

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA NA INDÚSTRIA DOS PLÁSTICOS E ADOÇÃO DA ECOINOVAÇÃO PARA REDUZIR SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

JOHN WILMER PARRA LLANOS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

CAROLINE RODRIGUES VAZ

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC

LUCILA MARIA DE SOUZA CAMPOS

Introdução

Os polímeros, são compostos por várias pequenas unidades conhecidas como monômeros, que são interconectadas para produzir cadeias longas. Esses materiais são onipresentes em nossas vidas diárias, manifestando-se em uma gama diversificada de produtos e mercadorias (NAMAZI, 2017). O extraordinário sucesso dos polímeros, principalmente dos polímeros plásticos, levou ao seu consumo excessivo. As qualidades favoráveis dos polímeros, acelerou a substituição de outros materiais, por materiais poliméricos que oferecem importantes vantagens, propriedades e aplicações de alto consumo (FELDMAN, 2008).

Problema de Pesquisa e Objetivo

O uso de polímeros plásticos é difundido em vários setores. No entanto, a produção e o descarte de polímeros plásticos geram impactos ambientais significativos, como mudanças climáticas e poluição ambiental, uma vez que permanecem no meio ambiente por muitos anos. Na busca por compreender a influência da inovação tecnológica na indústria dos plásticos, este artigo tem por objetivo apresentar a evolução da indústria dos plásticos, assim como identificarecoinovações que foram desenvolvidas no setor para aliviar seus efeitos prejudiciais ao meio ambiente, por meio de uma revisão de literatura.

Fundamentação Teórica

Os problemas atuais das mudanças climáticas exigem novas formas radicais de viver, produzir e consumir. Atualmente a indústria de plásticos está enfrentando o desafio de contribuir para a luta contra as mudanças climáticas e ao mesmo tempo, a poluição dos resíduos plásticos (CHADHA, 2011). A adoção de novas práticas e do desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e limpas na indústria dos polímeros permitiram reduzir o consumo de recursos naturais e diminuir a produção de resíduos, além de mitigar os impactos das mudanças climáticas e problemas relacionados (ZUIDERVEEN et al., 2021).

Metodologia

Neste estudo, a revisão da literatura foi realizada de acordo com o método SYSMAP (Scientometric and sYStematic yielding MApping Process). O estudo inicialmente identificou 102 publicações indexadas nas bases de dados Scopus. Após de aplicar os critérios de seleção, um total de 46 documentos em texto completo foram selecionados para análise do conteúdo.

Análise dos Resultados

Este artigo fornece uma visão geral histórica da evolução dos polímeros. Além disso, identificou a adoção de ecoinovações que se vem desenvolvendo na indústria de plásticos como reciclagem, bioplásticos e plásticos biodegradáveis. O desenvolvimento de novos materiais como os bioplásticos tem o potencial de mitigar os impactos negativos ocasionados pelos plásticos tradicionais, reduzindo os resíduos e desenvolvendo materiais mais sustentáveis.

Conclusão

Materiais poliméricos, particularmente plásticos, foram desenvolvidos com a intenção de simplificar nosso modo de vida. Apesar de sua necessidade em várias atividades diárias, é crucial reconhecer que eles se tornaram uma fonte significativa de contaminação ambiental global, colocando em risco a biodiversidade dos ecossistemas marinhos e terrestres e representando uma ameaça potencial à saúde humana no futuro. A adoção de práticas e produtos ecoinovadores na indústria dos plásticos pode ajudar a reduzir os impactos ambientais ocasionados pelos resíduos plásticos.

Referências Bibliográficas

CHADHA, A. Overcoming Competence Lock-In for the Development of Radical Eco-Innovations: The Case of Biopolymer Technology. *Industry and Innovation*, v.18, n.03, p. 335-350, 2011. FELDMAN, D. *Polymer History. Designed Monomers and Polymers*, v. 11, n. 1, p. 1-15, 2008. NAMAZI, H. *Polymers in our daily life. Bioimpacts*. v. 7, n. 2, p. 73-74, 2017. ZUIDERVEEN, E. et al. Ex-ante life cycle assessment of polyethylenefuranoate (PEF) from bio-based monomers synthesized via a novel electrochemical process. *Cleaner Environmental Systems*, v. 2, 100036, 2021.

Palavras Chave

Ecoinovação, Inovação Tecnológica, Mudanças climáticas

Agradecimento a órgão de fomento

Agradecemos o apoio do CNPq pelo financiamento da Bolsa de Doutorado de um dos autores.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA NA INDÚSTRIA DOS PLÁSTICOS E ADOÇÃO DA ECOINOVAÇÃO PARA REDUZIR SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS: UMA REVISÃO DA LITERATURA

1. INTRODUÇÃO

Os polímeros, que representam uma vasta classe de materiais, são compostos por várias pequenas unidades conhecidas como monômeros, que são interconectadas para produzir cadeias longas. Esses materiais são onipresentes em nossas vidas diárias, manifestando-se em uma gama diversificada de produtos e mercadorias (e.g. roupas de fibra sintética, copos de polietileno, sacolas plásticas, cola epóxi, amortecimento de espuma de poliuretano, utensílios de cozinha revestidos com teflon) (NAMAZI, 2017). O extraordinário sucesso dos polímeros levou ao seu consumo excessivo, o que gerou um grande acúmulo dos chamados plásticos descartáveis. As qualidades favoráveis dos polímeros, acelerou a substituição de outros materiais (e.g. metais, vidro, madeira, papelão e papel), por materiais poliméricos que oferecem importantes vantagens, propriedades e aplicações de alto consumo (SALGADO; PALACIOS, 2021; FELDMAN, 2008). No entanto, a dependência do uso dos polímeros, principalmente dos polímeros plásticos tem gerado consequências nefastas para o meio terrestre e aquático (VÁZQUEZ; RAHMAN, 2021; VIVEKANAND *et al.*, 2021).

Os plásticos estão sendo produzidos e descartados no meio ambiente em alta velocidade devido ao crescimento e desenvolvimento dessa indústria em todo o mundo e ao crescimento da população. Vale ressaltar que a terra, as fontes de água, a qualidade do ar e a vida animal estão enfrentando efeitos negativos devido à contaminação gerada pelo mau gerenciamento e descarte desse resíduo plástico pós-consumo (EVODE *et al.*, 2021). A lenta degradação é uma característica dos resíduos plásticos após sua utilização que suscita grande preocupação, devido impacto negativo no meio ambiente (CRUZ SANCHEZ *et al.*, 2020). As estimativas indicam que, até o final de 2020, mais de 7,7 bilhões de pessoas geraram cerca de 585 milhões de toneladas de resíduos plásticos em todo o mundo (BENSON *et al.*, 2021).

