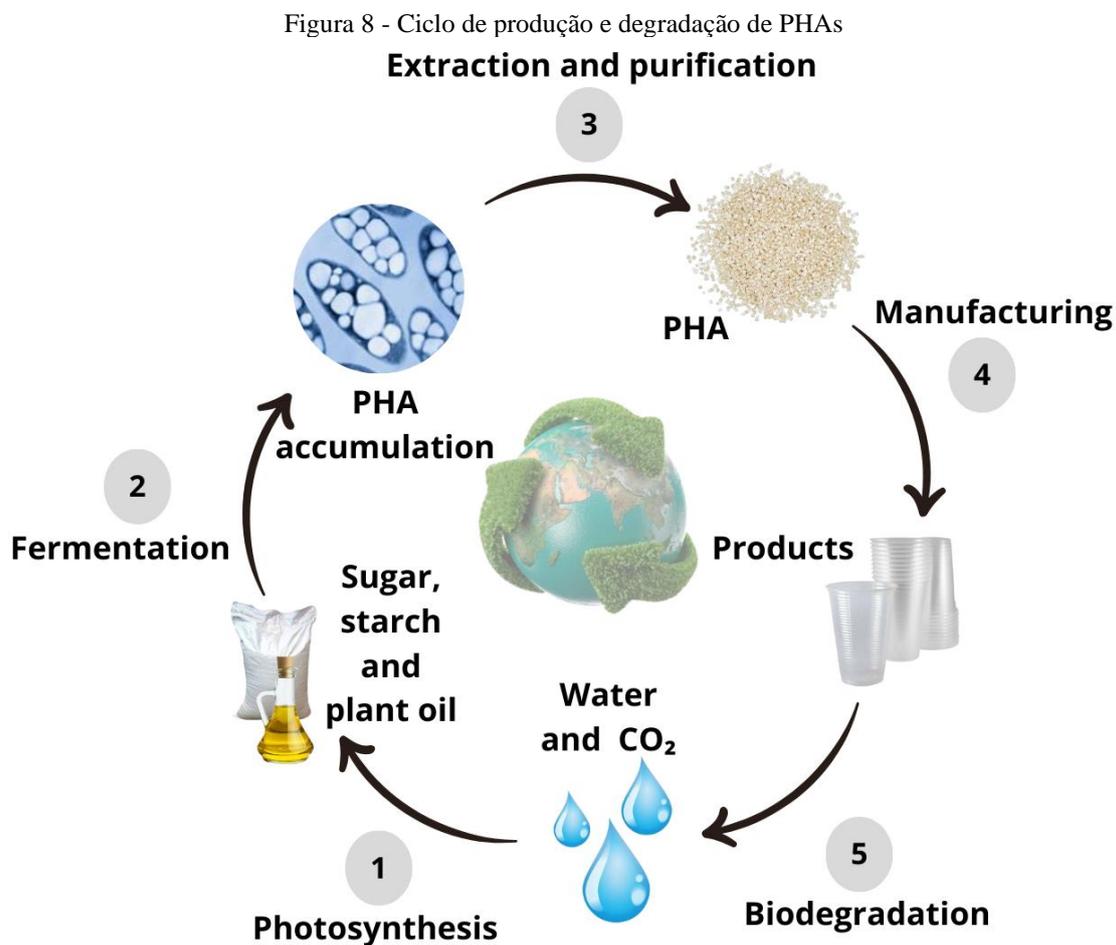


Em particular, o PHA pode ser produzido a partir do metano liberado da matéria-prima em instalações de tratamento de águas residuais, aterros sanitários, instalações de compostagem, transportadores de resíduos e operadores de biorrefinaria. Desta forma, a produção comercial de PHA bem-sucedida e de baixo custo pode ser alcançada. O PHA também pode ser produzido a partir de biomassa de madeira, grama e resíduos de culturas, em vez da biomassa mais cara obtida de culturas comestíveis. Essa nova tecnologia separa a biomassa da água e usa calor em vez de ácidos, solventes ou enzimas para produzir bioplásticos. Assim, o PHA pode ser usado comercialmente em embalagens de bioplástico, frascos de xampu ou fibras de poliéster combinadas com materiais naturais de vestuário. Os microrganismos marinhos podem digerir naturalmente os bioplásticos PHA e chegar ao oceano quando decompostos em metano. No final de seu ciclo de vida, o bioplástico desenvolvido pode ser decomposto em plástico virgem, pois é compostável e degradável no mar (Atiweh et al., 2021).

Embora abordagens químicas e biológicas possam ser aplicadas para sintetizar PHA, aqueles com maior peso molecular podem ser rapidamente produzidos por meios biológicos em comparação com métodos químicos. 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. Os PHAs são produzidos em condições favoráveis e equilibradas de crescimento na fase exponencial. Na fase estacionária, limitar 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 e é então mobilizado com o advento de condições favoráveis de crescimento (Behera et al., 2022).

A Figura 8 representa o ciclo de vida de um produto baseado em PHA. O processo inicial é a fotossíntese (1). Por meio dele, os vegetais produzem açúcar, amido ou óleo, fermentados por microrganismos (2). O acúmulo microbiano de PHA ocorre devido à degradação de hidrocarbonetos. Após esse acúmulo, o PHA é extraído e purificado (3), dando origem ao bioplástico usado em aplicações industriais, biomédicas e ambientais (4). Ao final da vida útil do produto, o PHA é descartado, passando por biodegradação (5), produzindo biomassa, água e dióxido de carbono que

posteriormente serão consumidos durante o processo de fotossíntese (1), reiniciando o ciclo (Choiniere, 2015).



