

## Abordagens sustentáveis em nanocompósitos poliméricos reforçados por óxidos metálicos

Filipe Oliveira Vieira<sup>1</sup>  
Dra Lizandra Viana Maurat da Rocha<sup>2</sup>  
Dra Maria Inês Bruno Tavares<sup>3</sup>



10.56238/rcsv14n4-022

### RESUMO

Nanocompósitos poliméricos têm despertado considerável interesse acadêmico e industrial devido às suas propriedades singulares e aplicabilidade em diversas áreas da química, biotecnologia e engenharia de materiais. Suas aplicações variam de acordo com o tipo de polímeros, cargas e método de incorporação que estão sendo utilizados. Porém, muitas de suas matérias primas e formas de obtenção não se fazem sustentáveis. Neste contexto, os nanocompósitos biodegradáveis, os obtidos de fonte renovável e os que incorporam óxidos metálicos produzidos por rota verde emergem como uma alternativa promissora ao reunir propriedades aprimoradas, viabilidade econômica e elevado potencial de contribuir enquanto nova tecnologia para a sociedade, sem comprometer nocivamente recursos ambientais e as gerações futuras. Esta revisão visa analisar estudos que retratam essas formas mais sustentáveis de materiais baseados em polímeros e nanopartículas de óxidos metálicos. Assim, são discutidos, além dos materiais escolhidos por diversos grupos de estudo, os métodos de preparação e as técnicas de caracterização mais relevantes neste contexto. Também são exploradas as principais propriedades e aplicações desses nanocompósitos em diversas áreas, incluindo eletrônica, medicina, métodos de tratamento e purificação de água, revestimentos, catalisadores, sensores, células solares e dispositivos de armazenamento de energia. Por fim, ao abordar as perspectivas futuras e os desafios a serem superados para a ampla adoção desses materiais, conclui-se que os nanocompósitos poliméricos sustentáveis reforçados por óxidos metálicos têm grande potencial em diversas áreas da indústria devido às suas propriedades mecânicas, térmicas e funcionais aprimoradas. No entanto, sua adoção ampla ainda enfrenta desafios significativos, sobretudo relacionados à compatibilidade entre a matriz e o reforço, altos custos de produção, complexidade no processamento e escalonamento, além da urgente necessidade de avaliação dos impactos ambientais e toxicológicos para desenvolver normas e legislações específicas. Superar essas barreiras é possível, mas exigirá contínuos avanços em pesquisa e colaboração entre academia, indústria e órgãos reguladores, ratificando a relevância desta revisão.

**Palavras-chave:** Nanocompósitos, Polímeros, Óxidos Metálicos, Sustentabilidade.

---

<sup>1</sup> UFRJ

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6110-4336>

<sup>2</sup> IMA/UFRJ

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2895-7889>

<sup>3</sup> IMA/UFRJ

ORCID: <https://Orcid.org/0000-0002-9620-0319>

## 1 INTRODUÇÃO

A nanoescala permite a aplicação de propriedades físicas e químicas peculiares, frutos tanto de eventos previstos devido à ampliação da área superficial relativa, com o aumento das possibilidades de interações, quanto dos diferentes processos físicos que atuam sobre sistemas que se aproximam da escala quântica. Tais processos são, na verdade, os mesmos que potencializam a complexidade da vida biológica, com células naturalmente demonstrando processos de altíssima eficiência que só são possíveis devido à escala na qual ocorrem, e justamente por isso, dá-se a corrida laboratorial para mimetizá-los (NASROLLAHZADEH et al., 2019).

Um exemplo de aplicação de altíssima utilidade da nanotecnologia é a produção de nanocompósitos baseados em polímeros, macromoléculas orgânicas compostas por subunidades repetitivas ligadas covalentemente. Esta aplicação envolve a incorporação de materiais em escala nanométrica nas matrizes poliméricas, para melhorar ou conferir novas propriedades aos polímeros, através de métodos diversos como a dispersão de nanopartículas via solução ou fusão polimérica, a criação de redes poliméricas interpenetrantes, eletrofiação e a polimerização in situ (KRISHNAMOORTI; VAIA, 2007; KHAN et al., 2023). Os benefícios da nanotecnologia aplicada a polímeros são variados: as propriedades mecânicas, como resistência à tração, dureza e elasticidade podem ser significativamente melhoradas. As propriedades térmicas, incluindo a estabilidade térmica e a resistência à degradação térmica, também. Além disso, as propriedades elétricas e ópticas dos polímeros podem ser ajustadas, aumentando a condutividade elétrica ou térmica e modificando características ópticas para aplicações em sensores e dispositivos eletrônicos. Ademais, as propriedades de barreira dos polímeros são reforçadas, melhorando a resistência à permeação de gases e líquidos, o que é particularmente útil para embalagens alimentícias, cosméticas e farmacêuticas (Handbook of Polymer and Ceramic Nanotechnology, 2021; Advanced Polymer Nanocomposites, 2022).