Os polímeros são obtidos na indústria petroquímica, que deriva seus requisitos de energia e suas matérias-primas do petróleo, tornando a produção dos polímeros um grande emissor de GEE e também altamente dependente de combustíveis fósseis (BENNETT, 2012). Plásticos comumente usados como: polietileno (PE), polietileno de baixa densidade (PEBD) e polietileno de alta densidade (PEAD), produzem dois gases de efeito estufa, metano e etileno, quando são expostos à radiação solar do ambiente por tempo prolongado, isto mostra que os plásticos representam uma fonte anteriormente não reconhecida de gases residuais relevantes para as mudanças climáticas (ROYER *et al.*, 2018).

Para combater o impacto dos plásticos nas mudanças climáticas, assim como nos ecossistemas marinhos e terrestres, práticas sustentáveis e novas tecnologias, sob o conceito deecoinovações se vem desenvolvendo e implementando em tudo o mundo com o objetivo de controlar e reduzir os resíduos poliméricos e principalmente os plásticos. Governos, empresas e instituições acadêmicas estão fazendo grandes esforços para encontrar uma solução viável para as problemáticas geradas pelos plásticos sintéticos (MOSHOD *et al.*, 2022a).

Na busca por compreender a influência da inovação tecnológica na indústria dos plásticos, este artigo tem por objetivo apresentar a evolução da indústria dos plásticos, assim como identificar ecoinovações que foram desenvolvidas no setor para aliviar seus efeitos prejudiciais ao meio ambiente, por meio de uma revisão de literatura que contribuía para o mapeamento do estado da arte sobre o tema.

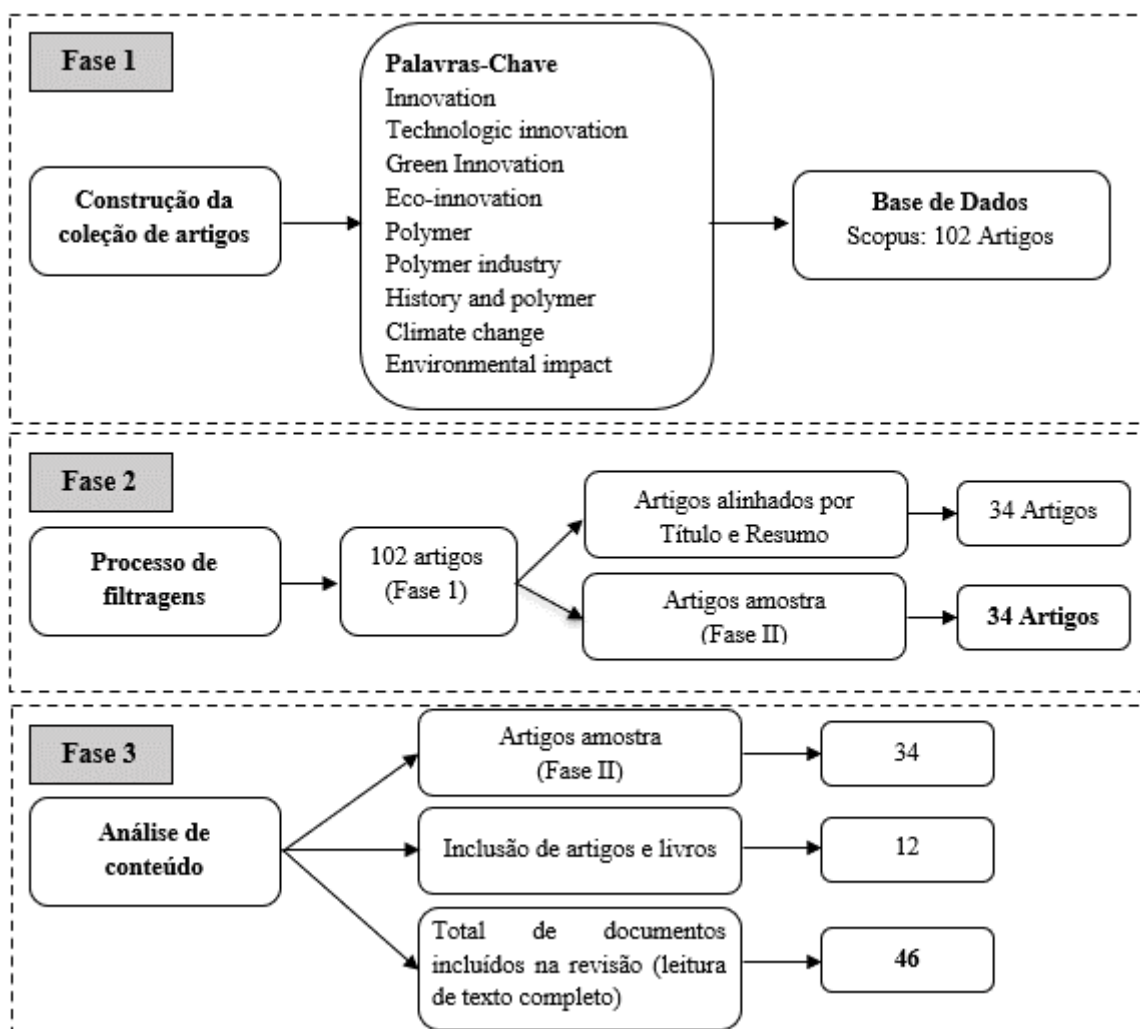
Este artigo está estruturado da seguinte forma: na seção 2, é apresentada a metodologia da pesquisa. A seção 3 fornece um histórico do desenvolvimento tecnológico dos materiais poliméricos. Na seção 4 são apresentados os impactos ambientais ocasionados pelos plásticos.

Uma visão geral sobre vários tipos de ecoinovações no setor de polímeros são apresentadas na seção 5. Finalmente, na seção 6, são apresentadas as conclusões relevantes.

2. MÉTODO DE PESQUISA

Para o processo metodológico desta revisão de literatura, foi utilizado o método SYSMAP (*Scientometric and sYStematic yielding MApping Process*), proposta por Vaz e Uriona (2017). O modelo SYSMAP tem por objetivo apresentar de uma forma estruturada os principais processos para realização de uma revisão de literatura, através da combinação da análise cientométrica e análise de conteúdo. O modelo é composto por 5 fases: (1) construção da coleção de artigos, (2) processo de filtragens, (3) análise bibliométrica, (4) análise de conteúdo e, (5) construção de oportunidades/lacunas de pesquisa (VAZ; URIONA, 2017). A Figura 1 apresenta as fases da metodologia seguidas nesta pesquisa e que são descritas mais detalhadamente nas seguintes subseções.

Figura 1 - Processo de seleção de artigos



Fonte: Os autores.

