

UNIFACCAMP - CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO LIMPO PAULISTA

CAROLINE CRISTINA MAROTO

DEGRADAÇÃO BIOTECNOLOGIA DE POLÍMEROS

Campo Limpo Paulista

Novembro de 2024

Caroline Cristina Maroto

DEGRAÇÃO BIOTECNOLÓGIA DE POLÍMEROS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Química, do Centro Universitário de Campo Limpo Paulista, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Química.

Orientador(a): Prof.^a Dr. Sabrina de Almeida Marques

Campo Limpo Paulista

Novembro de 2024

Dedico este trabalho a todo corpo docente, pela dedicação, paciência e ensinamentos durante todo o curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, minha orientadora Prof.^a Dr. Sabrina de Almeida Marques pela instrução e apoio no desenvolvimento e conclusão deste trabalho,

A coordenadora Julia Rabello Buci pelo apoio durante a trajetória do projeto e mentoria.

E por fim, minha família e amigos por todo o suporte, amor e solidariedade durante o curso de bacharelado.

Resumo:

A degradação de polímeros é um tema crítico na biotecnologia, com implicações significativas para a sustentabilidade e o desenvolvimento de materiais avançados. Este trabalho aborda os principais aspectos da degradação de polímeros na biotecnologia, incluindo os mecanismos de degradação, aplicações práticas e estratégias de controle.

Palavras-chave: Degradação. Polímeros. Biotecnologia.

Abstract:

Polymer degradation is a critical topic in biotechnology with significant implications for sustainability and the development of advanced materials. This work addresses key aspects of polymer degradation in biotechnology, including degradation mechanisms, practical applications, and control strategies.

Keywords: Degradation. Polymers. Biotechnology.

Sumário

1. Introdução	7
Objetivos:	8
Justificativas:	9
2. Fundamentação teórica	9
2.1 Conceitos básicos de polímeros	12
2.1.1 Estrutura molecular dos polímeros	13
2.1.2 Propriedades dos polímeros	15
2.2 Degradação de polímeros	16
2.2.1 Mecanismos de degradação de polímeros	18
2.2.2 Fatores que influenciam a degradação de polímeros	20
2.3 Biotecnologia aplicada à degradação de polímeros	22
2.3.1 Definição e princípios da biotecnologia aplicada a polímeros	23
2.3.2 Vantagens e desafios da biotecnologia na degradação de polímeros	25
3. Métodos e técnicas utilizados na pesquisa	27
4. Resultados e discussão	29
4.1 Principais mecanismos biotecnológicos para a degradação de polímeros	30
4.1.1 Enzimas utilizadas na degradação de polímeros	32
4.1.2 Microorganismos envolvidos na biodegradação de polímeros	33
5. Impacto ambiental e econômico da degradação biotecnológica de polímeros	37
5.1 Benefícios ambientais da utilização da biotecnologia na degradação de polímeros	39
5.2 Viabilidade econômica da implementação da biotecnologia na indústria de polímeros	40
Considerações finais	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1. Introdução

A biotecnologia tem desempenhado um papel fundamental na degradação de polímeros, uma vez que oferece soluções mais sustentáveis e ambientalmente amigáveis para o tratamento desses materiais. Ao longo dos anos, essa área de estudo tem se desenvolvido significativamente, impulsionada pela necessidade de reduzir os impactos negativos causados pelo acúmulo de resíduos poliméricos no meio ambiente. Através da aplicação de técnicas biotecnológicas, é possível promover a quebra dos polímeros em compostos mais simples e menos prejudiciais ao ecossistema (EDAES, SOUZA, 2021).

Na indústria, os principais tipos de polímeros utilizados incluem plásticos, borrachas e fibras sintéticas. No entanto, a degradação desses materiais pode causar impactos ambientais significativos, como a contaminação do solo e da água, além da liberação de gases tóxicos durante o processo de decomposição. Portanto, é essencial buscar alternativas para minimizar esses efeitos negativos e garantir a sustentabilidade do setor industrial (LIMA, 2018).

Diferentes técnicas biotecnológicas têm sido empregadas para a degradação de polímeros. Entre elas, destaca-se a utilização de enzimas específicas capazes de quebrar as ligações químicas presentes nos polímeros. Além disso, microrganismos como bactérias e fungos também podem ser utilizados para promover a decomposição dos materiais poliméricos. Essas abordagens têm se mostrado eficientes na redução do tempo de degradação e na minimização dos impactos ambientais (MEDEIROS, LIMA, 2020).

No entanto, a biotecnologia de polímeros enfrenta alguns desafios. Um deles é a seleção adequada dos microrganismos utilizados no processo de degradação, uma vez que nem todos são capazes de decompor eficientemente os diferentes tipos de polímeros. Além disso, é necessário otimizar as condições de degradação, como temperatura, pH e concentração dos materiais, a fim de obter resultados satisfatórios. Esses desafios exigem estudos mais aprofundados

e o desenvolvimento de estratégias específicas para cada tipo de polímero (MELO, 2018).

As aplicações práticas da biotecnologia na degradação de polímeros são diversas. Uma delas é a reciclagem desses materiais, que permite a reutilização dos polímeros em novos produtos, reduzindo assim a demanda por matéria-prima virgem. Além disso, a biotecnologia também tem sido utilizada na produção de bioplásticos mais sustentáveis, que são compostáveis e menos prejudiciais ao meio ambiente. Essas aplicações contribuem para a redução do acúmulo de resíduos poliméricos e para a promoção da economia circular (MOURONER, 2017).

Ao comparar a utilização da biotecnologia com outras técnicas, como incineração ou descarte em aterros sanitários, é possível identificar vantagens e desvantagens. A biotecnologia oferece uma abordagem mais sustentável e menos agressiva ao meio ambiente, uma vez que promove a decomposição dos polímeros em compostos naturais. No entanto, essa técnica pode demandar mais tempo e recursos para ser implementada em larga escala, o que pode ser considerado uma desvantagem em relação a outras opções mais rápidas e de menor custo (QUEIROZ, RODRIGUEZ, 2019).

Objetivos:

- **Compreender os Mecanismos de Degradação:** Investigar e elucidar os mecanismos de degradação de polímeros na biotecnologia, buscando um conhecimento mais profundo das reações envolvidas.
- **Identificar Aplicações Práticas:** Identificar e analisar as aplicações práticas da degradação de polímeros na biotecnologia, incluindo sua relevância nas indústrias de embalagens, biomateriais, medicina e outros campos.
- **Avaliar Estratégias de Controle:** Avaliar e comparar as estratégias de controle da degradação de polímeros, como modificação química, engenharia de enzimas e técnicas de biodegradação, em busca de melhores práticas sustentáveis.

- Explorar Implicações Sustentáveis: Investigar o impacto da degradação de polímeros na sustentabilidade ambiental e nas soluções para redução de resíduos plásticos, avaliando os aspectos econômicos e ambientais.

Justificativas:

Relevância na Sustentabilidade: A degradação de polímeros desempenha um papel crucial na busca por alternativas sustentáveis aos plásticos convencionais, reduzindo o acúmulo de resíduos plásticos e mitigando os impactos ambientais.

Avanços Tecnológicos: A biotecnologia oferece novas abordagens para a degradação de polímeros, como a engenharia de enzimas e microrganismos, que podem revolucionar a indústria de materiais avançados.

Aplicações Biomédicas: A degradação controlada de polímeros é fundamental para aplicações biomédicas, como implantes e sistemas de liberação de medicamentos, tornando-a relevante para a saúde humana.

Interdisciplinaridade: O estudo da degradação de polímeros na biotecnologia envolve uma abordagem interdisciplinar, reunindo conhecimentos de química, biologia, engenharia e ciências ambientais, o que contribui para a ampliação do campo científico.

Atendimento a Objetivos Globais: A pesquisa nessa área está alinhada com metas globais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, que buscam soluções para desafios ambientais e de saúde. Portanto, seu estudo é de relevância global.

2. Fundamentação teórica

A biotecnologia tem desempenhado um papel fundamental na degradação de polímeros, contribuindo significativamente para a redução do impacto ambiental causado pelo descarte inadequado desses materiais. Através do uso

de técnicas biotecnológicas, é possível promover a decomposição dos polímeros de forma mais eficiente e sustentável, evitando a acumulação desses resíduos no meio ambiente. Além disso, a biotecnologia também permite a recuperação de materiais valiosos presentes nos polímeros, possibilitando sua reutilização e diminuindo a necessidade de produção de novos materiais (MUSSI-DIAS, 2017).

Na indústria, são utilizados diversos tipos de polímeros, como polietileno, polipropileno e poliestireno. A estrutura química e as propriedades físicas desses polímeros influenciam diretamente na sua degradação biotecnológica. Por exemplo, polímeros com ligações químicas mais estáveis podem requerer enzimas mais específicas para sua quebra, enquanto polímeros com maior cristalinidade podem apresentar uma menor taxa de decomposição. Portanto, é necessário considerar essas características ao desenvolver processos biotecnológicos para a degradação dos diferentes tipos de polímeros (SILVA, 2021).

As enzimas desempenham um papel crucial na degradação biotecnológica de polímeros. Essas proteínas são capazes de quebrar as ligações químicas presentes nos materiais poliméricos, facilitando assim sua decomposição. Existem diferentes classes de enzimas que podem ser utilizadas nesse processo, como as hidrolases, oxidases e esterases. Cada classe de enzima possui uma especificidade para determinados tipos de ligações químicas, o que possibilita a degradação seletiva dos polímeros (BELMONTE, 2020).

Diversos processos biotecnológicos têm sido desenvolvidos para a degradação de polímeros. A hidrólise enzimática é um desses processos, no qual as enzimas atuam na quebra das ligações químicas dos polímeros através da adição de água. Já a fermentação microbiana envolve o uso de microrganismos capazes de produzir enzimas que promovem a decomposição dos polímeros. Ambos os processos apresentam vantagens, como a alta especificidade das enzimas e a possibilidade de aproveitamento dos produtos gerados durante a decomposição. No entanto, também apresentam limitações, como a necessidade de condições específicas para o funcionamento das enzimas e microrganismos (MDEFPE BASEADAS, 2021).

A aplicação da biotecnologia na degradação de polímeros enfrenta diversos desafios. Um desses desafios é a seleção adequada das enzimas ou microrganismos mais eficientes para cada tipo de polímero. Além disso, é necessário otimizar os processos biotecnológicos visando sua viabilidade em escala industrial. Isso envolve o desenvolvimento de métodos mais eficientes e econômicos para produção e purificação das enzimas, bem como o estabelecimento de condições ideais para o funcionamento dos microrganismos (COSTA, SANTOS, ANDRE, CORRÊA, 2019).

As possíveis aplicações futuras da biotecnologia na área de degradação de polímeros são promissoras. Pesquisas estão sendo realizadas para o desenvolvimento de novas enzimas ou microrganismos modificados geneticamente, visando uma maior eficiência na decomposição dos materiais poliméricos. Além disso, a utilização de técnicas como a engenharia metabólica pode permitir a produção de enzimas com características específicas para a degradação de diferentes tipos de polímeros (REZENDE, ROSADO, MOREIRA, 2016).

A utilização da biotecnologia na degradação de polímeros apresenta perspectivas econômicas e ambientais positivas. Do ponto de vista econômico, essa abordagem pode reduzir os custos associados ao descarte e produção de novos materiais, além de possibilitar a recuperação de materiais valiosos presentes nos polímeros. Já do ponto de vista ambiental, a biotecnologia contribui para a sustentabilidade do planeta ao evitar a acumulação desses resíduos no meio ambiente e reduzir a necessidade de extração de recursos naturais. Portanto, é evidente que a aplicação da biotecnologia na degradação de polímeros traz benefícios tanto para a indústria quanto para o meio ambiente (SARMENTO, 2020).