Exemplos de matrizes de polímeros naturais e sintéticos, respectivamente, incluem: amido, seda, celulose, queratina, proteínas e ácido desoxirribonucleico (DNA); polietileno (PE), polipropileno (PP), politereftalato de etileno (PET), policloreto de vinila (PVC), poliestireno (PS) e poliamida (PA). Embora todos sejam polímeros, cada material se distingue dos demais tanto em sua forma de apresentação quanto em sua função. Isso se dá devido ao fato que as propriedades de um polímero dependem de diversos fatores, como estrutura molecular, métodos utilizados na obtenção ou síntese, tipos de monômeros na composição e como se encadeiam, demais substâncias presentes no processamento, condições de armazenamento e uso (MANO; DIAS; OLIVEIRA, 2004).

A importância dos polímeros sintéticos para a vida moderna é inegável. Desde a criação de polímeros sintéticos convencionais e o subsequente início da produção em massa durante o século XX,

bilhões de toneladas de materiais já foram produzidas para uso em computadores, veículos, decoração e diversas outras áreas, os tornando partes essenciais do funcionamento do mundo atual. Os polímeros são altamente versáteis e vantajosos, pois podem ser moldados em diferentes formas e tamanhos, resultando em materiais que, mesmo sendo leves, geralmente apresentam alta resistência química, durabilidade, capacidade de isolamento elétrico e térmico, baixo custo de produção, facilidade de processamento, além de resistência à corrosão e ao impacto. Essas propriedades tornam os polímeros uma escolha preferencial para uma ampla gama de aplicações como em embalagens, eletrônicos e componentes dos mais diversos para os setores automotivo e aeroespacial (MANO; MENDES, 1999; MANO, 2000).

Todavia, apesar de sua grande versatilidade, é importante ressaltar que os polímeros não são uma solução universal. Assim como qualquer material, eles apresentam limitações em suas aplicações. Estas incluem a baixa resistência à temperatura em comparação com metais, a possibilidade de degradação quando expostos a condições ambientais adversas, como luz UV e umidade, e a preocupação com a poluição ambiental devido à sua lenta taxa de degradação em condições de descarte inadequadas. Além disso, em algumas aplicações específicas, alguns polímeros podem não oferecer as propriedades mecânicas necessárias, resultando em limitações de desempenho. Essas desvantagens destacam a importância de considerar cuidadosamente as características e condições de uso dos polímeros e suas combinações em diferentes aplicações, para mitigar possíveis problemas e maximizar os benefícios. Além disso, é possível contornar muitas das limitações de certas matrizes poliméricas com o uso de nanotecnologia (MANO, 2000; NJUGUNA; PIELICHOWSKI; DESAI, 2008; RALLINI; KENNY, 2017).

Nanopartículas (NPs) são estruturas cujas propriedades diferem da escala usual (seja ela micro ou macroscópica) em função da redução de tamanho, dito na escala nano se entre 1 e  $100 \times 10^{-9}$  metros, em pelo menos uma de suas dimensões. Seu tamanho diminuto lhes garante propriedades peculiares, como altíssima reatividade e prevalência de propriedades quânticas. Também extremamente prevalentes na vida moderna, são encontradas na forma de NPs de óxidos metálicos, já inclusive incorporados em diversos produtos comerciais como: protetores solares (Óxido de titânio), medicamentos com tecnologia de direcionamento ao alvo - drug delivery - (Óxido de ferro), painéis solares (Óxido de zinco) e tratamentos para o câncer (Óxido de cobre) (EL-NAGGAR et al., 2016; GHOSH et al., 2019; MONTIEL-SCHNEIDER et al., 2022; TABREZ et al., 2022).

Ao inserir nanopartículas na matriz polimérica durante o processo de criação de algum produto, é possível adicionar, remover e modificar certas propriedades do material, gerando nanocompósitos poliméricos (NCPs), materiais extremamente versáteis e de alto interesse para a comunidade científica e tecnológica. Isso é refletido no fato de que este é um ramo de estudo altamente ativo, com descobertas

e inovações contínuas, com as NPs de óxidos metálicos atuando como reforço mecânico, na melhoria da resistência ao desgaste, aumento da resistência térmica e à chama, agregando propriedades ópticas, antimicrobianas e de barreira. Todavia, a disseminação e aprofundamento de tantos estudos trazem consigo preocupações: com um crescimento do foco popular e acadêmico sobre o tópico da sustentabilidade, críticas vêm sendo realizadas sobre a viabilidade do uso extensivo de polímeros, NPs e NCPs, visto seu impacto no mundo (AVÉROUS; POLLET, 2012; GUILLET, 2012; YIN; DENG, 2015; NASKAR; KEUM; BOEMAN, 2016; KHALAF, 2016; WRÓBLEWSKA-KREPSZTUL et al., 2018; FU et al., 2019; WANG et al., 2020; DA ROCHA et al., 2024 a,b).