Neste artigo, só foram aplicadas 3 fases (construção da coleção de artigos, processo de filtragens e análise de conteúdo), deixando fora a fase de análise bibliométrica e construção de oportunidades.

2.1. Construção da coleção de artigos

As palavras-chave de busca selecionadas foram: “*Innovation*”, “*Technologic innovation*”, “*Green Innovation*”, “*Eco-innovation*”, “*Polymer*”, “*Polymer industry*”, “*History*”, “*Climate change*”, “*Environmental impact*”. Para relacioná-los utilizou-se os conectores lógicos AND e OR, e foram realizadas 3 buscas conforme Quadro 1. Outros critérios de seleção foram: (i) o tipo de documento, neste caso foram selecionados apenas os artigos e revisões de literatura publicados em periódicos revisados por pares, (ii) onde pesquisar os termos de busca, neste caso se selecionou: nos títulos, nos resumos e nas palavras-chaves dos artigos.

Quadro 1 - Termos de busca da pesquisa

Busca 1	Innovation	AND	Polymer	AND	Climate change
	OR		OR		OR
	Technologic innovation		Polymer industry		Environmental impact
Busca 2	Eco-innovation	AND	AND	AND	Polymer
	OR				OR
	Green Innovation				Polymer industry
Busca 3	Polymer	AND	AND	AND	History
	OR				
	Polymer industry				

Fonte: Os autores.

2.2. Processo de filtragens

A filtragem foi realizada em duas etapas. Primeiramente, selecionaram-se 102 artigos da base de dados *Scopus* de acordo as combinações propostas no Quadro 1. A segunda etapa da filtragem compreendeu a leitura dos títulos e resumos dos artigos, de modo a descartar as publicações que não abordam diretamente o assunto da pesquisa. Esse processo resultou na exclusão de 68 artigos, culminando em um total de 34 publicações incluídas para a análise de conteúdo.

2.3. Análise de conteúdo

Nesta fase da pesquisa, uma seleção de literatura composta por 12 documentos, incluindo livros e artigos, foi incorporada para ampliar e aprimorar ainda mais o estudo. Posteriormente foi realizada a leitura e análises completa dos 46 documentos selecionados para extrair a informação necessária para cumprir o objetivo da pesquisa. Por meio do processo de análise, foi possível apresentar um histórico da evolução dos polímeros ao longo dos anos, os principais impactos no meio ambiente e as práticas sustentáveis mais representativas empregadas na indústria de plásticos. A apresentação dos resultados será discutida nas seções 3, 4 e 5.

3. INOVAÇÃO TECNOLÓGICA: HISTÓRIA E EVOLUÇÃO DOS POLÍMEROS

No século XX grande parte das mudanças tecnológicas realizadas pelo homem se deve ao surgimento dos polímeros como material alternativo. Assim, borrachas sintéticas, plásticos e fibras sintéticas revolucionaram o desenvolvimento dos setores automotivos, eletroeletrônicos, têxteis, de embalagens, da medicina, etc (HAGE, 1998). O conceito de polímeros surgiu na década de 1920 em meio a polêmicas prolongadas e sua aceitação está intimamente associada ao nome de Hermann Staudinger que recebeu o Prêmio Nobel em 1953

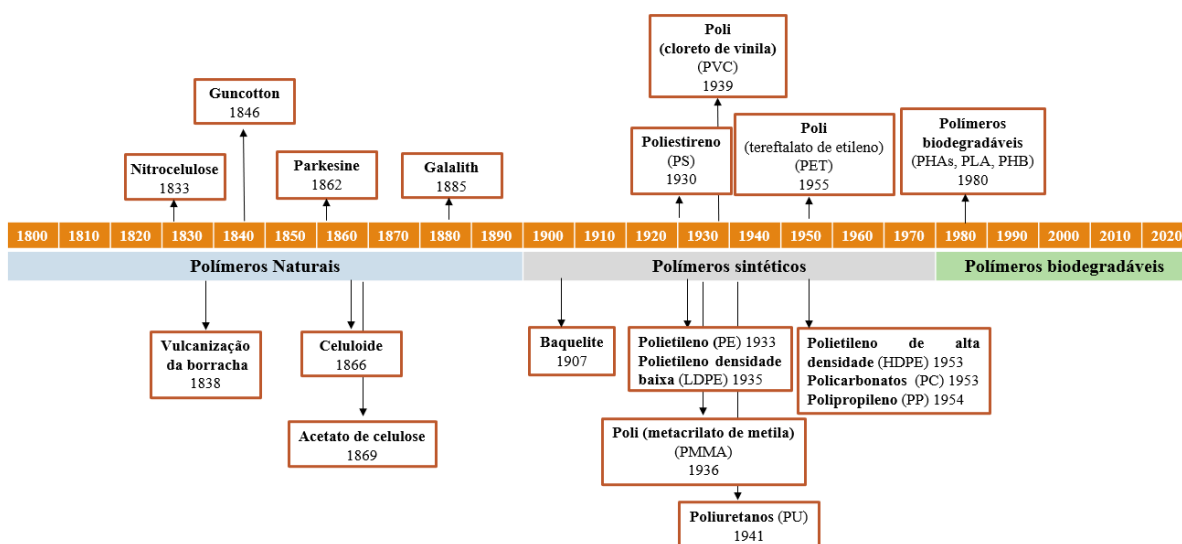
(FELDMAN, 2008). Os polímeros são compostos químicos utilizados na produção comercial de plásticos, elastômeros, fibras artificiais, adesivos e revestimentos de superfície (MARK, 1976). No caso dos polímeros plásticos, estes se dividem entre os que são solúveis em solventes seletivos e podem ser amolecidos reversivelmente pelo calor (termoplásticos) e os que formam redes tridimensionais que não são solúveis e não podem ser amolecidos pelo calor sem decomposição (termofixos) (MARK, 1976). Com base em considerações econômicas e de aplicação, os materiais plásticos podem ser divididos em *commodities* (caracterizados por alto volume e baixo custo) e plásticos de engenharia (maior custo e baixo volume). No primeiro grupo são considerados polietileno (PE), polipropileno (PP), Poli (tereftalato de etileno) (PET), Poli (cloreto de vinila) (PVC) e no segundo Policarbonato (PC), Poli(eteretercetona) (PEEK) e Poliamida (PA) (FELDMAN, 2008).

O rápido crescimento da ciência dos polímeros e de suas aplicações foi devido ao resultado de extensas pesquisas no meio acadêmico e laboratórios industriais que deram origem à os novos polímeros (UTHACKI, 1995). A ciência dos polímeros é reconhecida hoje como um dos ramos mais ativos em pesquisa básica e aplicada, desenvolvendo novas tecnologias e novos produtos úteis com ampla gama de aplicações (SALGADO; PALACIOS, 2021). Nesse contexto, os próximos tópicos apresentam a evolução tecnológica dos materiais poliméricos e a Figura 2 mostra a trajetória tecnológica dos materiais poliméricos proposta pelos autores a partir das publicações revisadas.