Fonte: Adaptado de Choiniere (2015).

Características como biodegradabilidade, biocompatibilidade, não toxicidade e outras propriedades mecânicas tornam os PHAs adequados para várias aplicações em diversos setores. A aplicação industrial desses biopolímeros inclui seu uso como material de embalagem, revestimento e sacos ecológicos. As propriedades antibacterianas relatadas dos polímeros levaram a um interesse crescente em seu uso em produtos sanitários, incluindo fraldas, produtos de higiene feminina e recipientes de cosméticos. A natureza biocompatível desses polímeros é benéfica para seu uso em setores biomédicos, incluindo implantes, enxertos ósseos, engenharia de tecidos e sistemas de administração de medicamentos. É possível usar o PHA como matriz para a liberação controlada de medicamentos como antibióticos, imunógenos, anticoncepcionais, hormônios e outras substâncias ativas (Behera et al., 2022). O uso contínuo de plásticos sintéticos tem sido uma das principais razões para a poluição ambiental, de modo que os PHAs podem ser um excelente substituto.

Os PHAs são biodegradáveis no solo em condições aeróbicas e anaeróbicas; portanto, seu uso na agricultura é promissor. Eles são frequentemente usados em redes agrícolas, filmes de cobertura

morta e sacos de cultivo. Os PHAs produzidos em biofilmes ou bioplásticos para cobertura morta são usados não apenas para proteger as plantações, mas também para aumentar seu rendimento (Saravanan et al., 2022).

Os PHAs são poliésteres muito promissores como fonte de biocombustíveis, pois não precisam ser de alta pureza. Assim, os PHAs podem ser obtidos de plantações, lodo ativado ou águas residuais nutritivas, tornando-os econômicos ao mesmo tempo em que abordam as controvérsias entre alimentos versus combustível e combustível versus terra. Depois de serem usados como bioplásticos, os PHAs podem sofrer esterificação de metila em biocombustíveis, o que expande ainda mais seu valor de aplicação. No entanto, ainda são necessárias muitas pesquisas para torná-los lucrativos. Os biocombustíveis à base de PHA podem ser uma alternativa aos biocombustíveis existentes, como biodiesel, etanol, gás metano e hidrogênio. Além disso, as biorrefinarias podem produzir vários outros metabólitos com PHAs (Riaz et al., 2021).