De fato, muitas das formas de obtenção, produção e consumo dos três materiais citados (polímeros, NPs e NCPs) são insustentáveis. Por exemplo, o principal grupo de polímeros modernos usados em larga escala e conhecidos vulgarmente como “plásticos” (polietileno, polipropileno, policloreto de vinila, poliestireno, entre outros), tem grande parte de sua produção baseada em petróleo, enquanto seu uso desmedido e descarte inadequado geram milhões de toneladas de microplásticos que impactam negativamente o ambiente e a vida de inúmeras pessoas. As NPs, por sua vez, muitas vezes são obtidas pelo uso de reagentes caros e nocivos, que podem vir a gerar consequências problemáticas durante o descarte de subprodutos, enquanto alguns dos NCPs, além de serem gerados diretamente da mistura dos dois materiais citados, também podem apresentar custos de produção elevado e impactos negativos em termos de demanda de energia e reagentes, a depender da rota de preparo escolhida (GOUR; JAIN, 2019; STANTON et al., 2020; LAW; NARAYAN, 2021; KANWAL et al., 2022; YING et al., 2022).

O presente estudo visa gerar uma revisão bibliográfica abrangente sobre nanocompósitos poliméricos baseados em nanopartículas de óxidos metálicos, explorando os principais métodos desenvolvidos para torná-los mais sustentáveis. Ao final desta revisão, espera-se proporcionar um entendimento aprofundado sobre o tópico, auxiliando estudantes, pesquisadores, produtores de bens de consumo e outros interessados a utilizar esse conhecimento para tomar decisões mais informadas nas etapas de escolha, obtenção, produção, consumo e descarte desses materiais.

## 2 METODOLOGIA

A literatura científica que respalda este texto foi reunida, estudada e compilada entre julho de 2023 e 2024, como parte do desenvolvimento do trabalho de introdução à pesquisa nanotecnológica realizado pelo bacharelado mencionado como primeiro autor deste artigo, sob orientação e supervisão das professoras e pesquisadoras coautoras. As pesquisas foram realizadas utilizando bases de dados que oferecem informações abrangentes e específicas, com destaque para aquelas cuja atualidade, credibilidade e relevância nas áreas de Química, Ciências da Natureza, Ciências Exatas, Ciências da

Terra e, mais especificamente, Tecnologia e Engenharia de Materiais, são comprovadas. A saber: Google Scholar, Scopus, Royal Society of Chemistry, PubMed/NCBI, Springer Nature, Science Direct, e Web of Science. Por questões de adequação técnica e didática, foram revisados apenas trabalhos publicados em língua portuguesa ou inglesa.

Os descritores utilizados nas pesquisas foram: nanoparticle synthesis, sustainability, sustainable nanoparticle synthesis, polymer synthesis, sustainable polymer synthesis, nanocomposites, polymer nanocomposites, sustainable polymer nanocomposites, metal oxide nanocomposites, metal oxide nanoparticles, nanoparticles green synthesis, green synthesis of metal oxide nanoparticles, sustainable polymers, sustainable nanoparticles e sustainable polymer nanocomposites, nos idiomas inglês e/ou português. Ademais, os nomes de cada um dos óxidos metálicos, polímeros e nanocompósitos poliméricos abordados foram analisados individualmente para um detalhamento mais preciso, quando necessário. Quanto à colocação temporal, foram priorizadas publicações com a maior modernidade cabível, incluindo livros e artigos dos últimos quinze anos, para garantir a atualização das informações. No entanto, alguns livros e estudos clássicos - de décadas anteriores - foram mencionados para fornecer contexto histórico e destacar termos e eventos pioneiros.

Os conteúdos encontrados foram filtrados com base em sua relevância para o tópico específico, priorizando publicações de revistas de mais alto impacto nas áreas de nanotecnologia e ciência dos polímeros. A manutenção do estilo de escrita acessível e direto legitima o protagonismo de um estudante de graduação que de fato significou seus estudos por meio de metodologias ativas, mas também visou tornar a revisão mais manejável, sem comprometer a qualidade da cobertura dos conceitos fundamentais, aspectos relevantes, inovações e desafios futuros. Assim, pretende-se não só sintetizar e recircular contribuições técnicas, mas também despertar o interesse daqueles que não são do meio acadêmico, promovendo a socialização e disseminação do conhecimento, e contribuindo para a educação e popularização da ciência e tecnologia.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A viabilidade dos nanocompósitos poliméricos reforçados por óxidos metálicos depende das propriedades finais do material e da sustentabilidade de sua cadeia produtiva. Por isso, é essencial revisar as propriedades e limitações da síntese e aplicação de nanopartículas de óxidos metálicos e dos polímeros que as contêm. Embora este trabalho não trate especificamente da gestão pós-consumo, é fundamental reconhecer que a forma de uso e o destino final dos nanocompósitos poliméricos e de seus componentes, como óxidos metálicos, têm impactos significativos no meio ambiente e na sociedade. Produtos como embalagens, roupas, brinquedos, utensílios e eletrônicos, que frequentemente utilizam esses materiais, podem gerar efeitos adversos se não forem devidamente