3.1 História Primitiva (Polímeros Naturais)

A partir das primeiras décadas do século XIX, vários materiais poliméricos de origem natural foram descobertos, conforme ilustrado na Figura 2. Sua descoberta teve um profundo impacto social e econômico na época (RASMUSSEN, 2018). Os polímeros naturais quanto os naturais quimicamente modificados, começaram a ser amplamente utilizados, pois ofereciam uma alternativa nova e útil para aplicações como têxteis, plásticos, borracha, tintas e adesivos (SALGADO; PALACIOS, 2021).

Figura 2 – Trajetória tecnológica dos materiais poliméricos



Fonte: Os autores.

O primeiro destes polímeros foi a nitrocelulose, obtida pelo químico francês Henri Braconnot no 1833, ele fez reagir o ácido nítrico, de forma muito simples, sobre amido e

algodão e obteve um material incolor que parece como vidro branco, insensível à água e facilmente inflamável (MICHEL, 2006). O início da indústria de polímeros ocorreu com o domínio da tecnologia de vulcanização da borracha natural, desenvolvida pelo inventor americano Charles Goodyear no 1838, este material já era utilizado em determinadas aplicações, mas suas características pegajosas com o aumento de temperatura e a inexistência do processo de vulcanização, limitavam em muito seu uso até então (HAGE, 1998). No 1846 o químico suíço Christian Schönbein, descobriu que a reação da mistura ácido nítrico/ácido sulfúrico no algodão o transformava em um novo material “*guncotton*”, o algodão para armas não só tinha mais poder explosivo do que a pólvora, como também emitia muito menos fumaça, pelo que seu principal uso foi para a guerra (RASMUSSEN, 2018; MICHEL, 2006).

A adição de óleo de rícino e cânfora à nitrocelulose (descoberta por Braconnot), levou em 1862 a Alexander Parkes, um inventor inglês a descobrir o primeiro termoplástico ao que ele chamou de *parkesine*. Em 1866 John Wesley Hyatt tomou só nitrocelulose e cânfora e melhorou as propriedades do material descoberto pelo Parkes (*parkesine*) e este novo material foi conhecido como celuloide (BOWER, 2002). O acetato de celulose foi descoberto em 1869 por o químico alemão Paul Schutzenberger, ao combinar celulose e ácido acético. A ligação cruzada de caseína por formaldeído em 1885 resultou numa patente de Kraitsir e Spitteler para o que mais tarde ficou conhecido como Galalith, um material semelhante a um chifre bastante bem sucedido como uma imitação de marfim e porcelana (UTHACKI, 1995).

3.2. Polímeros Sintéticos (Plásticos comerciais)

O primeiro plástico totalmente sintético foi a *baquelite*, para a qual as primeiras patentes foram registradas por Leo Baekeland em 1907. Este material é obtido da reação do fenol, produto da destilação do alcatrão e formaldeído, que é usado no fluido de embalsamamento (FELDMAN, 2008). Os primeiros polímeros sintéticos que surgiram depois da baquelite foram desenvolvidos durante o período entre guerras. A primeira fabricação comercial de poliestireno (PS) ocorreu na Alemanha em 1930, a primeira folha comercial de poli (metacrilato de metila) (PMMA), foi produzido pela ICI em 1936 e a primeira planta comercial de polietileno (PE) iniciou a produção pouco antes do início da Segunda Guerra Mundial. O poli (cloreto de vinila), ou PVC, em 1939 começa a ser produzido em grandes quantidades na Alemanha e nos EUA. Os anos 1939-41 trouxeram importantes estudos de poliésteres por Whinfield e Dickson e levou ao desenvolvimento do poli (tereftalato de etileno) (PET) a produção grande escala deste importantíssimo polímero começou em 1955. Os poliuretanos (PU), são produzidos por um tipo de polimerização relacionado com a polimerização por condensação e em 1941 eles estavam sendo produzidos comercialmente na Alemanha, levando à produção de espumas de poliuretano (BOWER, 2002).

O ano de 1954 viu a primeira polimerização bem-sucedida de propileno (PP) para produzir um polímero sólido útil com uma massa molar elevada e em 1962 o polipropileno estava sendo fabricado em grande volume. Outra importante classe de polímeros desenvolvida nestes anos foi a policarbonatos (PC). O policarbonato termoplástico linear não foi feito até 1953 e colocado em produção comercial em 1960. Os policarbonatos são materiais de engenharia resistentes que resistirão a uma ampla faixa de temperaturas (BOWER, 2002).

Durante a segunda metade do século XX grande parte das mudanças tecnológicas realizadas pelo homem se deveram ao surgimento dos polímeros mencionados anteriormente como materiais alternativos, devido a revolução que causaram em alguns setores como automotivo, eletroeletrônicos, têxteis, de embalagens, medicina, etc. (HAGE, 1998).

3.3 Polímeros Biodegradáveis

Devido à crescente preocupação com o aumento da quantidade de resíduos de polímeros após sua utilização, na década de 1980 foram introduzidos pela primeira vez os polímeros e plásticos biodegradáveis. Os polímeros biodegradáveis são suscetíveis à degradação por atividades biológicas, acompanhada de diminuição de sua massa molar (VROMAN; TIGHZERT, 2009). Existem duas fontes dos polímeros biodegradáveis, os polímeros sintéticos e os polímeros naturais. Os polímeros biodegradáveis naturais (e.g. poli (ácido láctico) PLA), estão disponíveis em grandes quantidades a partir de fontes renováveis como amido, celulose, proteína, enquanto os polímeros biodegradáveis sintéticos (e.g. poli(butileno adipato-co-tereftalato) PBAT), são produzidos a partir de recursos petrolíferos não renováveis (WANG, 2022).

4. IMPACTOS DOS PLÁSTICOS NO MEIO AMBIENTE

Anualmente, são produzidas aproximadamente 400 milhões de toneladas de plástico, com características como custo baixo, robustez, leveza e flexibilidade. Essas características permitiram, aos plásticos penetrar todos os aspectos da vida cotidiana, desde roupas até revestimentos e desde veículos de transporte até produtos de limpeza (BOUCHER; FRIOT, 2017). No entanto, o multíuso, as más práticas e a má gestão dos resíduos relacionados ao plástico vêm ocasionando efeitos no fenômeno de mudanças climáticas, além de uma crise global de poluição plástica (MEJJAD *et al.*, 2023).