2.1 Conceitos básicos de polímeros

A estrutura molecular dos polímeros desempenha um papel fundamental na determinação de suas propriedades físicas e químicas. Os polímeros são

compostos por cadeias longas de moléculas repetitivas, chamadas monômeros, que estão ligadas por ligações covalentes. A natureza e a sequência desses monômeros ao longo da cadeia polimérica influenciam diretamente as propriedades do material resultante. Por exemplo, a presença de grupos funcionais nas cadeias poliméricas pode conferir características específicas, como resistência à tração ou flexibilidade. Além disso, o grau de ramificação das cadeias poliméricas também pode afetar suas propriedades, uma vez que ramificações podem dificultar o movimento das cadeias e aumentar a rigidez do material (FURCKEL, SOUZA, 2021).

Existem diferentes tipos de polímeros com características distintas. Os termoplásticos são polímeros que podem ser fundidos e moldados repetidamente quando aquecidos, mantendo suas propriedades originais após o resfriamento. Já os termorrígidos são polímeros que se tornam rígidos e não podem ser reprocessados após a cura, tornando-se permanentemente fixados em sua forma final. (PIMENTA, JUNIOR, COSTA MARQUES, 2021).

A síntese de polímeros é realizada por meio de diferentes métodos, sendo os mais comuns a polimerização em cadeia e a polimerização por condensação. Na polimerização em cadeia, os monômeros são ativados por meio de uma reação química iniciadora, que forma radicais livres capazes de iniciar a reação de polimerização. Esses radicais livres reagem com os monômeros, formando ligações covalentes entre eles e gerando as cadeias poliméricas. Já na polimerização por condensação, a reação ocorre entre dois ou mais monômeros diferentes, resultando na formação de um polímero e na liberação de um subproduto, como água ou álcool (CARDOSO, 2019).

A degradação dos polímeros pode ocorrer devido a diversos fatores, como exposição a altas temperaturas, radiação UV e agentes químicos. A exposição a altas temperaturas pode levar à quebra das ligações covalentes nas cadeias poliméricas, resultando na perda de suas propriedades físicas e químicas. A radiação UV também pode causar danos às cadeias poliméricas, promovendo a quebra das ligações químicas e levando à perda de resistência mecânica. Além

disso, agentes químicos como solventes agressivos podem interagir com as cadeias poliméricas, causando sua desintegração (VITOR, 2021).

Na biotecnologia de polímeros, são utilizadas técnicas específicas para promover a degradação desses materiais. A biodegradação enzimática é uma dessas técnicas, em que enzimas específicas são adicionadas ao material polimérico para catalisar a quebra das cadeias poliméricas em fragmentos menores, que podem ser metabolizados por microorganismos presentes no ambiente. A compostagem é outra técnica utilizada na degradação de polímeros, em que o material polimérico é misturado com resíduos orgânicos e submetido a condições controladas de temperatura e umidade para promover a decomposição (CAMPDELLI, 2019).

A utilização da biotecnologia na degradação de polímeros apresenta diversas vantagens em relação aos métodos convencionais. Um dos principais benefícios é a redução do impacto ambiental, uma vez que a biodegradação enzimática e a compostagem permitem a transformação dos polímeros em produtos finais mais sustentáveis, como água, dióxido de carbono e biomassa. Além disso, a biotecnologia oferece a possibilidade de desenvolver enzimas capazes de degradar uma maior variedade de polímeros, ampliando as opções para o tratamento desses materiais (LIMA, MOREIRA, ARAUJO, 2022).

2.1.1 Estrutura molecular dos polímeros

A estrutura molecular dos polímeros desempenha um papel fundamental na determinação de suas propriedades e comportamento. Os polímeros são macromoléculas formadas por unidades repetitivas chamadas monômeros, que estão ligados entre si por meio de ligações químicas. A maneira como essas ligações são estabelecidas e a organização espacial das cadeias poliméricas influenciam diretamente as características do material resultante (SANTOS, 2017).

As ligações químicas presentes na estrutura molecular dos polímeros podem ser de dois tipos principais: ligações covalentes e interações de Van der

Waals. As ligações covalentes são fortes e envolvem o compartilhamento de elétrons entre os átomos dos monômeros, formando uma cadeia contínua. Essas ligações conferem aos polímeros uma alta resistência mecânica e estabilidade térmica. Já as interações de Van der Waals são mais fracas e ocorrem entre moléculas vizinhas, sendo responsáveis pela coesão das cadeias poliméricas. Essas interações contribuem para a flexibilidade e maleabilidade dos materiais poliméricos (RODRIGUES, POROSAS, 2021).

Existem diferentes tipos de polímeros, que se distinguem pela sua estrutura molecular. Os polímeros lineares são compostos por cadeias retas ou levemente ramificadas, o que confere a eles uma alta capacidade de deformação plástica. Já os polímeros ramificados possuem cadeias laterais conectadas à cadeia principal, o que aumenta sua viscosidade e dificulta seu processamento. (YAMADA, 2021).

A estrutura molecular dos polímeros também desempenha um papel crucial na sua degradação. A degradação dos polímeros pode ser acelerada por fatores como temperatura elevada, radiação ultravioleta, umidade e ação de microorganismos. Por outro lado, a presença de grupos funcionais nas cadeias poliméricas ou a incorporação de aditivos podem retardar esse processo. A compreensão desses fatores é essencial para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e duráveis (SANTOS, 2017).

A degradação biotecnológica dos polímeros envolve a atuação de enzimas e microorganismos na quebra das cadeias poliméricas. As enzimas são proteínas com atividade catalítica que reconhecem sítios específicos nas moléculas poliméricas e promovem sua clivagem. Os microorganismos, por sua vez, podem secretar enzimas extracelulares capazes de hidrolisar os polímeros em seus componentes básicos. Esses mecanismos biológicos oferecem uma alternativa promissora para o tratamento de resíduos plásticos, pois permitem a recuperação dos monômeros para posterior reutilização (SARMENTO, 2020).

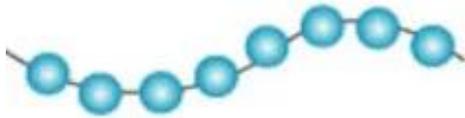
A degradação biotecnológica dos polímeros apresenta diversas vantagens em relação aos métodos tradicionais de reciclagem. Enquanto a reciclagem convencional muitas vezes requer processos químicos ou térmicos intensivos, a degradação biotecnológica pode ocorrer em condições mais suaves e com menor

consumo de energia. Além disso, essa abordagem contribui para a redução do impacto ambiental, uma vez que permite a transformação dos resíduos plásticos em compostos biodegradáveis (PIMENTA, JUNIOR, COSTA MARQUES, 2021).

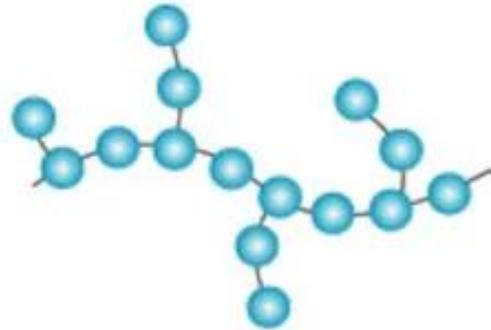
A biotecnologia tem sido amplamente aplicada no desenvolvimento de soluções para o tratamento de resíduos plásticos. Diversas empresas e instituições de pesquisa têm explorado o potencial de enzimas e microorganismos na degradação de polímeros, visando tanto a recuperação dos monômeros como a produção de compostos de valor agregado. Por exemplo, já foram desenvolvidas tecnologias que permitem a conversão de polímeros em produtos químicos ou biocombustíveis por meio da atuação de microrganismos geneticamente modificados (SILVA, 2021). Segue figura 1.

Figura 1.

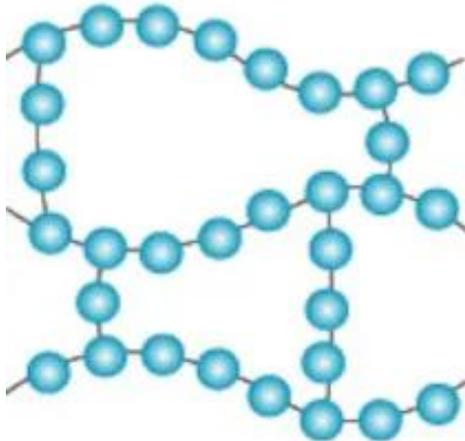
Estrutura dos polímeros



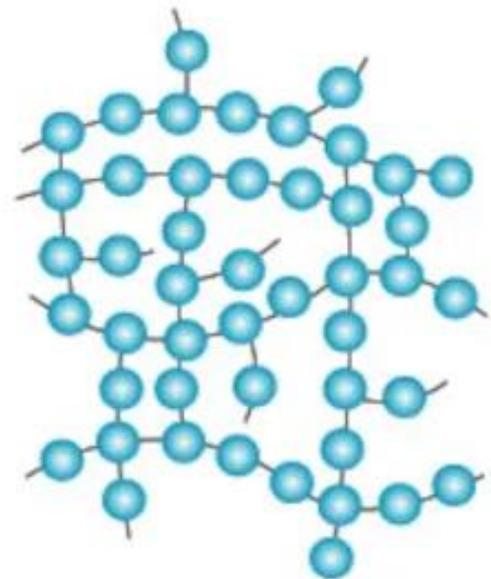
Linear



Ramificado



Ligações cruzadas



Reticulado

Fonte (Brasil Escola 2024).

2.1.2 Propriedades dos polímeros

As propriedades mecânicas dos polímeros são de extrema importância para sua aplicação em diversas áreas. A resistência à tração é uma das principais propriedades mecânicas dos polímeros e está relacionada à capacidade do

material de suportar cargas sem se romper. A flexibilidade, por sua vez, diz respeito à capacidade do polímero de se deformar sob ação de uma força externa e retornar à sua forma original quando a força é removida. Já a tenacidade é uma medida da energia necessária para romper o material e está relacionada tanto com a resistência à tração quanto com a flexibilidade (SOUSA, 2018).

As propriedades térmicas dos polímeros também desempenham um papel fundamental em sua utilização. O ponto de fusão é a temperatura na qual o polímero passa do estado sólido para o líquido, enquanto o ponto de amolecimento indica a temperatura na qual o material começa a perder sua rigidez e se torna mais maleável. A estabilidade térmica é outra propriedade importante, pois determina a resistência do polímero às altas temperaturas sem sofrer alterações significativas em suas propriedades físicas ou químicas (SILVA, 2019).

No que diz respeito às propriedades ópticas dos polímeros, destacam-se a transparência, que indica a capacidade do material de permitir a passagem da luz sem sofrer dispersão significativa, e a opacidade, que representa o oposto da transparência. Além disso, os polímeros podem apresentar diferentes índices de refração, ou seja, capacidades distintas de desviar a luz quando ela passa por eles (MOURONER, 2017).