Diferentes microrganismos produzem PHA com várias estruturas moleculares, proporções de monômeros e pesos moleculares. O poli-3-hidroxi-butarato (PHB) destaca-se como o mais abundante e extensivamente estudado, sintetizado por muitas bactérias, incluindo *Cupriavidus necator* Gram-negativo, *Ralstonia eutropha*, *Halomonas bluephagesis* e certos *Bacillus* e *Streptomyces* sp. Aproximadamente 92 gêneros bacterianos demonstraram a capacidade de produzir PHA em condições anaeróbicas e aeróbicas, com mais de 160 PHA monômeros conhecidos. Novos monômeros sintéticos são adicionados anualmente (Park et al., 2024).

Vários fatores contribuem para o impacto ambiental do PHA e de outros biomateriais. Como mencionado anteriormente, o PHA traz benefícios em termos de impacto ambiental devido à sua biodegradabilidade e origem renovável usando matérias-primas verdes. O consumo de energia durante o processo de fermentação para produzir 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 usar produtos químicos agressivos durante o processamento a jusante da produção de PHA é essencial para reduzir o impacto ambiental desse biomaterial. Mais pesquisas são necessárias para reduzir os custos desse processamento (Park et al., 2024).

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

No entanto, a síntese microbiana de PHAs ainda não foi totalmente explorada. Uma ampla gama de microrganismos com vasto potencial para produção em larga escala desses biopolímeros permanece 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 escolha de métodos de extração eficientes e ecologicamente corretos. O desenvolvimento de estratégias avançadas e energeticamente eficientes e o uso de fontes renováveis de carbono podem ser úteis para a produção econômica desses materiais biodegradáveis. Além disso, o desenvolvimento de microrganismos geneticamente modificados pode aumentar o rendimento de PHA. O uso desses biopolímeros como substitutos do plástico pode, em última análise, reduzir a poluição ambiental causada por plásticos à base de petróleo (Behera et al., 2022).

O custo de produção continua sendo um desafio, e o PHA continua sendo mais caro do que os polímeros à base de petróleo. A demanda por PHA em diferentes indústrias, especialmente aplicações de ponta, pode reduzir estrategicamente os custos de produção. À medida que a demanda por alternativas sustentáveis e biodegradáveis aumenta, as economias de escala e os avanços tecnológicos podem ajudar a tornar os PHAs mais competitivos em termos de custo com os plásticos tradicionais (Park et al., 2024).

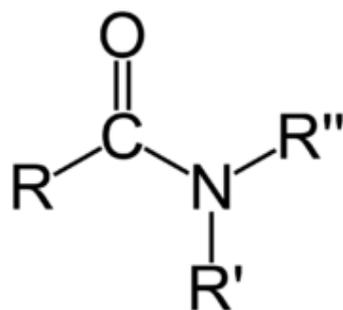
Mais de 25 empresas, produzindo 30 marcas diferentes, integram o PHA em seus processos de produção ou produtos finais. No entanto, apesar da extensa pesquisa, apenas uma seleção limitada de PHAs alcançou uma produção bem-sucedida em larga escala e está disponível comercialmente como materiais biodegradáveis (Koller e Mukherjee, 2022).

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.

4 POLIAMIDA (PA)

As poliamidas (PAs) são provavelmente mais conhecidas pelo nome coloquial "nylon", originário da introdução amplamente bem-sucedida do PA66 para meias-calças femininas na década de 1940. Embora o nome "nylon" tenha sido inicialmente limitado à marca PA66, desde então tornou-se 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 9 mostra a estrutura química da função da amida orgânica.