Apesar da conveniência inegável que os plásticos têm conferido às nossas rotinas diárias, seus impactos ambientais em termos de esgotamento de combustíveis fósseis, contribuição para o aquecimento global e mudanças climáticas, assim como a poluição marinha representam um desafio substancial para a indústria de plásticos atualmente (KARAYILAN *et al.*, 2021). Quando são jogados ao meio ambiente, os plásticos são expostos a intempérie e degradação, que podem ser atribuídos a vários fatores ambientais, incluindo luz, calor, umidade, oxidação química e atividade biológica. Esses fatores são responsáveis por instigar alterações na composição física e química da estrutura do polímero (GEWERT *et al.*, 2015). Os processos de degradação afetam a integridade química do plástico, Royer *et al.* (2018) em seu estudo sugerem que os plásticos representam uma fonte anteriormente não reconhecida de gases residuais relevantes para as mudanças climáticas, que devem aumentar à medida que mais plástico é produzido e acumulado no meio ambiente.

Juntamente com as mudanças climáticas, existe a poluição plástica como principal fonte de perigo para os ecossistemas marinhos e terrestres de nosso planeta. O problema do acúmulo de plásticos tem crescido de forma alarmante, o que tem forçado a os governos a controlar e proibir o uso de alguns plásticos (SALGADO; PALACIOS, 2021). Os resíduos plásticos podem ser encontrados em duas formas: grandes resíduos de plástico e pequenas partículas de plástico com menos de 5 mm de tamanho, denominadas microplásticos (BOUCHER; FRIOT, 2017). Os detritos plásticos, incluindo microplásticos, são agora reconhecidos como poluentes emergentes e representam um risco significativo para a biodiversidade marinha em todo o mundo. Devido ao seu pequeno tamanho, os microplásticos podem ser ingeridos por uma ampla variedade de organismos marinhos, o que pode causar danos a esses organismos. Quando consideramos que muitos organismos marinhos são relevantes para a indústria pesqueira (e.g. mexilhões, ostras e peixes) e que estes podem ingerir microplásticos, é lógico levantar a hipótese de riscos potenciais para a saúde humana (GUZZETTI *et al.*, 2018).

Os problemas atuais das mudanças climáticas exigem novas formas radicais de viver, produzir e consumir. Atualmente a indústria de plásticos está enfrentando o desafio de contribuir para a luta contra as mudanças climáticas e ao mesmo tempo, a poluição dos resíduos

plásticos (ZUIDERVEEN *et al.*, 2021; CHADHA, 2011). Por esse motivo, é essencial promover a pesquisa científica nessa área e incentivar e promover parcerias e cooperação entre instituições acadêmicas, públicas e privadas para abordar o impacto dos resíduos plásticos no crescimento sustentável nos setores ambiental e socioeconômico (MEJJAD *et al.*, 2023). A adoção de práticas sustentáveis e o emprego de novos materiais mais sustentáveis na indústria dos polímeros permitiram reduzir o consumo de recursos naturais e diminuir a produção de resíduos, além de mitigar os impactos das mudanças climáticas e problemas relacionados (ZUIDERVEEN *et al.*, 2021).

5. ECOINOVAÇÃO OU INOVAÇÃO VERDE

A ecoinovação ou inovação verde é o processo de desenvolver novos produtos ou melhorar os existentes de uma forma ambientalmente sustentável (VLAD-BUBULAC, 2022). Envolve a atualização da tecnologia de produção para obter economia de energia e redução de emissões. A ecoinovação se apresenta como uma solução fundamental para os problemas ambientais e as mudanças climáticas (LIN; CHEN, 2022). As empresas estão adotando cada vez mais práticas de ecoinovação devido à pressão de várias fontes, como governo, clientes e concorrentes (SAXE *et al.*, 2022; KESIDOU; DEMIREL, 2012). A continuação será apresentada as principais práticas ecoinovadoras que foram reportadas nas pesquisas, que são consideradas eficazes na mitigação do impacto ambiental dos resíduos plásticos.

5.1. Reciclagem de plásticos

A reciclagem de plásticos tornou-se uma prioridade para as entidades governamentais e para a indústria já que esta permite obter novamente um material que pode ser implementado como matéria-prima para a produção do mesmo produto ou de novos produtos (JUAN *et al.*, 2021). Esta prática procura coordenar uma gestão eficiente dos resíduos plásticos gerados após a sua vida útil e a sua reutilização (MADINA; ENDRES, 2021; CRUZ SANCHEZ *et al.*, 2020; WAGNER *et al.*, 2019). A reciclagem contribui para a circularidade dos plásticos, o que significa que todas elas visa reduzir o desperdício e promover o uso eficiente dos recursos (KARAYILAN *et al.*, 2021, ROBAINA *et al.*, 2020). Existem três processos para a reciclagem de plástico, a saber, processos mecânicos, químicos e energéticos. É amplamente reconhecido que a reciclagem mecânica é abordagem mais comumente empregada e é aplicada em grande escala (AL-SALEM *et al.*, 2009). A reciclagem mecânica inclui o tratamento físico para reprocessar resíduos plásticos em novos produtos, onde envolve tecnologias para triagem/separação, descontaminação, redução de tamanho, refusão e produção (SINGH *et al.*, 2017).

Para atingir as metas estabelecidas pelo Pacto de Plásticos dos EUA e pela União Europeia de alcançar uma taxa de reciclagem ou compostagem de embalagens plásticas de 50% até o ano de 2025, é crucial implementar práticas inovadoras na esfera da reciclagem (UEKERT *et al.*, 2023). As tecnologias de reciclagem de circuito fechado são um dos vários caminhos em direção a uma economia circular para plásticos. Foi relatado que os humanos são irracionais ao reciclar, especialmente se o objeto estiver distorcido (VASSALLO *et al.*, 2023). A reciclagem deve ser considerada como um tipo de ecoinovação impulsionada pelo mercado que exige uma mudança de paradigma em termos sustentabilidade de produtos e processos (CORREA *et al.* (2019).

5.2. Wood–Plastic Composites (WPCs)

As incertezas das mudanças climáticas e da transição energética estão causando um aumento nos riscos de poluição ambiental. Isso levou à necessidade de novos materiais que possam ser derivados de fontes orgânicas, o que abriu novos caminhos para pesquisa e inovação (ADEKOMAYA *et al.*, 2023). Uma das alternativas ecoinovadoras que têm sido propostas para o aproveitamento tanto de resíduos não biodegradáveis (plásticos reciclados: PE, PP, PVC ou PET) como de resíduos biodegradáveis (resíduos vegetais) é a produção de *wood–plastic composites* (WPCs) (YANG *et al.*, 2020; NOURBAKHSI; ASHORI, 2009). Os WPCs combinam as vantagens das fibras naturais e dos materiais plásticos, tornando-os duráveis e resistentes ao desgaste, sendo uma alternativa à madeira maciça em muitas áreas da engenharia (ELAMIN *et al.*, 2020; LÓPEZ; ROJAS, 2018; BHASKAR *et al.*, 2021). Em seu estudo Najafi *et al.* (2006) descobriram que as propriedades mecânicas dos WPCs feitos com plásticos PEAD e PP reciclados mantinham quase as mesmas propriedades mecânicas dos compósitos feitos com PEAD e PP virgem, esses resultados foram um forte impulso para expandir a ideia de usar plásticos reciclados na fabricação de WPCs, com este cenário a utilização de resíduos plásticos e resíduos de madeira apresenta uma perspectiva promissora para a diminuição da poluição dos resíduos plásticos.