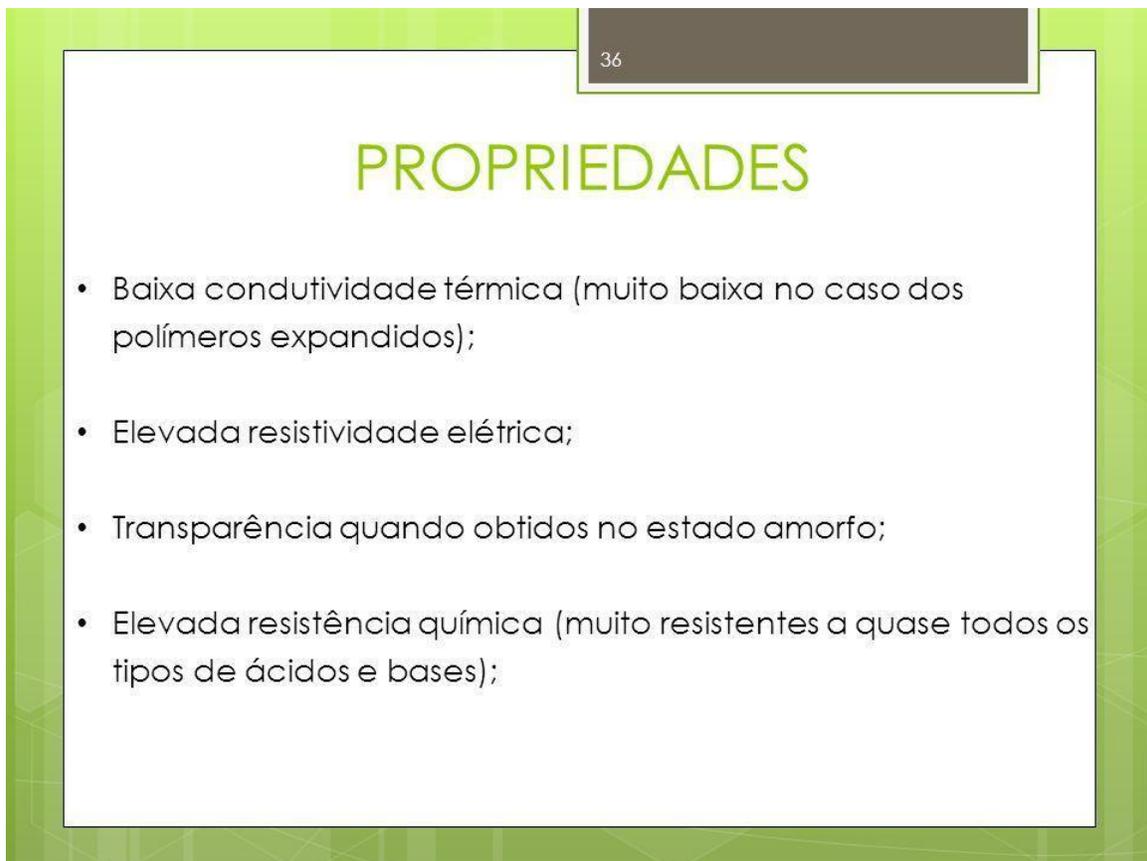
As propriedades elétricas dos polímeros também são relevantes em diversas aplicações. A condutividade elétrica é uma medida da capacidade do material de conduzir eletricidade, enquanto a resistividade é o inverso da condutividade e indica a dificuldade de um material em conduzir eletricidade. Essas propriedades podem ser controladas por meio da adição de aditivos condutores ou pela modificação química da estrutura do polímero (LEÃO, VITALE, 2021).

No que se refere às propriedades químicas, os polímeros podem apresentar diferentes graus de resistência a ácidos, bases e solventes. Essa resistência está relacionada à estabilidade química do material e pode variar amplamente dependendo da composição e estrutura do polímero. Alguns polímeros são altamente resistentes a agentes químicos, enquanto outros podem

sofrer deterioração ou dissolução quando expostos a determinados produtos químicos (KAO, 2023).

As propriedades de processamento dos polímeros são essenciais para sua fabricação e moldagem. A facilidade de moldagem está relacionada à capacidade do material de ser moldado em diferentes formas e geometrias sem perder suas propriedades mecânicas ou térmicas. Já a extrusão é um processo utilizado para obter produtos contínuos, como filmes ou tubos, através da passagem do polímero por um orifício sob pressão (FURCKEL, SOUZA, 2021). Segue figura 2.

Figura 2.



36

PROPRIEDADES

- Baixa condutividade térmica (muito baixa no caso dos polímeros expandidos);
- Elevada resistividade elétrica;
- Transparência quando obtidos no estado amorfo;
- Elevada resistência química (muito resistentes a quase todos os tipos de ácidos e bases);

Fonte (SlidePlayer 2024).

2.2 Degradação de polímeros

A degradação de polímeros é influenciada por diversos fatores, sendo os principais a temperatura, umidade, radiação UV e agentes químicos. A

temperatura é um fator crítico, pois o aumento da temperatura acelera as reações químicas que levam à degradação dos polímeros. Além disso, a umidade também desempenha um papel importante na degradação, pois pode causar a hidrólise das ligações químicas presentes no material. A radiação UV é outra fonte significativa de degradação dos polímeros, uma vez que a energia dos raios UV pode romper as ligações químicas e causar alterações na estrutura molecular do material. (SILVA, 2016).

Existem diferentes mecanismos pelos quais os polímeros podem se degradar. Um desses mecanismos é a quebra das ligações químicas presentes na cadeia polimérica. Essa quebra pode ocorrer por meio da aplicação de calor ou pela exposição a agentes oxidantes. Outro mecanismo comum é a oxidação dos polímeros, que ocorre quando moléculas de oxigênio reagem com as cadeias poliméricas e causam alterações em sua estrutura. Além disso, a hidrólise também é um mecanismo importante de degradação dos polímeros, envolvendo a reação entre as ligações químicas do material e moléculas de água (MDEFPE BASEADAS, 2021).

A degradação dos polímeros pode ter várias consequências, incluindo a perda de propriedades mecânicas do material. A medida que ocorre a degradação, as cadeias poliméricas se rompem e o material perde sua resistência e rigidez. Além disso, a degradação também pode causar alterações na aparência do material, como descoloração e formação de rachaduras. Essas alterações estéticas podem comprometer a qualidade e a aceitação do produto final. Além disso, a degradação reduz a vida útil do material, tornando-o menos durável e mais suscetível a falhas prematuras (MEDEIROS, LIMA, 2020).

Para avaliar a degradação dos polímeros, são utilizadas diversas técnicas analíticas. A análise térmica é uma das principais técnicas empregadas nesse contexto, permitindo determinar as temperaturas em que ocorrem as transições físicas e químicas no material. A espectroscopia também é amplamente utilizada para identificar mudanças na estrutura molecular dos polímeros durante o processo de degradação. Além disso, ensaios mecânicos são realizados para

avaliar as propriedades mecânicas dos materiais antes e após a degradação (QUEIROZ, RODRIGUEZ, 2019).

Existem métodos eficazes para prevenir ou retardar a degradação dos polímeros. Um desses métodos é o uso de aditivos estabilizantes, que são adicionados aos polímeros para protegê-los contra os fatores que causam a degradação. Esses aditivos podem atuar como antioxidantes, absorvedores de UV ou agentes quelantes, impedindo a reação dos polímeros com os agentes de degradação. Além disso, a modificação química dos polímeros também pode ser uma estratégia eficaz para melhorar sua resistência à degradação. (BELMONTE, 2020).

A biotecnologia desempenha um papel importante na degradação dos polímeros, oferecendo métodos alternativos e sustentáveis para acelerar o processo de decomposição. O uso de enzimas e microrganismos tem se mostrado promissor nesse contexto. As enzimas podem catalisar a quebra das ligações químicas presentes nos polímeros, acelerando sua decomposição. Já os microrganismos podem utilizar os polímeros como fonte de energia e carbono, transformando-os em subprodutos mais simples e menos prejudiciais ao meio ambiente (CORREIA, 2021).

A biotecnologia também possui aplicações na reciclagem de polímeros, permitindo transformar resíduos plásticos em novos materiais através do uso de microorganismos. Esses microorganismos podem ser utilizados para quebrar as cadeias poliméricas presentes nos resíduos plásticos e convertê-los em monômeros ou oligômeros que podem ser utilizados na produção de novos materiais. Essa abordagem contribui para a redução do impacto ambiental causado pelos resíduos plásticos e promove a economia circular, onde os materiais são reutilizados e reciclados ao invés de descartados (MESQUITA, 2023). Segue Figura 3.

Figura 3.



Fonte (Afinko Polímeros 2024).

2.2.1 Mecanismos de degradação de polímeros

Os polímeros são materiais amplamente utilizados em diversas áreas, como na indústria, medicina e agricultura. No entanto, esses materiais estão sujeitos a processos de degradação que podem comprometer suas propriedades físicas e químicas. Os principais mecanismos de degradação dos polímeros

incluem a hidrólise, oxidação, fotodegradação e biodegradação (MARINS, CASALI, PEREIRA, 2021).

A hidrólise é um dos principais mecanismos de degradação dos polímeros. Nesse processo, ocorre a quebra das ligações químicas presentes nas cadeias poliméricas pela ação da água. A presença de grupos funcionais suscetíveis à hidrólise, como ésteres e amidas, torna os polímeros mais propensos a esse tipo de degradação. A hidrólise pode ser acelerada por fatores como temperatura elevada e pH ácido (SANTOS SOUSA, LIMA, 2019).

A oxidação é outro processo de degradação comum em polímeros. Nesse caso, os polímeros reagem com o oxigênio do ar, resultando na perda de propriedades físicas e químicas. A oxidação pode ocorrer tanto na presença quanto na ausência de luz e é influenciada por fatores como temperatura, umidade e presença de catalisadores. A formação de radicais livres durante o processo oxidativo contribui para a quebra das cadeias moleculares dos polímeros (ROCHA, 2021).

A fotodegradação é um mecanismo específico em que os polímeros são danificados pela exposição à luz ultravioleta. A absorção de radiação UV pelos polímeros leva à formação de radicais livres, que são altamente reativos e podem causar a quebra das cadeias moleculares. Além disso, a fotodegradação também pode resultar na formação de grupos funcionais oxidados, comprometendo ainda mais as propriedades dos polímeros (SANCHES, 2020).

A biodegradação é um processo em que os polímeros são decompostos por microorganismos presentes no ambiente. Esses microorganismos utilizam os polímeros como fonte de carbono e energia, resultando na sua completa mineralização. A biodegradação pode ser influenciada por fatores como temperatura, umidade, pH e presença de catalisadores. O estudo desse mecanismo é de grande importância para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e ambientalmente amigáveis (ARAÚJO, FREITAS, SARMENTO, 2021).

Além dos mecanismos mencionados, outras variáveis também podem influenciar nos processos de degradação dos polímeros. A temperatura é um fator

crucial, pois altas temperaturas aceleram as reações químicas envolvidas na degradação. A umidade também desempenha um papel importante, uma vez que a presença de água pode facilitar a hidrólise dos polímeros. O pH do meio em que os polímeros estão inseridos também pode afetar sua taxa de degradação. (REZENDE, ROSADO, MOREIRA, 2016).

O estudo dos mecanismos de degradação dos polímeros é de extrema importância na área da biotecnologia. Compreender como os polímeros se degradam permite o desenvolvimento de materiais mais resistentes e duráveis, capazes de suportar as condições adversas a que são submetidos. Além disso, o conhecimento desses mecanismos também possibilita a criação de estratégias para retardar ou controlar a degradação dos polímeros, aumentando sua vida útil e reduzindo o impacto ambiental causado por seu descarte (CAETANO, BEDOR, LEITE, SOUZA JR, 2021).

2.2.2 Fatores que influenciam a degradação de polímeros

Os fatores ambientais desempenham um papel crucial na degradação dos polímeros. A temperatura é um dos principais fatores, pois a maioria dos processos de degradação é acelerada com o aumento da temperatura. Isso ocorre porque a energia térmica fornece a energia necessária para quebrar as ligações químicas presentes no polímero. Além disso, a umidade também pode influenciar a degradação, uma vez que a presença de água pode facilitar reações químicas que levam à quebra das cadeias poliméricas. A exposição à luz solar, especialmente à radiação ultravioleta, também pode acelerar a degradação dos polímeros, uma vez que essa radiação possui energia suficiente para romper as ligações químicas presentes nas cadeias poliméricas (EDAES, SOUZA, 2021).

A composição química do polímero é outro fator importante na sua degradação. Diferentes grupos funcionais presentes na estrutura do polímero podem acelerar ou retardar o processo de degradação. Por exemplo, grupos funcionais como hidroxilas e carboxilas podem aumentar a suscetibilidade do polímero à degradação, uma vez que esses grupos são mais reativos e propensos

a reações químicas. Por outro lado, grupos funcionais como metilas e fluoroalquilas podem conferir maior resistência à degradação, uma vez que esses grupos são menos reativos (CAMPDELLI, 2019).

O processamento dos polímeros também pode influenciar sua degradação. A temperatura de fusão durante o processamento pode levar à degradação térmica do polímero, uma vez que a energia térmica fornecida durante esse processo pode ser suficiente para romper as ligações químicas presentes nas cadeias poliméricas. Além disso, o tempo de exposição ao calor também é um fator importante, pois quanto maior o tempo de exposição, maior será a probabilidade de ocorrerem reações químicas que levam à degradação. A presença de aditivos também pode influenciar a degradação dos polímeros, uma vez que alguns aditivos podem acelerar ou retardar o processo (ALVES, CARRIELLO, PEGORARO et al., 2022).