Figura 9 - Estrutura química da amida



Atualmente, a maioria das matérias-primas de poliamida é sintetizada a partir de recursos petroquímicos. Com o crescente esgotamento dessas fontes, a pesquisa sobre 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 tem uma lacuna particular em comparação com as poliamidas aromáticas tradicionais à base de petróleo. Atualmente, as poliamidas de base biológica produzidas industrialmente ainda estão limitadas a poliamidas alifáticas. Em geral, se a fonte de monômeros poliméricos contiver materiais derivados de biomassa e for obtida por meio de biofabricação, ela pode 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 usando matérias-primas de monômero de base biológica, isso não garante sua biodegradabilidade. Apenas PA-4 e PA derivado do ácido itacônico foram relatados como poliamidas biodegradáveis (Zheng et al., 2024).

Poliamidas alifáticas de base biológica (bio-PAs) são PAs total ou parcialmente sintetizados a partir de recursos renováveis, como óleos vegetais, ácidos graxos, celulose e lignina. Os bio-PAs são obtidos por vários métodos: (i) a partir de polímeros naturais brutos ou quimicamente modificados; ii) através da reação de uma mistura de matérias-primas monoméricas obtidas a partir de biomassa e petróleo; (iii) através da polimerização de monômeros quimicamente adaptados que são inteiramente obtidos a partir de matérias-primas de biomassa após transformações químicas complexas para sintetizar bio-PAs. A baixa solubilidade desses polímeros naturais limita seu processamento e aplicações, e é desafiador remover várias impurezas orgânicas e compostos químicos indesejáveis, que influenciam negativamente suas propriedades. 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. Os óleos e gorduras vegetais têm sido as principais matérias-primas de biomassa para a síntese de bio-PA. O petróleo foi a fonte mais antiga conhecida de matéria-prima monomérica obtida a partir de seu processo de transformação química (Khedr, 2023).

O óleo de rícino da planta *Ricinus communis* é usado como matéria-prima primária de biomassa na produção de bio-PA disponível comercialmente. Este óleo há muito é considerado uma matéria-prima para a fabricação de produtos de consumo essenciais, como sabonetes, lubrificantes e revestimentos. Hoje, o óleo de rícino aparece como uma matéria-prima valiosa para biorrefinarias. Não é comestível e não competitivo na cadeia alimentar, tornando-o adequado para a fabricação de biocombustíveis, bioquímicos e biopolímeros (Khedr, 2023).

Recentemente, descobriu-se que as poliamidas de base biológica 4,4 e 5,4, consistindo de 1,4-diaminobutano, 1,5-diaminopentano e ácido succínico, que são produzidas por bactérias recombinantes, são degradadas por *Brevundimonas vesicularis*. Eles surgiram como soluções práticas para os problemas atuais do plástico, enquanto as poliamidas produzidas nas últimas décadas mostraram baixa biodegradabilidade devido às suas ligações de hidrogênio entre as cadeias moleculares da poliamida. Essas descobertas abriram um novo capítulo na produção de poliamidas de base biológica, sugerindo a possibilidade de usá-las como poliamidas recicláveis e, como resultado, proporcionar benefícios ambientais por meio da reciclagem. Portanto, a produção de monômeros de poliamida, como diaminas, ácidos aminocarboxílicos e diácidos a partir de recursos renováveis, também deve impactar significativamente as indústrias de bioplásticos. No entanto, os processos de base biológica para a produção desses produtos químicos de plataforma ainda estão em fase de pesquisa e desenvolvimento (Son et al., 2023).

Para a substituição imediata de monômeros derivados de petróleo por monômeros derivados de biomassa, os esforços contínuos são para desenvolver um processo completo de biorrefinaria - uma fábrica de células microbianas superior e processos eficientes de fermentação e purificação em escala piloto. Com esta etapa totalmente desenvolvida, um processo bioquímico híbrido para a produção biológica de monômeros de poliamida pode ser considerado por meio da conversão química de monômeros de base biológica. Além disso, esse processo pode ser melhorado identificando e desenvolvendo enzimas que catalisam eficientemente a reação de formação de anéis, polimerização de abertura de anel e degradação de poliamida para estabelecer chassis microbianos para a produção de poliamida de base biológica e biodegradável totalmente sustentável (Son et al., 2023).