Os materiais compósitos madeira-plástico se apresentam com um grande potencial para contribuir no problema da poluição dos plásticos (TURKU *et al.*, 2018). O desenvolvimento dos WPCs, geraram novos produtos inovadores para diversas aplicações, como decoração de residências, indústria automotiva e construção civil (GURUNATHAN *et al.*, 2015). O uso de WPC pode ajudar a reduzir o impacto ambiental dos produtos tradicionais de madeira, utilizando resíduos de madeira e reduzindo a necessidade de materiais plásticos virgens. Por esse motivo, os WPCs se apresentam como produtos ecoinovadores devido a que representam a solução a utilização de resíduos plásticos ou de material plástico reciclado como matriz polimérica termoplástica para a fabricação desses compostos contribuem para a eficiência de recursos (OSBURG *et al.*, 2016; TEUBER *et al.*, 2016). Os resíduos plásticos são os principais resíduos sólidos urbanos do mundo, por isso, esses resíduos representam uma fonte de matéria-prima muito promissora para a fabricação de WPCs devido ao seu grande volume e seu baixo custo, abrindo possibilidades para novas ofertas de mercado e contribuindo de forma muito positiva para a poluição causada por este resíduo plástico (CUI *et al.*, 2008).

5.3. Bioplásticos e Plásticos biodegradáveis

Os bioplásticos são os plásticos produzidos a partir de recursos renováveis que na maioria dos casos são resíduos orgânicos e só requerem água, calor e aeração para degradar-se em menos de 180 dias (ROSENBOOM *et al.*, 2022). Os bioplásticos são os polímeros que tem recebido mais atenção mundial ultimamente (ROSENBOOM *et al.*, 2022; DIETRICH *et al.*, 2017; NAIR *et al.*, 2016; DI GREGORIO, 2009), já que se consideram com potencial de substituir os plásticos sintéticos em uma variedade de produtos de consumo massivo, como materiais de embalagem, sacos de coleta de lixo e envases para alimentos entre outras aplicações. O bioplástico de fibra de celulose é fabricado a partir de celulose que é um polímero natural encontrado nas paredes celulares das plantas, isso por sua vez é o composto orgânico mais abundante na Terra (MOTAUNG, 2020). Outro exemplo de bioplásticos é o ácido polilático (PLA), sendo um polímero obtido a partir do amido produzido por plantas agrícolas (e.g. batata, milho, trigo e arroz), apresenta uma degradação primeiro por hidrólise nas ligações que o polímero possui e posteriormente biodegradação por enzimas (NAIR *et al.*, 2016; VROMAN; TIGHZERT, 2009). De acordo a Chadha (2011) a tecnologia dos bioplásticos se assemelha a uma ecoinovação radical, devido a sua matéria-prima diferente, eles são

significativamente diferentes de inovações anteriores ou atuais na indústria dos polímeros, como melhorias de processo em plásticos à base de petróleo.

Os plásticos biodegradáveis são aqueles produzidos a partir de recursos renováveis (plantas ou bactérias) ou também podem ser de origem fóssil (HAVSTAD, 2020; CHADHA, 2011). Todos os plásticos biodegradáveis têm uma coisa em comum: eles podem se desintegrar em produtos inofensivos dentro de um intervalo de tempo específico no final de seu ciclo de vida. A degradação pode ocorrer no solo, água, instalação de digestão anaeróbica ou de compostagem, dependendo da aplicação alvo (MOSHOOB *et al.*, 2022b). Os polímeros biodegradáveis se apresentam como a origem de uma nova e enorme indústria polimérica (WANG, 2022). Um dos principais plástico biodegradáveis são os polihidroxialcanoatos (PHAs), estes são poliésteres produzidos microbiologicamente que combinam alta funcionalidade (propriedades mecânicas e físicas ajustáveis) com baixo impacto ambiental (biodegradabilidade e não toxicidade), tornando-os candidatos promissores para a produção sustentável de polímeros (KOLLER *et al.*, 2010). Suas propriedades variam de termoplásticos quebradiços a elastômeros gomosos e podem ser controladas pela escolha do substrato, bactérias e condições de fermentação. Com flexibilidade em suas propriedades, os PHAs podem potencialmente substituir o polipropileno, o polietileno e o poliestireno, que são os três principais plásticos do mercado mundial de polímeros (LEE, 1996).

Os bioplásticos e os plásticos biodegradáveis, como polihidroxialcanoatos (PHAs), podem reduzir a poluição causada pela crescente demanda global por polímeros. Embora a produção industrial de estes materiais tenha crescido rapidamente nos últimos anos, sua participação no mercado total ainda é marginal devido a seu preço mais alto que os polímeros tradicionais, causado principalmente pelos altos custos de produção (DIETRICH *et al.*, 2017). Vale ressaltar que muitos polímeros biodegradáveis, são difíceis de serem processados ou mesmo não adequados para aplicações práticas, principalmente devido à sua fácil degradação térmica ou rápida deterioração do desempenho mecânico antes do uso. Essas propriedades inferiores são as principais barreiras para suas aplicações econômicas (WANG, 2022).

6. CONCLUSÕES

Materiais poliméricos, particularmente plásticos, foram desenvolvidos com a intenção de simplificar nosso modo de vida. Apesar de sua necessidade em várias atividades diárias, é crucial reconhecer que eles se tornaram uma fonte significativa de contaminação ambiental global, colocando em risco a biodiversidade dos ecossistemas marinhos e terrestres e representando uma ameaça potencial à saúde humana no futuro. Portanto, é responsabilidade dos humanos gerenciar o consumo dos plásticos a fim de mitigar seu impacto no fenômeno das mudanças climáticas, ao mesmo tempo em que trabalha para a mitigação de resíduos plásticos que têm o potencial de contribuir para a questão da poluição por plástico.

A implementação de práticas e produtos ecoinovadores na indústria dos plásticos pode ajudar a reduzir as emissões de gases de efeito estufa ao reduzir o uso de combustíveis fósseis na produção de plásticos tradicionais à base de petróleo. Portanto, o desenvolvimento de produtos ecoinovadores como os bioplásticos representam os primeiros passos em direção a um setor de plásticos sustentável.