A presença de microorganismos também pode desempenhar um papel significativo na degradação dos polímeros. Alguns microorganismos possuem enzimas capazes de quebrar as cadeias poliméricas e utilizar os polímeros como fonte de energia. Esses microorganismos são conhecidos como biodegradadores e podem ser encontrados em ambientes naturais, como solos e águas residuais. A presença desses microorganismos pode acelerar significativamente a taxa de degradação dos polímeros (BIZERRA, SILVA, 2016).

O pH do ambiente também pode influenciar a degradação dos polímeros. Ambientes ácidos ou alcalinos podem acelerar ou retardar o processo devido às reações químicas que ocorrem nessas condições. Por exemplo, ambientes ácidos podem promover a hidrólise das cadeias poliméricas, enquanto ambientes alcalinos podem levar à formação de radicais livres que aceleram a oxidação do polímero (MAUGERI FILHO, F.; GOLDBECK, R., 2019).

A estrutura molecular do polímero também desempenha um papel importante na sua degradação. O grau de cristalinidade do polímero pode influenciar a taxa de degradação, uma vez que regiões mais cristalinas são mais resistentes à degradação do que regiões amorfas. Além disso, a presença de

ligações cruzadas no polímero pode conferir maior estabilidade e resistência à degradação (CAPO BRANCO-MG, 2022).

2.3 Biotecnologia aplicada à degradação de polímeros

A degradação biotecnológica de polímeros é uma área de pesquisa em constante evolução, que busca desenvolver técnicas eficientes para a decomposição de materiais poliméricos. Dentre as principais técnicas utilizadas nesse processo, destacam-se a hidrólise enzimática e a oxidação microbiana. A hidrólise enzimática consiste na quebra das ligações químicas dos polímeros por meio da ação de enzimas específicas, resultando na formação de produtos menores e mais facilmente degradáveis. Já a oxidação microbiana envolve o uso de microrganismos capazes de oxidar os polímeros, promovendo sua decomposição (MARQUES, NASCIMENTO, 2023).

Os microrganismos desempenham um papel fundamental na degradação biotecnológica de polímeros. Dentre os principais grupos utilizados estão as bactérias, fungos e leveduras. Cada um desses microrganismos possui características específicas que os tornam adequados para essa função. Por exemplo, algumas bactérias são capazes de produzir enzimas com alta atividade hidrolítica, permitindo a rápida quebra dos polímeros. Já os fungos possuem uma capacidade única de secretar enzimas extracelulares, facilitando a interação com os polímeros e acelerando sua decomposição. As leveduras, por sua vez, são capazes de utilizar os produtos da decomposição dos polímeros como fonte de energia (SILVA, 2021).

Diversos fatores podem influenciar a eficiência da degradação biotecnológica de polímeros. A temperatura é um dos principais fatores, uma vez que a atividade enzimática e o crescimento dos microrganismos são altamente dependentes dessa variável. O pH também desempenha um papel importante, pois influencia a atividade das enzimas envolvidas no processo de degradação. Além disso, a concentração do polímero e a presença de co-solventes podem

afetar tanto a velocidade quanto o rendimento da degradação (AMORIM NETO, 2020).

A utilização da degradação biotecnológica de polímeros apresenta diversas vantagens em relação aos métodos tradicionais. Uma das principais vantagens é a redução do impacto ambiental, uma vez que essa técnica utiliza microrganismos e enzimas naturais para promover a decomposição dos polímeros. Além disso, a biotecnologia permite obter produtos finais mais valorizados, como compostos químicos ou materiais biodegradáveis, que podem ser utilizados em diferentes aplicações industriais (NASCIMENTO, CAMILLO, 2017).

No entanto, a aplicação da biotecnologia na degradação de polímeros também enfrenta desafios significativos. Um desses desafios é a seleção dos microrganismos mais eficientes para cada tipo de polímero, levando em consideração suas características estruturais e propriedades físico-químicas. Além disso, é necessário otimizar as condições de reação, como temperatura, pH e concentração do polímero, visando maximizar a eficiência da degradação (CARDOSO, 2019).

A biotecnologia aplicada à degradação de polímeros possui diversas aplicações práticas. Uma delas é o tratamento de resíduos plásticos em indústrias, contribuindo para a redução do acúmulo desses materiais no meio ambiente. Além disso, a biotecnologia também tem sido utilizada no desenvolvimento de materiais biodegradáveis, que apresentam menor impacto ambiental e podem substituir os polímeros convencionais em diversas aplicações BENTO, 2021.

2.3.1 Definição e princípios da biotecnologia aplicada a polímeros

A biotecnologia aplicada a polímeros desempenha um papel fundamental na busca por soluções sustentáveis para a degradação desses materiais. A crescente preocupação com o impacto ambiental causado pelos polímeros convencionais tem impulsionado o desenvolvimento de métodos alternativos de degradação, e a biotecnologia surge como uma abordagem promissora nesse contexto. Ao utilizar enzimas e microrganismos, é possível promover a

degradação dos polímeros de forma mais eficiente e controlada, contribuindo para a redução do acúmulo desses materiais no meio ambiente (CAMARGO, 2018).

Os princípios da biotecnologia aplicada a polímeros envolvem a utilização de enzimas e microrganismos como agentes catalíticos para a degradação dos polímeros. As enzimas são proteínas que possuem alta especificidade em relação aos substratos que podem catalisar, enquanto os microrganismos são organismos vivos capazes de produzir enzimas ou metabolizar diretamente os polímeros. Essa abordagem permite uma maior seletividade na degradação dos polímeros, além de possibilitar o controle das condições reacionais para otimizar o processo (MUSSI-DIAS, 2017).

Uma das principais vantagens da biotecnologia em relação aos métodos convencionais de degradação de polímeros é a redução do impacto ambiental. Enquanto os métodos tradicionais muitas vezes envolvem processos químicos agressivos e geração de resíduos tóxicos, a biotecnologia utiliza agentes biológicos que são mais sustentáveis e menos prejudiciais ao meio ambiente. Além disso, a degradação biotecnológica dos polímeros pode resultar em produtos finais menos tóxicos, contribuindo para a segurança e saúde humana (COSTA, SANTOS, ANDRE, CORRÊA, 2019).

A biotecnologia aplicada a polímeros tem potencial para degradar diferentes tipos de polímeros, incluindo poliésteres, poliamidas e poliuretanos. Essa diversidade de materiais que podem ser alvo da degradação biotecnológica amplia as possibilidades de aplicação dessa abordagem em diversos setores industriais. A capacidade de degradar diferentes tipos de polímeros é um aspecto importante para a viabilidade comercial da biotecnologia nesse contexto (VITOR, 2021).

No entanto, a aplicação da biotecnologia à degradação de polímeros enfrenta desafios significativos. Um dos principais desafios é a necessidade de encontrar microrganismos ou enzimas específicas para cada tipo de polímero. Cada classe de polímero possui características estruturais distintas, o que requer uma abordagem personalizada na seleção dos agentes biológicos utilizados no

processo de degradação. Além disso, é necessário garantir a eficiência e estabilidade desses agentes ao longo do tempo (QUEIROZ, 2022).

Diversas técnicas são utilizadas na biotecnologia aplicada a polímeros com o objetivo de otimizar o processo de degradação. Uma dessas técnicas é a modificação genética de microrganismos para produzir enzimas mais eficientes na degradação dos polímeros. Através da manipulação genética, é possível aumentar a atividade catalítica das enzimas ou conferir a capacidade de degradar polímeros específicos. Essa abordagem permite o desenvolvimento de microrganismos mais eficientes e adaptados às necessidades da indústria (LIMA, 2018).

2.3.2 Vantagens e desafios da biotecnologia na degradação de polímeros

A biotecnologia tem sido amplamente explorada como uma abordagem promissora para a degradação de polímeros, oferecendo diversas vantagens significativas. Uma das principais vantagens é a possibilidade de reduzir a quantidade de resíduos plásticos no meio ambiente. Através da utilização de microrganismos ou enzimas específicas, os polímeros podem ser quebrados em seus componentes básicos, permitindo sua decomposição mais rápida e eficiente. Isso contribui para a diminuição da acumulação de plásticos nos ecossistemas terrestres e aquáticos, minimizando os impactos negativos associados à poluição por plástico (SCHNEIDER, 2022).

No entanto, a utilização da biotecnologia na degradação de polímeros também enfrenta desafios significativos. Um dos principais desafios é encontrar microrganismos capazes de quebrar as ligações químicas dos polímeros. Os polímeros são compostos por cadeias longas e complexas, o que torna sua decomposição uma tarefa difícil para muitos microrganismos. Além disso, alguns polímeros sintéticos possuem estruturas químicas altamente estáveis, o que dificulta ainda mais sua degradação biológica. Portanto, é necessário investir em pesquisas para identificar e desenvolver microrganismos capazes de lidar com essa complexidade estrutural dos polímeros (COSTA, 2016).

A importância da biotecnologia na degradação de polímeros vai além das vantagens ambientais mencionadas anteriormente. Os plásticos são um dos principais problemas ambientais atualmente, devido à sua longa vida útil e baixa taxa de decomposição. A biotecnologia oferece uma solução promissora para esse problema, contribuindo para a sustentabilidade ambiental. Ao permitir a degradação dos polímeros em seus componentes básicos, a biotecnologia possibilita o reaproveitamento desses materiais na produção de novos produtos, reduzindo assim a necessidade de extração de recursos naturais e minimizando os impactos ambientais associados (SILVA, 2021).

Diferentes abordagens têm sido utilizadas na biotecnologia para a degradação de polímeros. Uma delas é o uso de enzimas específicas que possuem a capacidade de quebrar as ligações químicas dos polímeros. Essas enzimas podem ser isoladas de microrganismos encontrados na natureza ou produzidas através da engenharia genética. Além disso, também é possível utilizar microrganismos modificados geneticamente para produzir enzimas mais eficientes na degradação dos polímeros. Essas abordagens têm se mostrado promissoras e têm sido objeto de intensa pesquisa e desenvolvimento (CAMPDELLI, 2019).

Além das vantagens ambientais, a biotecnologia na degradação de polímeros também apresenta benefícios econômicos significativos. A criação de novas oportunidades de negócios e empregos na área é um desses benefícios. Com o aumento da demanda por tecnologias sustentáveis de tratamento e reciclagem de plásticos, surgem oportunidades para empresas especializadas nesse setor. Além disso, a biotecnologia também pode impulsionar a inovação e o desenvolvimento de novos produtos e processos, gerando benefícios econômicos adicionais (ZILLE, 2019).

A utilização da biotecnologia na degradação de polímeros também traz impactos sociais positivos. A redução da contaminação do solo e da água por resíduos plásticos é um desses impactos. A poluição por plástico é um problema global que afeta diretamente a saúde humana e a biodiversidade dos ecossistemas. Ao permitir a decomposição mais rápida e eficiente dos polímeros,

a biotecnologia contribui para a redução dessa contaminação, melhorando assim a qualidade de vida das comunidades afetadas (CARDOSO, 2019).

3. Métodos e técnicas utilizados na pesquisa

Os principais métodos utilizados na degradação biotecnológica de polímeros incluem a hidrólise enzimática e a fermentação microbiana. A hidrólise enzimática consiste na quebra dos polímeros por meio da ação de enzimas específicas, que catalisam as reações de hidrólise das ligações químicas presentes nas cadeias poliméricas. Já a fermentação microbiana envolve o uso de microrganismos capazes de metabolizar os polímeros como fonte de energia, resultando na sua decomposição (SANTOS, 2017).

As técnicas utilizadas para avaliar a degradação biotecnológica de polímeros são diversas e abrangem análises químicas, físicas e microbiológicas. As análises químicas permitem determinar a composição química dos polímeros antes e após o processo de degradação, por meio de técnicas como espectroscopia infravermelha e cromatografia. As análises físicas englobam medidas das propriedades físicas dos polímeros, como massa molar, viscosidade e resistência mecânica. Já as análises microbiológicas envolvem a contagem e identificação dos microrganismos presentes no sistema, bem como a avaliação da atividade enzimática (MDEFPE BASEADAS, 2021).