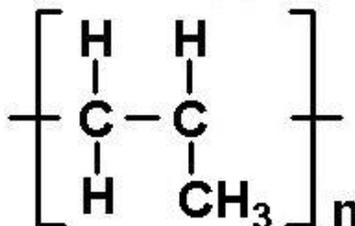
Em suma, os "nylons" de base biológica podem ser total ou parcialmente derivados de fontes renováveis, exibindo excelentes propriedades mecânicas, térmicas e de absorção de água. Eles oferecem um caminho para reduzir a pegada de carbono de uma empresa e, ao mesmo tempo, atender às expectativas dos consumidores por produtos e materiais mais sustentáveis.

5 POLIPROPILENO (PP)

O polipropileno (PP), como um polímero preparado cataliticamente a partir de propileno, foi descoberto em 1954 e ganhou forte popularidade muito rapidamente devido à sua menor densidade

entre os plásticos comerciais. A estrutura química geral do PP é mostrada na Figura 10. É um dos termoplásticos mais utilizados, oferecendo uma combinação vantajosa de tenacidade, tensão, rasgo, resistência à flexão e resistência química ao calor e à umidade (Gijsman e Fiorio, 2023).

Figura 10 - Estrutura química do polipropileno



Além disso, o PP pode ser processado usando as técnicas mais relevantes, como moldagem por injeção, extrusão de filme e fibra, termoformagem e moldagem por sopro. O PP tem sido amplamente utilizado como material polimérico fundamental, abrangendo automóveis, cosméticos, têxteis e embalagens de consumo devido à sua excelente processabilidade, resistência química e barreiras à umidade. Quase um quarto da demanda mundial de termoplásticos é de polipropileno (Gijsman e Fiorio, 2023).

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

O propileno pode ser gerado de várias maneiras a partir de fontes biológicas. A mais popular é a fermentação da cana-de-açúcar para produzir bioetanol, um dos principais intermediários para a síntese de bio-PP. Nesse processo, o bioetanol é primeiro convertido em etileno por desidratação, que é posteriormente transformado em buteno por dimerização. Finalmente, o monômero de propileno é obtido por metátese de etileno e buteno. Outra abordagem é por meio de um processo termoquímico, que emprega diferentes matérias-primas de biomassa ricas em carbono (por exemplo, milho, grama, resíduos agrícolas, etc.) que podem ser gaseificadas para gerar biogás sintético. No entanto, a abordagem de gaseificação tem um gasto de capital muito maior do que a rota de fermentação. Além disso, o hidrotreamento de óleo vegetal ou óleo de cozinha usado também pode ser usado para produzir propileno verde (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 custo 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 seus estágios iniciais. Devido às suas propriedades versáteis e diversas, prevê-se que o bio-PP se torne mais difundido em vários setores de uso final. Com base em sua aplicação, o setor de embalagens domina principalmente o mercado devido à forte demanda em vários setores, incluindo alimentos e bebidas, produtos de consumo e automóveis. Este material também pode ser usado no setor de construção para fabricar painéis, tubos, materiais isolantes ou retardadores de chama (Wang et al., 2023).