Atualmente, apenas alguns bioplásticos e plásticos biodegradáveis desenvolvidos são de importância comercial. O principal fator que contribui para isso é o preço atual, que, quando comparado aos plásticos de origem fóssil, ainda não é competitivo, além de suas propriedades físicas inferiores. No entanto, o potencial para o progresso futuro desses materiais é promissor, pois eles oferecem oportunidades para aumentar a eficiência dos recursos e adotar uma abordagem mais sustentável do setor dos plásticos.

REFERÊNCIAS

- ADEKOMAYA, O.; MAJOZI, T. Comparative advantages and application of polymer-based materials: Prioritizing natural fibres as reinforcement in building structures. **Engineering and Applied Science Research**, v. 50, n. 1, p. 47-54, 2023. <https://doi.org/10.14456/easr.2023.6>
- AL-SALEM, S.; LETTIERI, P.; BAEYENS, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): a review. **Waste Manag**, v. 29, p. 2625-2643, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>.
- BENNETT, S.J. Implications of Climate Change for the Petrochemical Industry: Mitigation Measures and Feedstock Transitions. In: **Handbook of Climate Change Mitigation**. (eds). Chen, WY., Seiner, J., Suzuki, T., Lackner, M. Springer, New York, NY. 2012. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7991-9_10
- BHASKAR, K. et al. Analysis on mechanical properties of wood plastic composite. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, p. 5886–5891, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.08.570>
- BENSON, N. U.; BASSEY, D. E.; PALANISAMI, T. COVID pollution: impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint. **Heliyon**, v.7 n.2, e06343, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E06343>
- BOUCHER, J.; FRIOT, D. Primary Microplastics in the oceans: a global evaluation of sources. **IUCN, Gland, Switzerland**. 2017. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2017.01>
- BOWER, D. An Introduction to Polymer Physics. Cambridge: Cambridge University Press. 2002. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511801280>
- CHADHA, A. Overcoming Competence Lock-In for the Development of Radical Eco-Innovations: The Case of Biopolymer Technology. **Industry and Innovation**, v.18, n.03, p. 335-350, 2011. <https://doi.org/10.1080/13662716.2011.561032>
- CORREA, C. A.; RIBEIRO, C.; LECLERC, A. Green-PVC with full recycled industrial waste and renewably sourced content. **Journal of Cleaner Production**, v. 229, p. 1397-1411, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.383>.
- CRUZ SANCHEZ, F. A. et al. Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 264, 121602, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121602>
- CUI, Y. et al. Fabrication and interfacial modification of wood/recycled plastic composite materials. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 39, n. 4, p. 655–661, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.10.017>
- DIETRICH, K. et al. Producing PHAs in the bioeconomy — Towards a sustainable bioplastic, **Sustainable Production and Consumption**, v. 9, p. 58-70, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.09.001>
- DI GREGORIO, B. E. Biobased performance bioplastic: Mirel. **Chemistry & Biology**. v. 16, p. 1–2, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chembiol.2009.01.001>
- DURÁN-ROMERO, G. et al. Bridging the gap between circular economy and climate change mitigation policies through eco-innovations and quintuple helix model. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 160, 120246, 2020. <http://doi:10.1016/j.techfore.2020.120246>
- ELAMIN, M. A. M. et al. Preparation and characterization of wood-plastic composite by

- utilizing a hybrid compatibilizer system. **Industrial Crops and Products**, v. 154, 112659, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2020.112659>
- EVODE, N. et al. Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 4, 100142, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2021.100142>
- FELDMAN, D. Polymer History. **Designed Monomers and Polymers**, v. 11, n. 1, p. 1-15, 2008. <https://doi.org/10.1163/156855508X292383>
- GEWERT, B.; PLASSMANN, M.; MACLEOD M. Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. **Environ Sci Process Impacts. Royal Society of Chemistry**, v. 17, 1513, 2015. <https://doi.org/10.1039/c5em00207a>
- GURUNATHAN, T.; MOHANTY, S.; NAYAK, S. K. A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 77, p. 1–25, 2015. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2015.06.007>
- GUZZETTI, E. et al. Microplastic in marine organism: Environmental and toxicological effects. **Environ Toxicol Pharmacol**, v. 64, p. 164-171, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2018.10.009>
- HAGE JR., E.. Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros. **Polímeros**, v. 8, n. 2, p. 6–9, 1998.
- HAVSTAD, M. R. Biodegradable plastics. **Plastic Waste and Recycling**, p. 97–129, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00005-0>
- JUAN, R. et al. Quantification of PP contamination in recycled PE by TREF analysis for improved the quality and circularity of plastics. **Polymer Testing**, v. 100, 107273, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.POLYMERTESTING.2021.107273>
- KARAYILAN, S. et al. Prospective evaluation of circular economy practices within plastic packaging value chain through optimization of life cycle impacts and circularity. **Resources, Conservation and Recycling**, v.173, 105691, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105691>.
- KESIDOU, E.; DEMIREL, P. On the drivers of eco-innovations: Empirical evidence from the UK. **Research Policy**, v. 41, n. 5, p. 862-870, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.01.005>
- KOLLER, M. et al. Modern biotechnological polymer synthesis: A review. **Food Technol. Biotechnol.** v. 48, n. 3, p. 255–269, 2010. <http://www.ftb.com.hr/images/pdfarticles/2010/July-September/48-255.pdf>.
- LEE, S.Y. Plastic bacteria? Progress and prospects for polyhydroxyalkanoate production in bacteria. **Trends Biotechnol**, v. 14, n. 11, p. 431–438, 1996. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-7799\(96\)10061-5](http://dx.doi.org/10.1016/0167-7799(96)10061-5)
- LIN, T.; CHEN, Z. Does market integration promote green technology innovation? evidence from China. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, 2022. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1097616>
- LÓPEZ, D. F.; ROJAS, A. F. Factores que infl uencian las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de materiales compuestos madero plásticos. **Entre Ciencia e Ingeniería**, v. 12, n. 23, p. 93-102, 2018. <http://dx.doi.org/10.31908/19098367.3708>