Diversos fatores podem influenciar a degradação biotecnológica de polímeros, tais como temperatura, pH, concentração de enzimas ou microrganismos e presença de co-solventes. A temperatura é um fator crítico, pois afeta a atividade enzimática e a taxa de crescimento dos microrganismos. O pH também desempenha um papel importante, uma vez que determinadas enzimas e microrganismos são mais eficientes em faixas específicas de acidez ou alcalinidade. Além disso, a concentração de enzimas ou microrganismos pode influenciar diretamente a velocidade de degradação dos polímeros, assim como a presença de co-solventes pode afetar a solubilidade e acessibilidade do substrato (RODRIGUES, POROSAS, 2021).

A degradação biotecnológica de polímeros apresenta diversas vantagens em relação a outros métodos de reciclagem. Uma das principais vantagens é a redução do consumo energético, uma vez que o processo biotecnológico utiliza microrganismos ou enzimas para realizar a quebra dos polímeros, ao contrário dos métodos convencionais que envolvem altas temperaturas e pressões. Além disso, a degradação biotecnológica produz subprodutos menos tóxicos, contribuindo para uma maior sustentabilidade ambiental (SILVA, 2016).

No entanto, a aplicação da degradação biotecnológica de polímeros em larga escala enfrenta desafios significativos. Um dos principais desafios é a seleção e otimização dos microrganismos ou enzimas mais eficientes para cada tipo de polímero. A diversidade estrutural dos polímeros torna necessário o desenvolvimento de estratégias específicas para cada caso, visando maximizar a eficiência da degradação. Além disso, a escalabilidade do processo também é um desafio, uma vez que é necessário garantir a viabilidade econômica e a segurança do processo em larga escala (LIMA, 2018).

Apesar dos avanços na área da degradação biotecnológica de polímeros, existem limitações na pesquisa atual que devem ser superadas. Uma das principais limitações é a falta de padronização das técnicas utilizadas para avaliar a degradação, o que dificulta a comparação entre os resultados obtidos por diferentes pesquisadores. Além disso, ainda há lacunas no conhecimento sobre os mecanismos bioquímicos envolvidos na degradação dos polímeros, o que impede um entendimento completo do processo. Para superar essas limitações, sugere-se que estudos futuros sejam direcionados para o desenvolvimento de métodos padronizados e para uma maior investigação dos mecanismos bioquímicos envolvidos na degradação biotecnológica de polímeros (NASCIMENTO, CAMILLO, 2017).

4. Resultados e Discussão

Os principais métodos utilizados na degradação biotecnológica de polímeros são a hidrólise enzimática e a fermentação microbiana. A hidrólise

enzimática consiste na quebra dos polímeros por meio da ação de enzimas específicas, que catalisam as reações de hidrólise das ligações químicas presentes nas cadeias poliméricas. Já a fermentação microbiana envolve o uso de microrganismos capazes de metabolizar os polímeros como fonte de energia, resultando na sua decomposição. Ambos os métodos têm se mostrado eficientes na degradação de diferentes tipos de polímeros, como o polietileno, o polipropileno e o poliestireno (ROCHA, 2021).

A degradação biotecnológica apresenta diversas vantagens em relação aos métodos convencionais, como a incineração e o descarte em aterros sanitários. Em primeiro lugar, ela é uma alternativa mais sustentável, pois utiliza processos naturais e renováveis para a decomposição dos polímeros. Além disso, a biodegradação permite a recuperação de materiais valiosos presentes nos polímeros, como monômeros e oligômeros, que podem ser utilizados na produção de novos materiais. (LEÃO, VITALE, 2021).

A eficiência da degradação biotecnológica de polímeros é influenciada por diversos fatores, como a temperatura, o pH e a concentração dos microrganismos envolvidos. A temperatura ideal varia de acordo com o tipo de polímero e microrganismo utilizado, sendo geralmente entre 30°C e 60°C. O pH também desempenha um papel importante, pois afeta a atividade enzimática e o crescimento dos microrganismos. Geralmente, valores neutros ou ligeiramente alcalinos são mais favoráveis para a degradação biotecnológica. Além disso, a concentração dos microrganismos deve ser adequada para garantir uma taxa de degradação eficiente (SCHNEIDER, 2022).

A aplicação da degradação biotecnológica de polímeros em escala industrial enfrenta desafios significativos, como a seleção e otimização dos microrganismos mais eficientes. A diversidade de polímeros existentes requer uma variedade de microrganismos capazes de metabolizá-los. Portanto, é necessário identificar e selecionar os microrganismos mais adequados para cada tipo de polímero. Além disso, é preciso otimizar as condições de cultivo desses microrganismos, como nutrientes disponíveis, temperatura e pH, visando maximizar sua atividade enzimática e taxa de crescimento (MESQUITA, 2023).

Os produtos resultantes da degradação biotecnológica de polímeros podem ter diversas aplicações. Um exemplo é a produção de bioplásticos, que são materiais renováveis e biodegradáveis obtidos a partir da fermentação microbiana ou hidrólise enzimática de polímeros. Esses bioplásticos podem substituir os plásticos convencionais, reduzindo a dependência de recursos não renováveis e diminuindo o impacto ambiental. Além disso, a degradação biotecnológica também pode gerar biofertilizantes, que são produtos ricos em nutrientes e microrganismos benéficos para o solo, contribuindo para a agricultura sustentável (LIMA, MOREIRA, ARAUJO, 2022).

A degradação biotecnológica de polímeros tem um impacto ambiental positivo, pois contribui para a redução do acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente. Os polímeros são materiais altamente persistentes e sua decomposição natural pode levar centenas de anos. No entanto, por meio da biodegradação, é possível acelerar esse processo e transformar os polímeros em compostos mais simples e menos prejudiciais ao meio ambiente. Dessa forma, a degradação biotecnológica contribui para a preservação dos ecossistemas terrestres e aquáticos (SANTOS SOUSA, LIMA, 2019).

4.1 Principais mecanismos biotecnológicos para a degradação de polímeros

A degradação de polímeros é um processo complexo que pode ser realizado por diferentes mecanismos biotecnológicos. Dentre eles, destacam-se a hidrólise enzimática e a oxidação biológica. A hidrólise enzimática consiste na quebra das ligações químicas dos polímeros por meio da ação de enzimas específicas. Essas enzimas, como as lipases, proteases e amilases, possuem a capacidade de reconhecer e se ligar aos polímeros, promovendo sua degradação em moléculas menores. Já a oxidação biológica ocorre pela ação de microrganismos que utilizam o polímero como fonte de energia, liberando compostos oxidados como subprodutos (MOURONER, 2017).

A importância da degradação biotecnológica de polímeros está diretamente relacionada à redução do impacto ambiental causado pelo acúmulo desses

materiais no meio ambiente. O acúmulo excessivo de polímeros pode levar à contaminação do solo, água e ar, afetando negativamente os ecossistemas e a saúde humana. Nesse sentido, a utilização da biotecnologia para a degradação desses materiais apresenta-se como uma alternativa sustentável e eficiente para minimizar esse impacto (SARMENTO, 2020).

As enzimas desempenham um papel fundamental na degradação biotecnológica de polímeros. As lipases são responsáveis pela quebra das ligações ester nas moléculas dos polímeros, enquanto as proteases atuam na quebra das ligações peptídicas e as amilases na quebra das ligações glicosídicas. Essas enzimas possuem alta especificidade, o que permite a degradação seletiva de diferentes tipos de polímeros. Além disso, elas podem ser produzidas em grande escala por meio de técnicas de engenharia genética, facilitando sua aplicação em processos industriais (SANCHES, 2020).

Os microrganismos também desempenham um papel importante na degradação biotecnológica de polímeros. Bactérias e fungos são capazes de produzir enzimas específicas para a degradação desses materiais, sendo considerados os principais agentes biodegradadores. Esses microrganismos possuem a capacidade de reconhecer e utilizar os polímeros como fonte de carbono e energia, promovendo sua decomposição em compostos mais simples. Além disso, eles podem ser isolados e cultivados em laboratório para posterior aplicação em processos industriais (FURCKEL, SOUZA, 2021).

A utilização da biotecnologia para a degradação de polímeros apresenta diversas vantagens em relação aos métodos convencionais. Um dos principais benefícios é a redução do uso de produtos químicos agressivos, uma vez que os microrganismos e enzimas utilizados são naturais e não tóxicos. Além disso, a biodegradação dos polímeros pode resultar na obtenção de produtos finais menos tóxicos, contribuindo para a preservação do meio ambiente e da saúde humana. Outra vantagem é a possibilidade de recuperação dos produtos da degradação, como monômeros e oligômeros, que podem ser utilizados na produção de novos materiais (MEDEIROS, LIMA, 2020).

No entanto, a aplicação da biotecnologia para a degradação de polímeros enfrenta alguns desafios. Um dos principais é a seleção adequada dos microrganismos e enzimas mais eficientes para cada tipo de polímero. Diferentes polímeros possuem estruturas químicas distintas, o que requer a utilização de microrganismos e enzimas específicos para sua degradação. Além disso, é necessário otimizar as condições de cultivo e processo para garantir uma maior eficiência na degradação dos polímeros (SILVA, 2018).

4.1.1 Enzimas utilizadas na degradação de polímeros

As enzimas desempenham um papel fundamental na degradação de polímeros, sendo de extrema importância na área da biotecnologia. Essas proteínas catalíticas são capazes de acelerar as reações químicas envolvidas na quebra dos polímeros, tornando o processo mais eficiente e controlado. A utilização de enzimas na degradação de polímeros permite a obtenção de produtos com maior pureza e qualidade, além de reduzir os custos e o tempo necessários para a realização do processo (MARQUES, NASCIMENTO, 2023).

A ação das enzimas na quebra dos polímeros ocorre por meio da interação entre o sítio ativo da enzima e as ligações químicas presentes no polímero. Esse processo pode ocorrer por hidrólise, oxidação ou redução das ligações químicas, resultando na fragmentação do polímero em unidades menores. A especificidade das enzimas é determinada pela estrutura tridimensional do sítio ativo, que é capaz de reconhecer e se ligar apenas a determinadas ligações químicas presentes no polímero (SANTOS, 2017).

Dentre as principais classes de enzimas utilizadas na degradação de polímeros, destacam-se as lipases, proteases e amilases. As lipases são responsáveis pela hidrólise das ligações éster presentes nos polímeros lipídicos, enquanto as proteases atuam na quebra das ligações peptídicas dos polímeros proteicos. Já as amilases são responsáveis pela hidrólise das ligações glicosídicas presentes nos polímeros de amido. Essas enzimas possuem

especificidades diferentes, o que permite a degradação seletiva de diferentes tipos de polímeros (QUEIROZ, RODRIGUEZ, 2019).

As características das enzimas utilizadas na degradação de polímeros são determinantes para sua eficiência e aplicabilidade. A especificidade das enzimas permite a degradação seletiva dos polímeros desejados, evitando a quebra indiscriminada de outros materiais presentes no sistema. Além disso, as enzimas apresentam alta eficiência catalítica, sendo capazes de acelerar as reações químicas envolvidas na quebra dos polímeros em várias ordens de magnitude (MELO, 2018).

Diversos fatores podem influenciar a atividade das enzimas na degradação de polímeros, como pH e temperatura. Cada enzima possui um pH ótimo para sua atividade, sendo que variações nesse parâmetro podem afetar negativamente sua eficiência. Da mesma forma, alterações na temperatura podem levar à desnaturação da enzima e consequente perda de sua atividade catalítica. Portanto, é fundamental controlar esses fatores durante o processo de degradação dos polímeros (ALVES, CARRIELLO, PEGORARO et al., 2022).