Kikuchi et al. (2017) realizaram uma avaliação do 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 emissões reduzidas de gases de efeito estufa quando se utilizam resinas bio-PE e bio-PP. No entanto, a taxa de redução do bio-PE é maior do que a do bio-PP porque as etapas da reação são aumentadas e consomem energia adicional na síntese de propileno. O PP de base biológica seria uma solução imediata, apresentando as mesmas propriedades técnicas e reciclabilidade encontradas no atual portfólio de PP hoje, com o benefício adicional de uma pegada de carbono negativa. Pode-se resumir que o bio-PP ainda está em fase piloto de produção, respondendo por uma pequena fração do mercado de bioplásticos. Seu desenvolvimento enfrenta desafios significativos, incluindo a concorrência de custos com o PP convencional. No entanto, espera-se que o bio-PP ganhe popularidade em todos os setores devido às suas propriedades versáteis e sustentabilidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

Embora os biopolímeros representem uma alternativa promissora aos plásticos tradicionais, eles enfrentam vários desafios significativos. Em primeiro lugar, sua produção em larga escala ainda é mais cara do que os plásticos convencionais. Além disso, alguns polímeros de base biológica podem ter propriedades inferiores às suas contrapartes sintéticas. 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 desses novos polímeros pela sociedade.



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

Portanto, polímeros de base biológica, como PLA, PHAs, PA e PP, oferecem uma alternativa promissora aos plásticos tradicionais derivados de combustíveis fósseis. Com o avanço contínuo 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.

LISTA DE ABREVIATURAS

Não aplicável

DECLARAÇÕES

DECLARAÇÃO DE NOVIDADE

Esta revisão oferece uma alternativa promissora aos plásticos tradicionais derivados de combustíveis fósseis. Com o avanço contínuo 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.

APROVAÇÃO ÉTICA E CONSENTIMENTO PARA PARTICIPAR

Não aplicável

CONSENTIMENTO PARA PUBLICAÇÃO

Todos os autores concordaram com esta publicação.

DISPONIBILIDADE DE DADOS E MATERIAIS

Os conjuntos de dados gerados para este estudo estão disponíveis mediante solicitação do autor correspondente.

INTERESSES CONFLITANTES

Não há interesses conflitantes

FINANCIAMENTO

CAPES, CNPq e FAPERGS



CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

LR, NSV: pesquisa de organização de artigos e manuscritos.

AM, HT: coordenadores de pesquisa

CONFIRMAÇÕES

Os autores agradecem às Agências de Fomento Brasileiras: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - 302484/2022-1), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), apoio do Centro de Pesquisa em Bioprocessos e Biotecnologia para Alimentos (Biofood), que é financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS-22/2551-0000397-4), Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) e Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo apoio financeiro.



REFERÊNCIAS

- Atiweh, G., Mikhael, A., Parrish, C. C., & Le, T. T. (2021). Environmental impact of bioplastic use: A review. **Heliyon, 7*(9)*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07918>.
- Behera, S., Priyadarshane, M., Vandana, & Das, S. (2022). Polyhydroxyalkanoates, the bioplastics of microbial origin: Properties, biochemical synthesis, and their applications. **Chemosphere, 294**, 133723. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133723>.
- Brehmer, B. (2013). Polyamides from biomass derived monomers. In **Bio-Based Plastics: Materials and Applications** (pp. 275–296). <https://doi.org/10.1002/9781118676646.ch10>.
- Choe, S., Kim, Y., Won, Y., & Myung, J. (2021). Bridging three gaps in biodegradable plastics: Misconceptions and truths about biodegradation. **Frontiers in Chemistry, 9**, 671750. <https://doi.org/10.3389/fchem.2021.671750>.
- Choiniere, P. (2015). Development of polyhydroxyalkanoate nanoparticles for cancer therapy. [Thesis, Syracuse University].
- Elsawy, M. A., Kim, K., Park, J., & Deep, A. (2017). Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites. **Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79**, 1346–1352. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.143>.
- European Bioplastics. (2023). **Market data report 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. (2022). **What are bioplastics?: Material types, terminology, and labels – an introduction**. Disponível em: https://docs.european-bioplastics.org/publications/fs/EuBP_FS_What_are_bioplastics.pdf. Acesso em: 23 abr. 2024.
- Gijsman, P., & Fiorio, R. (2023). Long term thermo-oxidative degradation and stabilization of polypropylene (PP) and the implications for its recyclability. **Polymer Degradation and Stability, 208**, 110260. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110260>.
- Khedr, M. S. F. (2023). Bio-based polyamide. **Physical Sciences Reviews, 8*(7)*, 827–847. <https://doi.org/10.1515/psr-2020-0076>.
- Kikuchi, Y., Oshita, Y., Mayumi, K., & Hirao, M. (2017). 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, 167**, 289–305. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.179>.
- Koller, M., & Mukherjee, A. (2022). A new wave of industrialization of PHA biopolyesters. **Bioengineering, 9**, 74. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9020074>.
- Kumar, R., Lalnundiki, V., Shelare, S. D., Abhishek, G. J., Sharma, S., Sharma, D., Kumar, A., & Abbas, A. (2024). An investigation of the environmental implications of bioplastics: Recent advancements on the development of environmentally friendly bioplastics solutions. **Environmental Research, 244**, 117707. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117707>.
- Nagarajan, V., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2016). Perspective on polylactic acid (PLA) based sustainable materials for durable applications: Focus on toughness and heat resistance. **ACS*