- MADINA, S.; ENDRES, H. J. Plastics in the context of the circular economy and sustainable plastics recycling: Comprehensive review on research development, standardization and market. **Composites Part C: Open Access**, v. 6, 100168, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666682021000633>
- MARK, H. F. Polymer Chemistry: The Past 100 Years. **Chemical and Engineering News**, v. 54, n. 15, p. 176-189, 1976. <https://doi.org/10.1021/cen-v054n015.p176>
- MEJJAD, N. et al. Marine plastic pollution in Morocco: state of the knowledge on origin, occurrence, fate, and management. **Environ Sci Pollut Res**, (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26973-8>
- MICHEL, J. M. Histoire industrielle des polymères. **L'actualité Chimique**, n. 300, p. 7-15, 2006.
- MOSHOOOD, T.D. et al. Green product innovation: A means towards achieving global sustainable product within biodegradable plastic industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 363, 132506, 2022a. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132506>
- MOSHOOOD, T.D. et al. Sustainability of biodegradable plastics: new problem or solution to solve the global plastic pollution? **Curr. Res. Green. Sustain. Chem.**, 100273, 2022b. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100273>
- MOTAUNG, T.E. Recent applications and innovations of cellulose based materials: A critical review. **Cellul. Chem. Technol.** v. 55, p. 1-12, 2021. <https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2021.55.01>
- NAIR, N.; SEKHAR, V.; NAMPOOTHIRI, K. Augmentation of a Microbial Consortium for Enhanced Polylactide (PLA) Degradation. **Indian J Microbiol.** v. 56, n. 1, p. 59-63, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12088-015-0559-z>
- NAJAFI, S. K.; HAMIDINIA, E.; TAJVIDI, M. Mechanical properties of composites from sawdust and recycled plastics. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 100, n. 5, p. 3641-3645, 2006. <https://doi.org/10.1002/app.23159>
- NAMAZI, H. Polymers in our daily life. **Bioimpacts**. v. 7, n. 2, p. 73-74, 2017. <https://doi.org/10.15171/bi.2017.09>
- NOURBAKHSI, A.; ASHORI, A. Preparation and properties of wood plastic composites made of recycled high-density polyethylene. **Journal of Composite Materials**, v. 43, n. 8, p. 877-883, 2009. <https://doi.org/10.1177/0021998309103089>
- OSBURG, V.; STRACK, M.; TOPOROWSKI, W. Consumer acceptance of Wood-Polymer Composites: a conjoint analytical approach with a focus on innovative and environmentally concerned consumers. **Journal of Cleaner Production**, v. 110, p. 180-190, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.086>
- RASMUSSEN, S. C. Revisiting the Early History of Synthetic Polymers: Critiques and New Insights. **Ambix**, v.65, n. 4, p. 356-372, 2018. <https://doi.org/10.1080/00026980.2018.1512775>
- ROBAINA, M. et al. Circular economy in plastic waste - Efficiency analysis of European countries. **Science of The Total Environment**, v. 730, 139038, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139038>
- ROYER, S. J. et al. Production of methane and ethylene from plastic in the environment. **PLoS ONE**, v. 13, n. 8, e0200574, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200574>
- ROSENBOOM, J. G.; LANGER, R.; TRAVERSO, G. Bioplastics for a circular economy. **Nat**

- Rev Mater**, v. 7, p. 117–137, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>
- SALGADO, D.; PALACIOS, J. Cien Años de Química Macromolecular. **Educación Química**, v. 32, n. 1, p. 20-30, 2021. <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2021.1.76662>
- SAXE, J. K.; HOFFMAN, L.; LABIB, R. Method to incorporate green chemistry principles in early-stage product design for sustainability: case studies with personal care products. **Green Chem.**, v. 24, n. 12, p. 4969-4980, 2022. <http://dx.doi.org/10.1039/D2GC00842D>
- SINGH, N.; HUI, D.; SINGH, R.; AHUJA, I.P.S.; FEO, L.; FRATERNALI, F. Recycling of plastic solid waste: a state of art review and future applications. **Compos. B Eng.** v. 115, p. 409-422, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.013>.
- TEUBER, L. et al. Wood polymer composites and their contribution to cascading utilisation. **J. Clean. Prod.** v. 110, p. 9-15, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.009>
- TURKU, I.; KÄRKI, T.; PUURTINEN, A. Durability of wood plastic composites manufactured from recycled plastic. **Heliyon**, v. 4, n. 3, e00559, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2018.E00559>
- UEKERT, T. et al. Technical, Economic, and Environmental Comparison of Closed-Loop Recycling Technologies for Common Plastics. **Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 11, n. 3, p. 965-978, 2023. <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05497>
- UTRACKI, L. A. History of commercial polymer alloys and blends. **Polym. Eng. Sci.**, v. 35, n. 1, p. 2-17, 1995.
- VASSALLO, L. et al. Reducing Plastic Pollution by Recovery and Recycling: Evidence from a “Blue Economy” Project Impacting Policy-Making in Italy. **Int. J. Environ. Res. Public Health**, v. 20, 5604, 2023. <https://doi.org/10.3390/ijerph20085604>
- VAZ, C. R.; URIONA, M. Revisão de literatura estruturada: proposta do modelo SYSMAP (Scientometric and Systematic Yielding Mapping Process), cap. 2, p. 21-42. IN: VAZ, C. R. URIONA MALDONADO, M. Aplicações de Bibliometria e Análise de Conteúdo em casos da Engenharia de Produção, Florianópolis: UFSC, 2017, 260 p. ISBN: 978-85-61115-15-9.
- VÁZQUEZ, O. A.; RAHMAN, M. S. An ecotoxicological approach to microplastics on terrestrial and aquatic organisms: A systematic review in assessment, monitoring and biological impact. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 84, 103615, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.ETAP.2021.103615>
- VIVEKANAND, A. C.; MOHAPATRA, S.; TYAGI, V. K. Microplastics in aquatic environment: Challenges and perspectives. **Chemosphere**, v. 282, 131151, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.131151>
- VLAD-BUBULAC, T. et al. Fabrication of Poly(vinylalcohol)/Chitosan Composite Films Strengthened with Titanium Dioxide and Polyphosphonate Additives for Packaging Applications. **Gels**, v. 8, 474, 2022. <https://doi.org/10.3390/gels8080474>
- VROMAN, I.; TIGHZERT, L. Biodegradable Polymers. **Materials**, v. 2, p. 307-344, 2009. <https://doi.org/10.3390/ma2020307>
- WAGNER, F. et al. Towards a more circular economy for WEEE plastics – Part A: Development of innovative recycling strategies. **Waste Management**, v. 100, p. 269–277, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.09.026>
- YANG, S.; WEI, B.; WANG, Q. Superior dispersion led excellent performance of wood-plastic composites via solid-state shear milling process. **Composites Part B: Engineering**, v. 200,

108347, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2020.108347>

WANG, X. H. Biodegradable Polymers, History Tells Polymer Science's Fortune. **Chin J Polym Sci**, v. 40, 431–432, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10118-022-2737-x>

ZUIDERVEEN, E. et al. Ex-ante life cycle assessment of polyethylenefuranoate (PEF) from bio-based monomers synthesized via a novel electrochemical process. **Cleaner Environmental Systems**, v. 2, 100036, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100036>