A utilização de enzimas na degradação de polímeros traz diversos benefícios, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. A redução do impacto ambiental é um dos principais benefícios dessa abordagem, uma vez que os resíduos gerados são biodegradáveis e menos tóxicos. Além disso, a possibilidade de reciclagem dos materiais degradados permite a reutilização dos polímeros, contribuindo para a redução do consumo de recursos naturais e a diminuição da geração de resíduos (COSTA, SANTOS, ANDRE, CORRÊA, 2019).

4.1.2 Microorganismos envolvidos na biodegradação de polímeros

A biodegradação de polímeros é um processo biológico que envolve a ação de diversos tipos de microorganismos, como bactérias, fungos e leveduras. Esses organismos possuem enzimas específicas que são capazes de romper as ligações químicas dos polímeros, transformando-os em compostos mais simples, como monômeros e oligômeros, que podem ser assimilados como nutrientes ou

fontes de energia. Os principais microorganismos utilizados nesse processo pertencem aos gêneros *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Staphylococcus* e *Fusarium*, entre outros, devido à sua eficiência na produção de enzimas extracelulares que atuam diretamente sobre os polímeros (MUSSI-DIAS, 2017).

No caso das bactérias, os gêneros *Pseudomonas* e *Bacillus* se destacam por sua capacidade de produzir uma ampla gama de enzimas, como lipases e esterases, que degradam polímeros como polietileno (PE), polipropileno (PP) e poliuretano (PU). As *Pseudomonas*, em particular, têm sido amplamente estudadas devido à sua habilidade em degradar materiais plásticos sob diferentes condições ambientais. Essas bactérias adaptam-se facilmente a ambientes hostis e podem utilizar os polímeros como fonte de carbono, promovendo uma degradação significativa em prazos relativamente curtos (SILVA, 2021).

Entre os fungos, os gêneros *Aspergillus* e *Penicillium* são frequentemente citados como microorganismos eficientes na biodegradação de polímeros. Esses fungos são conhecidos por produzir enzimas como proteases, celulasas e lacases, que atuam de forma específica na quebra das cadeias poliméricas. Por exemplo, o *Aspergillus niger* é amplamente utilizado para degradar polietileno de baixa densidade (PEBD), enquanto o *Penicillium simplicissimum* é eficaz na biodegradação de poliésteres. Esses fungos desempenham um papel crucial em ambientes com alta umidade, onde sua atividade enzimática é potencializada (SILVA, 2016).

As leveduras, como as do gênero *Candida*, também têm se mostrado promissoras na biodegradação de polímeros, especialmente os biodegradáveis como ácido polilático (PLA). Essas leveduras produzem enzimas hidrolíticas que convertem os polímeros em compostos mais simples, como ácido láctico, que podem ser utilizados em processos metabólicos. Embora sua eficiência seja geralmente menor que a das bactérias e fungos, as leveduras têm a vantagem de atuar em ambientes ácidos, o que amplia o espectro de condições ambientais em que a biodegradação pode ocorrer (PIMENTA, JUNIOR, COSTA MARQUES, 2021).

Os microorganismos anaeróbicos, como os do gênero *Clostridium*, têm recebido atenção no contexto da biodegradação de polímeros em ambientes sem oxigênio, como aterros sanitários. Esses organismos são capazes de degradar polímeros biodegradáveis, como polihidroxibutirato (PHB) e poli(ácido láctico) (PLA), produzindo biogás como subproduto, que pode ser aproveitado como fonte de energia renovável (MEDEIROS; LIMA, 2020).

A eficiência dos microorganismos na biodegradação está intimamente ligada às condições ambientais, como temperatura, umidade e pH. Bactérias como *Pseudomonas* e *Bacillus* apresentam melhor desempenho em temperaturas moderadas e ambientes neutros ou levemente alcalinos, enquanto fungos como *Aspergillus* prosperam em condições de alta umidade e pH ácido. Além disso, a presença de nutrientes específicos pode estimular a produção de enzimas degradativas, aumentando a eficiência do processo (SANCHES, 2020).

A aplicação de microorganismos na biodegradação tem gerado avanços significativos na gestão de resíduos plásticos. A utilização de consórcios microbianos, que combinam bactérias, fungos e leveduras, tem se mostrado particularmente eficaz na degradação de polímeros mais resistentes, como polietileno e polipropileno. Esses consórcios promovem uma sinergia enzimática que acelera a decomposição dos polímeros, tornando o processo mais eficiente e sustentável. Esses avanços destacam o potencial dos microorganismos como aliados na luta contra a poluição plástica e na busca por soluções mais sustentáveis para o descarte de materiais poliméricos (MUSSI-DIAS, 2017).

4.2 Estudos recentes sobre a aplicação da biotecnologia na degradação de diferentes tipos de polímeros

Avanços recentes na aplicação da biotecnologia para a degradação de polímeros têm proporcionado novas técnicas e métodos que visam solucionar o problema do acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente. Dentre as principais técnicas utilizadas, destacam-se a biodegradação enzimática, a bioconversão e a biorremediação. A biodegradação enzimática consiste na

utilização de enzimas produzidas por microrganismos para quebrar as ligações químicas dos polímeros, resultando em sua decomposição. Já a bioconversão envolve a transformação dos polímeros em compostos orgânicos por meio da atuação de microrganismos específicos. (QUEIROZ, 2022).

Diferentes tipos de polímeros podem ser degradados por meio da biotecnologia, sendo os mais comuns os polietilenos (PE), polipropilenos (PP), poliestirenos (PS) e poli(tereftalato de etileno) (PET). Esses materiais possuem características e propriedades distintas que influenciam na sua degradabilidade. O PE e o PP são altamente resistentes à decomposição, enquanto o PS e o PET apresentam maior facilidade para serem degradados. Além disso, outros fatores como tamanho molecular, estrutura química e presença de aditivos também podem afetar a taxa e eficiência da biodegradação (MAUGERI FILHO, F.; GOLDBECK, R., 2019).

A utilização da biotecnologia na degradação de polímeros traz benefícios ambientais significativos, principalmente no que diz respeito à redução do acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente. A decomposição dos polímeros por microrganismos permite a transformação desses materiais em compostos orgânicos mais simples, que podem ser utilizados como fonte de energia ou nutrientes por outros organismos. Dessa forma, a biotecnologia contribui para a diminuição da poluição causada pelos resíduos plásticos e para a preservação dos ecossistemas (YAMADA, 2021).

Apesar dos avanços na aplicação da biotecnologia para a degradação de polímeros, ainda existem desafios e limitações a serem superados. Um dos principais desafios é a necessidade de condições específicas para o crescimento e atividade dos microrganismos responsáveis pela degradação. Essas condições incluem temperatura, pH, disponibilidade de nutrientes e presença de oxigênio. Além disso, alguns polímeros são mais difíceis de serem decompostos do que outros, o que requer o desenvolvimento de novas estratégias e tecnologias para aumentar a eficiência da biodegradação (MARINS, CASALI, PEREIRA, 2021).

Estudos recentes têm comprovado a eficácia da biotecnologia na degradação de polímeros em diferentes ambientes, como solos contaminados e

corpos d'água. Pesquisas têm demonstrado que microrganismos específicos são capazes de decompor polímeros em condições naturais, resultando na redução da concentração desses materiais no ambiente. Além disso, estudos têm mostrado que a biotecnologia pode ser aplicada tanto em escala laboratorial quanto em escala industrial, o que abre possibilidades para sua utilização em larga escala (CARDOSO, 2019).

As aplicações práticas da biotecnologia na degradação de polímeros vão além da simples decomposição dos materiais plásticos. A possibilidade de utilizar os produtos resultantes da biodegradação na produção de novos produtos é uma das principais vantagens dessa abordagem. Compostos orgânicos obtidos a partir da decomposição dos polímeros podem ser transformados em bioplásticos, combustíveis renováveis ou até mesmo em matéria-prima para a indústria química. Essa abordagem circular permite reduzir ainda mais o impacto ambiental dos polímeros, ao mesmo tempo em que promove a economia de recursos naturais (EDAES, SOUZA, 2021).

5. Impacto ambiental e econômico da degradação biotecnológica de polímeros

A degradação biotecnológica de polímeros tem causado diversos impactos ambientais significativos. Um dos principais é a contaminação do solo e da água, uma vez que os resíduos resultantes desse processo podem infiltrar-se no solo e atingir os lençóis freáticos, comprometendo a qualidade da água potável disponível. Além disso, a liberação de gases tóxicos durante a degradação pode contribuir para o aumento do efeito estufa e a poluição atmosférica. Outro impacto relevante é o comprometimento da biodiversidade, uma vez que a degradação biotecnológica de polímeros pode afetar negativamente os ecossistemas naturais, levando à perda de espécies vegetais e animais BENTO, 2021.

Além dos impactos ambientais, a degradação biotecnológica de polímeros também acarreta consequências econômicas negativas. O aumento dos custos de limpeza e recuperação ambiental é um dos principais fatores que contribuem

para esses impactos. A necessidade de remover os resíduos contaminados do solo e da água demanda recursos financeiros consideráveis, além de mão-de-obra especializada. Além disso, a perda de recursos naturais também representa um prejuízo econômico significativo, uma vez que esses recursos são utilizados como matéria-prima na produção industrial. (CAMARGO, 2018).

Para minimizar o impacto ambiental da degradação biotecnológica de polímeros, é necessário buscar soluções sustentáveis. O desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis é uma das alternativas, visando a redução dos resíduos gerados e a utilização de processos mais eficientes. Além disso, a implementação de políticas públicas voltadas para a preservação do meio ambiente também se mostra fundamental, incentivando práticas sustentáveis e estabelecendo normas e regulamentações para o setor. A conscientização da sociedade sobre a importância da reciclagem e do consumo consciente também desempenha um papel crucial na minimização do impacto ambiental (MDEFPE BASEADAS, 2021).

A adoção de práticas sustentáveis na biotecnologia de polímeros pode trazer benefícios econômicos significativos. A redução dos custos de produção é um dos principais aspectos positivos, uma vez que a utilização de processos mais eficientes e a diminuição dos resíduos gerados podem resultar em economia financeira para as empresas. Além disso, a adoção dessas práticas também contribui para o aumento da eficiência energética, reduzindo os gastos com energia elétrica e combustíveis. (VITOR, 2021).

No entanto, a implementação da degradação biotecnológica de polímeros em larga escala enfrenta diversos desafios. Um dos principais é a resistência das indústrias tradicionais, que muitas vezes não estão dispostas a investir em tecnologias mais sustentáveis devido aos altos custos envolvidos. Além disso, a falta de incentivos governamentais também representa um obstáculo, uma vez que a ausência de políticas públicas voltadas para a sustentabilidade pode desestimular as empresas a adotarem práticas mais responsáveis. (BIZERRA, SILVA, 2016).

A educação ambiental e a conscientização da população são fundamentais para promover a adoção de práticas sustentáveis na biotecnologia de polímeros. Através da disseminação do conhecimento sobre os impactos negativos da degradação biotecnológica de polímeros e das alternativas disponíveis, é possível sensibilizar as pessoas sobre a importância da preservação do meio ambiente. Além disso, é necessário investir em programas de educação ambiental nas escolas e universidades, visando formar profissionais capacitados e conscientes dos desafios ambientais enfrentados pela sociedade. Somente através da conscientização e da educação será possível promover o desenvolvimento econômico sustentável e garantir a preservação do meio ambiente para as futuras gerações (MOURONER, 2017).

5.1 Benefícios ambientais da utilização da biotecnologia na degradação de polímeros

A utilização da biotecnologia na degradação de polímeros desempenha um papel fundamental na preservação do meio ambiente. Os polímeros são amplamente utilizados em diversos setores, como embalagens, construção civil e indústria automobilística, o que resulta em uma grande quantidade de resíduos plásticos sendo descartados no meio ambiente. A biotecnologia oferece uma abordagem promissora para lidar com esse problema, pois utiliza microrganismos capazes de degradar os polímeros de forma eficiente e sustentável (CORREIA, 2021).