Sustainable Chemistry and Engineering, 4*(6), 2899–2916.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00321>.

Neufeld, L., Stassen, F., Sheppard, R., & Gilman, T. (2016). *The new plastics economy: Rethinking the future of plastics*. World Economic Forum.

Park, H., He, H., Yan, X., Liu, X., Scrutton, N. S., & Chen, G. (2024). PHA is not just a bioplastic! *Biotechnology Advances, 71*, 108320. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2024.108320>.

Peng, T., & Sun, W. (2017). Energy modelling for FDM 3D printing from a life cycle perspective. *International Journal of Manufacturing Research, 12*(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJMR.2017.10003722>.

Plastic Portal. (2024). *Weekly commodity price report*. Disponível em: <https://www.plasticportal.eu/en/cenove-reporty/>. Acesso em: 23 abr. 2024.

Riaz, S., Rhee, K. Y., & Park, S. J. (2021). Polyhydroxyalkanoates (PHAs): Biopolymers for biofuel and biorefineries. *Polymers, 13*, 253. <https://doi.org/10.3390/polym13020253>.

Saravanan, K., Umesh, M., & Kathirvel, P. (2022). Microbial polyhydroxyalkanoates (PHAs): A review on biosynthesis, properties, fermentation strategies and its prospective applications for a sustainable future. *Journal of Polymers and the Environment, 30*, 4903–4935. <https://doi.org/10.3390/polym13020253>.

Son, J., Sohn, Y. J., Baritugo, K., Jo, S. Y., Song, H. M., & Park, S. J. (2023). Recent advances in microbial production of diamines, aminocarboxylic acids, and diacids as potential platform chemicals and bio-based polyamides monomers. *Biotechnology Advances, 62*, 108070. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.108070>.

Šprajcar, M., Horvat, P., & Kržan, A. (2012). *Biopolymers and bioplastics: Plastics aligned with nature*. Ljubljana: National Institute of Chemistry.

Wang, S., Muiruri, J. K., Soo, X. Y. D., Liu, S., Thitsartarn, W., Tan, B. H., Suwardi, A., Li, Z., Zhu, Q., & Loh, X. J. (2023). Bio-polypropylene and polypropylene-based biocomposites: Solutions for a sustainable future. *Chemistry – An Asian Journal, 18*(2), e202200972. <https://doi.org/10.1002/asia.202200972>.

Wellenreuther, C., Wolf, A., & Zander, N. (2022). Cost competitiveness of sustainable bioplastic feedstocks – A Monte Carlo analysis for polylactic acid. *Cleaner Engineering and Technology, 6*, 100411. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100411>.

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

Zheng, L., Wang, M., Li, Y., Xiong, Y., & Wu, C. (2024). Recycling and degradation of polyamides. *Molecules, 29*(8), 1742. <https://doi.org/10.3390/molecules29081742>.