Um dos principais benefícios ambientais da utilização da biotecnologia na degradação de polímeros é a redução da quantidade de resíduos plásticos no meio ambiente. Ao utilizar microrganismos específicos, é possível transformar os polímeros em compostos mais simples e menos prejudiciais ao ecossistema. Isso contribui para a diminuição da poluição causada pelos polímeros e para a preservação dos recursos naturais (REZENDE, ROSADO, MOREIRA, 2016).

A biotecnologia também pode contribuir para a diminuição da poluição causada pelos polímeros através da utilização de microrganismos que possuem

a capacidade de degradar esses materiais. Esses microrganismos produzem enzimas capazes de quebrar as ligações químicas presentes nos polímeros, transformando-os em substâncias mais simples que podem ser absorvidas pelo meio ambiente sem causar danos significativos (AMORIM NETO, 2020).

Além disso, a utilização da biotecnologia na degradação de polímeros apresenta vantagens em relação a outros métodos, como a incineração ou o descarte em aterros sanitários. A incineração, por exemplo, gera emissões de gases poluentes e contribui para o aquecimento global. Já o descarte em aterros sanitários pode levar séculos para que os polímeros se decomponham completamente. A biotecnologia, por sua vez, oferece uma alternativa mais sustentável e eficiente, pois utiliza microrganismos que são capazes de degradar os polímeros de forma rápida e eficaz (NASCIMENTO, CAMILLO, 2017).

A utilização da biotecnologia na degradação de polímeros também traz impactos positivos para o ciclo de vida desses materiais. Desde a produção dos polímeros até sua decomposição, a biotecnologia pode ser aplicada para tornar todo o processo mais sustentável. Por exemplo, é possível utilizar microrganismos na produção de polímeros biodegradáveis, reduzindo assim seu impacto ambiental desde o início (SILVA, 2021).

Além disso, a biotecnologia pode ser uma alternativa sustentável e eficiente para lidar com o problema dos resíduos plásticos, contribuindo para a economia circular. Ao utilizar microrganismos na degradação dos polímeros, é possível transformá-los em compostos que podem ser utilizados como matéria-prima na produção de novos produtos. Isso evita a extração de recursos naturais e reduz a dependência da indústria em relação aos polímeros derivados do petróleo (ROCHA, 2021).

5.2 Viabilidade econômica da implementação da biotecnologia na indústria de polímeros

A viabilidade econômica desempenha um papel fundamental na implementação da biotecnologia na indústria de polímeros. Antes de investir

nessa tecnologia, é essencial avaliar cuidadosamente os custos e benefícios envolvidos. Isso se deve ao fato de que a adoção da biotecnologia pode representar um alto investimento inicial, tanto em termos de equipamentos quanto em pesquisas. Portanto, é necessário analisar se os benefícios econômicos a longo prazo compensam os custos iniciais (SCHNEIDER, 2022).

Uma das principais vantagens econômicas da utilização da biotecnologia na indústria de polímeros é a redução dos custos de produção. Através do uso de microorganismos modificados geneticamente, é possível obter matérias-primas mais baratas e abundantes, o que contribui para a diminuição dos gastos com insumos. Além disso, a biotecnologia também pode aumentar a eficiência dos processos produtivos, resultando em uma maior produtividade e redução do tempo necessário para fabricar os polímeros (CAPO BRANCO-MG, 2022).

No entanto, a implementação da biotecnologia na indústria de polímeros enfrenta desafios econômicos significativos. Um desses desafios é o alto custo inicial de investimento em equipamentos e pesquisas. A compra de equipamentos especializados e a realização de estudos científicos podem representar um ônus financeiro considerável para as empresas. Além disso, há também o risco associado à incerteza dos resultados das pesquisas, o que pode levar a um desperdício de recursos financeiros (LIMA, 2018).

Para superar esses desafios econômicos, é possível adotar estratégias como parcerias com instituições de pesquisa e desenvolvimento. Essas parcerias podem proporcionar acesso a conhecimentos especializados e recursos adicionais, reduzindo assim os custos de pesquisa e desenvolvimento. Além disso, buscar financiamentos governamentais também pode ser uma opção viável para empresas que desejam implementar a biotecnologia na indústria de polímeros. Os governos muitas vezes oferecem incentivos financeiros para projetos inovadores, o que pode ajudar a reduzir os custos iniciais de investimento (CAMPDELLI, 2019).

A utilização da biotecnologia na indústria de polímeros pode trazer impactos econômicos positivos significativos. Um desses impactos é o desenvolvimento de novos produtos com maior valor agregado. Através da

modificação genética dos microorganismos utilizados na produção de polímeros, é possível obter materiais com propriedades únicas e melhor desempenho, o que pode resultar em produtos mais atrativos para o mercado. Além disso, a adoção da biotecnologia também pode abrir novos mercados, uma vez que os consumidores estão cada vez mais exigindo soluções sustentáveis e ecologicamente corretas (COSTA, 2016).

No entanto, é importante considerar as possíveis limitações econômicas da utilização da biotecnologia na indústria de polímeros. Uma dessas limitações é a dependência de recursos naturais específicos. Por exemplo, alguns microorganismos utilizados na produção de polímeros podem exigir matérias-primas que são limitadas em quantidade ou que só estão disponíveis em determinadas regiões geográficas. Isso pode aumentar os custos de produção e limitar a viabilidade econômica da tecnologia (ZILLE, 2019).

Além disso, a utilização da biotecnologia na indústria de polímeros também enfrenta a concorrência com outras tecnologias já estabelecidas no mercado. Por exemplo, os polímeros sintéticos tradicionais têm sido amplamente utilizados há décadas e possuem uma infraestrutura de produção consolidada. Portanto, as empresas que desejam implementar a biotecnologia precisam competir com essas tecnologias estabelecidas, o que pode representar um desafio adicional do ponto de vista econômico (SOUSA, 2018).

Considerando avanços tecnológicos e a crescente demanda por soluções sustentáveis, as perspectivas futuras da viabilidade econômica da implementação da biotecnologia na indústria de polímeros são promissoras. Com o desenvolvimento contínuo de novas técnicas e aprimoramento dos processos produtivos, é possível reduzir os custos associados à biotecnologia e aumentar sua eficiência. Além disso, a demanda por produtos sustentáveis está em constante crescimento, o que cria oportunidades para empresas que adotam essa tecnologia. No entanto, é necessário continuar investindo em pesquisa e desenvolvimento para superar os desafios econômicos e maximizar os benefícios da biotecnologia na indústria de polímeros (ARAÚJO, FREITAS, SARMENTO, 2021).

Considerações finais

As principais técnicas de biodegradação de polímeros utilizadas atualmente, como a degradação enzimática e microbiana, vêm sendo aplicadas em diferentes contextos industriais com o objetivo de reduzir o impacto ambiental dos resíduos plásticos. Indústrias que atuam no setor de biotecnologia e materiais sustentáveis têm se destacado nesse cenário. Empresas como Carbios, localizada na França, utilizam tecnologias baseadas em enzimas para degradar polímeros como PET (polietileno tereftalato). A Carbios desenvolveu um processo inovador que utiliza enzimas modificadas geneticamente para despolimerizar plásticos PET, permitindo a reciclagem em larga escala com alta eficiência. Esse processo tem atraído parcerias com grandes multinacionais, como Nestlé e PepsiCo, visando uma economia circular mais sustentável.

Indústrias brasileiras como Braskem têm investido no desenvolvimento de biopolímeros a partir de fontes renováveis, utilizando microorganismos específicos para sintetizar plásticos biodegradáveis, como o polihidroxialcanoato (PHA) e o ácido polilático (PLA). Esses polímeros têm a vantagem de serem biodegradáveis e produzidos com menor impacto ambiental, destacando-se como alternativas promissoras aos plásticos convencionais.

Os equipamentos utilizados nesses processos variam conforme a técnica empregada. Em processos de degradação enzimática, são utilizados biorreatores, que oferecem condições controladas de pH, temperatura e agitação, essenciais para maximizar a atividade das enzimas. Em processos microbianos, são empregados sistemas de fermentação em larga escala com controle rigoroso das condições ambientais e suplementação de nutrientes, garantindo o crescimento dos microorganismos responsáveis pela biodegradação. Equipamentos adicionais, como centrífugas e sistemas de filtração, são utilizados para a purificação dos subprodutos gerados no processo.

O custo dos processos de biodegradação biotecnológica ainda representa um desafio para sua aplicação em larga escala. Empresas como a Carbios

estimam que o custo do processo enzimático pode chegar a aproximadamente US\$ 1.500 a US\$ 2.000 por tonelada de plástico reciclado, um valor que, apesar de mais alto em comparação aos métodos convencionais, tem se mostrado competitivo devido aos benefícios ambientais e à crescente demanda por soluções sustentáveis. No caso dos biopolímeros, o preço médio dos materiais biodegradáveis, como o PLA, varia entre US\$ 2.000 e US\$ 3.000 por tonelada, dependendo das condições de produção e do mercado.

Diante desses fatores, observa-se que a biodegradação de polímeros representa um caminho promissor, mas que ainda demanda avanços tecnológicos para a redução dos custos e a ampliação da sua aplicação industrial. Empresas como Carbios e Braskem lideram o setor com inovações que integram ciência, tecnologia e sustentabilidade, criando soluções eficientes para o problema do acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente. Com investimentos contínuos em pesquisa, desenvolvimento de novos equipamentos e políticas de incentivo à economia circular, espera-se que a biodegradação biotecnológica se torne mais acessível e amplamente adotada em escala global.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAMC MOURONER. Estudo In Vivo da Biocompatibilidade e Degradação de Blendas de Poli (ϵ -Caprolactona) Associada ou Não a Hidroxiapatita e Tetraciclina. 2017. Disponível em: <<http://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1898>>. Acesso em: .

ALVES, LR; CARRIELLO, GM; PEGORARO, GM et al. Aplicações de Enzimas em Poliuretano: Uma revisão das Dissertações e Teses brasileiras. Scientia| Naturais e ..., 2022. Disponível em: <<https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumNT/article/view/4313>>. Acesso em: .

AMORIM NETO, M. F. A hidrólise alcalina como acelerador da degradação da casca do coco seco. 2020. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/7140>>. Acesso em: .

ARAÚJO, B. A.; FREITAS, L. S. de; SARMENTO, K. K. F. A aplicação de polímeros biodegradáveis como uma alternativa sustentável. Research, Society and Development, 2021. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/18248>>. Acesso em: .

BELMONTE, G. K. Explorando a radiação eletromagnética na modificação superficial de polímeros: da degradação à litografia e EUV. 2020. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/214504>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

Bento, R. (2021). Proposta de processos químicos para melhor recuperação de hidrocarboneto de alto valor agregado de uma indústria de biotecnologia. Repositório UFSCar. Recuperado de <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/14209>

BIZERRA, A.; SILVA, V. Sistemas de liberação controlada: Mecanismos e aplicações. Revista Saúde e Meio Ambiente, [S.l.], v. 6, n. 2, p. 1-10, 2016. Disponível em: <<https://desafioonline.ufms.br/index.php/sameamb/article/view/1943>>. Acesso em: 16 nov. 2023.

BRASIL ESCOLA. **Polímeros**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/polimeros.htm>. Acesso em: 16 dez. 2024.

CAETANO, RMJ; BEDOR, PBA; LEITE, SGF; SOUZA JR, FG. VI-242– APLICAÇÃO DE MATRIZ POLIMÉRICA DE UREIA NA BIODEGRADAÇÃO DE HIDROCARBONETOS DE PETRÓLEO. Disponível em: <link>. Acesso em: 16 nov. 2023.

CAMARGO, M.S.A. Avaliação da degradação de celulose bacteriana após exposição em diferentes meios abióticos e bióticos. 2018. Disponível em: <https://www.univille.edu.br/account/mep/VirtualDisk.html/downloadDirect/1399307/Dissertacao-_Michely_S_A_Camargo.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2023.

CAMPDELLI, R. R. Preparação de compósitos polímero-magnetita funcionalizáveis e aplicação na degradação do dietil-2, 4-dinitrofenil fosfato. 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/211481>>. Acesso em: 16 nov. 2023.

CAPO BRANCO-MG, B. ESTUDO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E MORFOLÓGICO DE COMPÓSITOS FORMADO DO PLÁSTICO DAS CÁPSULAS DE CAFÉ E AS. Disponível em: <link>. Acesso em: 17 nov. 2023.

CARDOSO, A. Plasmídeos formulados com nanopartículas catiônicas: análise da estabilidade físico química e biológica. 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/52315>>. Acesso em: 17 nov. 2023.

CORREIA, P.R.C. Desenvolvimento de sistemas biocompósitos baseados em polímeros biodegradáveis para liberação controlada do feromônio rincoforol. 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/handle/ri/35200>>. Acesso em: 17 nov. 2023.

COSTA, R. A. Degradação enzimática de clorofenol em microrreator. 2016. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-29062016-161332/en.php>>. Acesso em: 16 nov. 2023.

COSTA, V. P. V.; SANTOS, D. M.; ANDRE, R. S.; CORRÊA, D. S. Membranas fibrosas assimétricas produzidas por fiação por sopro em solução utilizando borracha natural, poli (ácido láctico) e nanopartículas de ZNO. 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1116479/1/PMembrana_sfibrosasassimetricas....pdf>. Acesso em: 17 nov. 2023.

EDAES, F. S.; SOUZA, C. B. Malefícios dos plásticos convencionais e estratégias biológicas e moleculares para a produção de plásticos biodegradáveis. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Felipe-Edaes/publication/356567793_MALEFICIOS_DOS_PLASTICOS_CONVENCIONAIS_E ESTRATEGIAS_BIOLÓGICAS_E_MOLECULARES_PARA_A_PRODUCÃO_DE_PLASTICOS_BIODEGRADAVEIS/links/61a141a53068c54fa5203579/MALEFICIOS-DOS-PLASTICOS-CONVENCIONAIS-E-ESTRATEGIAS-BIOLÓGICAS-E-MOLECULARES-PARA-A-PRODUÇÃO-DE-PLASTICOS-BIODEGRADAVEIS.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2023.

FURCKEL, M.; SOUZA, E. L. Produção e caracterização de biopolímero à base de amido e glicerol com resíduos agroindustriais. In: Seminário de ..., 2021. Disponível em: <<https://portalperiodicos.unoesc.edu.br/siepe/article/download/28646/16723>>. Acesso em: 10 nov. 2023.

KAO, L. S. Estudo de Métodos para Avaliação da Degradação de Bisfenol A (BFA) por Fungos Filamentosos. Disponível em: <<http://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/7382>>. Acesso em: 2023.

LEÃO, M. G. P.; VITALE, N. A. Estudo de substituição alternativa de polímeros petroquímicos. 2021. Disponível em: <<https://dspace.mackenzie.br/handle/10899/29078>>. Acesso em: 2023.

LIMA, M. L. Avaliação das propriedades físicas, químicas e compatibilidade biológica dos polímeros acrilonitrilo-butadieno-estireno e ácido poliláctico. 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/29723>>. Acesso em: 2023.

LIMA, T.M.P.; MOREIRA, B.G.; ARAUJO, A.C. Impactos da degradação do plástico no meio ambiente e na saúde humana: uma revisão. Disponível em: <<https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/11890>>. Acesso em: 2022.

MARINS, P. de F.; CASALI, C. A.; PEREIRA, A. G. B. Deterioração in situ de espumas de poliuretanos comerciais com base renovável por compostagem de cama aviária. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 1, p. 1-10, 2021. Disponível em: <<https://sustenere.co/index.php/rica/article/view/6198>>. Acesso em: 2023.

MARQUES, E. V.; NASCIMENTO, L. A. S. do. PI. 084 Síntese e caracterização de TiO₂ black obtido mediante método de redução química para a degradação de poluentes orgânicos por fotocatalise. In: 22° ... , 2023. Disponível em: <<https://submissao.cbcat.sbc.org.br/index.php/2023-cbcat/article/view/382>>. Acesso em: 2023.

MAUGERI FILHO, F.; GOLDBECK, R. Produção de polissacarídeos. In: Biotecnologia Industrial-Vol. 3. 2019. Disponível em: <https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=u3O5DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA219&dq=Degrada%C3%A7%C3%A3o+Biotecnologia+de+Pol%C3%ADmeros+na+Qu%C3%ADmica&ots=kFcihIIN-h&sig=6bbPojV1_vPPAxfiaa_BLEX4RAk>. Acesso em: 2023.

MDEFPE BASEADAS. Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1141850/1/TS-MANTAS-DE-FIBRAS-POLIMERICAS-ELETROFIADAS-BASEADAS-EM-....pdf>>. Acesso em: 2021.

MEDEIROS, KM de; LIMA, CAP de (editorarealize.com.br). Novas tendências sustentáveis: os biopolímeros e os polímeros biodegradáveis. Disponível em: <http://www.editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2020/TRABALHO_EV_138_MD4_SA23_ID1194_11112020190404.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2023.

MELO, F. M. Investigação do potencial genético da microbiota de mananciais do estado de São Paulo para degradação de diferentes xenobióticos. 2018. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/60/60135/tde-27062018-120030/?gathStatIcon=true>>. Acesso em: 2023.

MESQUITA, L. M. Biorremediação de xenobióticos provenientes dos plásticos através de microrganismos. 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/37588>>. Acesso em: 2023.

Mussi-Dias, V.; dos Santos, A. V. DEGRADAÇÃO DE POLIURETANO POR FUNGOS: PERSPECTIVAS PARA PRESERVAÇÃO AMBIENTAL. Biológicas & Saúde, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 1-10, 2017. Disponível em: <https://ojs3.perspectivasonline.com.br/biologicas_e_saude/article/view/1168>. Acesso em: .

NASCIMENTO, ACM; CAMILLO, VCG. Síntese e caracterização de copolímeros a partir do glicerol. Revista Brasileira de Energias, 2017. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/328077896.pdf>>. Acesso em: 2023.

PIMENTA, A. F.; JUNIOR, I. T.; COSTA MARQUES, V. da. Degradação via compostagem de polímeros biodegradáveis e de suas blends com amido. Disponível em: <link>. Acesso em: [data].

QUEIROZ, JCF. Avanços em Biotecnologia e Bioprocessos. 2022. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/29383/AVAN%C3%87OS%20EM%20BIOTECNOLOGIA%20E%20BIOPROCESSOS%20-%20E-BOOK%20CDSA%202022.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 2023.

QUEIROZ, JWS de; RODRIGUEZ, AFR. Nanopartículas magnéticas e suas aplicações biomédicas. In: Tópicos em Biotecnologia e Biodiversidade. Disponível em: <<http://www2.ufac.br/editora/livros/topicos-em-biotecnologia-e-biodiversidade.pdf/@@download/file/LivroAtualizado08042019.pdf#page=104>>. Acesso em: 2023.

REZENDE, F. M.; ROSADO, D.; MOREIRA, F. A. Vias de síntese de metabólitos secundários em plantas. In: Encontro Nacional de Ensino de Química, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Carolina-Kleingesinds/publication/324744075_Sinalizacao_entre_plantas_e_bacterias/links/5adfdf970f7e9b285945e501/Sinalizacao-entre-plantas-e-bacterias.pdf#page=93>. Acesso em: 2023.

ROCHA, T. H. S. Máscaras e respiradores: uma revisão sobre suas características e seus impactos ambientais, ea influência da pandemia de COVID-19. 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/15287>>. Acesso em: 2023.

RODRIGUES, T.F.; POROSAS, P.E.C.D.E.M. FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO ENGENHARIA QUÍMICA. Disponível em: <<https://biblioteca.univap.br/dados/00002c/00002cc8.pdf>>. Acesso em: 2023.

SANCHES, N. Óleo essencial de citronela encapsulado com polímeros naturais. Disponível em: <<https://ifpr.edu.br/londrina/wp-content/uploads/sites/18/2020/03/NATHALIA-SANCHES-Oleo-essencial-de-citronela-encapsulado-com-polimeros-naturais.pdf>>. Acesso em: 2023.

SANTOS SOUSA, M. V.; LIMA, F. R. Estudo da incorporação de LCC à Membrana de Quitosana. Brazilian Journal of ..., 2019. Disponível em: <<https://www.brjd.com.br/index.php/BJHR/article/view/1991>>. Acesso em: 2023.

SANTOS, J. P. Práticas Educativas em Biotecnologia: Integrando a Biologia e a Química em um Estudo de Bioplástico de Amido. 2017. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/182295>>. Acesso em: 2023.

SARMENTO, L. R. Á. Síntese e modificação da zeólita ZSM-23 obtida através de diferentes rotas com aplicação na degradação termocatalítica do UHMWPE. 2020. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/7457>>. Acesso em: 2023.

SCHNEIDER, F. Preparação de selos pH-responsivos para aplicação em embalagem de alimentos perecíveis. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/239850>>. Acesso em: 2022.

SILVA, CJA da. A importância dos fungos na biotecnologia. Caderno de Graduação - Ciências Biológicas e da Saúde, [S.l.], v. 4, n. 1, p. 1-10, 2016. Disponível em: <<http://periodicos.set.edu.br/facipesaude/article/view/3210>>. Acesso em: 2023.

SILVA, H. D. F. Plástico residual: poluente expandido pela COVID-19 ea atuação da biotecnologia em mitigar o dano ambiental. Repositório UFU, 2021. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/32091>>. Acesso em: 2023.

SILVA, J. G. Polpa de fibra de bananeira para produção de polímeros de bioplástico. 2018. Disponível em: <<http://repositorio.unitau.br/jspui/handle/20.500.11874/3454>>. Acesso em: 2023.

SILVA, J. O. Obtenção de acetato de celulose a partir de bagaço de cana-de-açúcar e análise de degradação in vitro. 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11441>>. Acesso em: 2023.

SILVA, V. S. Biodegradação de polipropileno (PP) e poliestireno (PS) utilizando fungo isolado do trato intestinal de *Tenebrio molitor* Linnaeus. 2021. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/26872>>. Acesso em: 2023.

SLIDEPLAYER. **Propriedades Físicas da Matéria.** Disponível em: <https://slideplayer.com.br/slide/373574/>. Acesso em: 16 dez. 2024.

SOUSA, A. M. S. Desenvolvimento de filmes nanoestruturados à base de polianilina e nanopartículas de óxido de zinco para futuras aplicações em sensores eletroquímicos de ... 2018. Disponível em: <<http://bia.ifpi.edu.br:8080/jspui/handle/123456789/990>>. Acesso em: 2023.

VITOR, ACG. ABORDAGENS TEÓRICAS E PRÁTICAS DE BIOPLÁSTICOS NO ENSINO DE BIOLOGIA E QUÍMICA, NO MUNICÍPIO DE GARANHUNS-PE. Disponível em: <https://eventos.congresso.me/rails/active_storage/blobs/redirect/eyJfcmFpbHMiOnsibWVzc2FnZSI6IklJBaHBBcjhiliwiZXhwIjpudWxsLCJwdXliOiJibG9iX2lkIn19--5834c20ea1eb6ebc475739ebf0330ac7498722d2/ABORDAGENS_TE-C3-93RICAS_E_PR-C3-81TICAS_DE_BIOPL-C3-81STICOS_NO_ENSINO_DE_BIOLOGIA_E_QU-C3-8DMICA__NO_MUNIC-C3-8DPIDIO_DE_GARANHUNS-PE._CONEQFBM__CONEQFBM_-_1-C2-AA_Edi-C3-A7-C3-A3o.pdf>. Acesso em: 2023.

YAMADA, C. Universidade de Araraquara Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia em Medicina Regenerativa e Química Medicinal. Disponível em: <<https://www.uniara.com.br/arquivos/file/ppg/biotecnologia-medicina-regenerativa-quimica-medicinal/repositorio-cientifico/dissertacoes/2021/caroline-yamada.pdf>>. Acesso em: 2023.

ZILLE, A. O Futuro dos Têxteis: A Nanotecnologia ea Biotecnologia ao Serviço dos Materiais Fibrosos. 2019. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/61405>>. Acesso em: 2023.