manejados e descartados. É crucial que a sociedade e os produtores adotem práticas responsáveis que minimizem os impactos ambientais e socioeconômicos. Isso inclui promover a reciclagem, o uso sustentável e a inovação em métodos de descarte. A conscientização e a educação sobre a destinação adequada desses materiais são passos importantes para reduzir a poluição e promover a sustentabilidade. Além disso, a nanotecnologia e os plásticos não devem ser vistos sob uma luz negativa. Embora haja preocupações legítimas sobre seu impacto ambiental, ambos têm potencial para contribuir de forma significativa para o desenvolvimento tecnológico e a melhoria da qualidade de vida. A chave está em encontrar um equilíbrio entre os benefícios que esses materiais oferecem e a responsabilidade com que são utilizados e descartados.

### 3.1 NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDOS METÁLICOS (NPsOMs)

Os óxidos metálicos (OMs) são compostos químicos formados pela combinação de metais com oxigênio, resultando em materiais com uma ampla gama de propriedades físicas e químicas oriundas das interações químicas entre átomos e suas estruturas cristalinas variadas. Esses compostos são fundamentais em diversas indústrias, incluindo a eletrônica, a construção civil, a medicina e a química, devido à sua estabilidade, resistência e reatividade. Entre os óxidos metálicos mais conhecidos estão o dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), utilizado como pigmento e em protetores solares, o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), essencial na fabricação de cerâmicas e abrasivos, e os óxidos de ferro ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), que desempenham um papel crucial em processos catalíticos e na produção de materiais magnéticos (GRILLI, 2020).

Nanopartículas de óxidos metálicos (NPsOMs) possuem propriedades únicas e distintas das suas contrapartes tradicionais (bulk) devido ao seu tamanho reduzido e à alta área superficial relativa. Essas diferenças permitem uma ampla gama de novas aplicações tecnológicas e médicas, mas também requerem um cuidado especial em relação à toxicidade e ao impacto ambiental. As NPsOMs possuem uma área de superfície muito maior que as partículas macro e micrométricas, o que aumenta sua reatividade superficial, tornando-as mais eficazes em aplicações catalíticas e adsorventes em comparação com os óxidos metálicos tradicionais. Além disso, o tamanho reduzido das nanopartículas pode resultar em propriedades eletrônicas e ópticas diferentes, incluindo efeitos quânticos que não são observados em materiais a granel, conferindo-lhes uma maior variabilidade na absorção e emissão de luz, útil em sensores ópticos e dispositivos fotônicos. Em termos de propriedades mecânicas, algumas NPsOMs podem apresentar resistência e dureza alteradas devido à maior proporção de átomos de superfície, enquanto os OMs tradicionais têm propriedades mecânicas mais estáveis e previsíveis (RALLINI; KENNY, 2017; GRILLI, 2020; KHAN et al., 2023).

As propriedades térmicas também diferem; a condutividade térmica das nanopartículas pode

ser reduzida devido ao espalhamento de fônons. NPsOMs podem interagir de maneira distinta com sistemas biológicos, exibindo propriedades antibacterianas e potencial para uso em aplicações biomédicas, mas também maior toxicidade em certos contextos, em contraste com os óxidos metálicos tradicionais, que são geralmente mais biocompatíveis e menos reativos. Essas diferenças se refletem nas aplicações: as partículas de OMs de tamanho mais diminuto são amplamente utilizadas como catalisadores, sensores, dispositivos eletrônicos e na medicina diagnóstica, enquanto os clusters, concentrações e tamanhos maiores que a nanoescala são observados principalmente em cerâmicas, revestimentos, materiais refratários, implantes e próteses (RALLINI; KENNY, 2017; GRILLI, 2020; KHAN et al., 2023).

No contexto de nanocompósitos poliméricos, as NPsOMs oferecem uma série de vantagens, melhorando as propriedades mecânicas, térmicas, de barreira, ópticas e elétricas da matriz, e possibilitando a criação de novos materiais, mais leves, duráveis e funcionais para uma variedade de aplicações industriais e comerciais. Assim, estas partículas vêm sendo amplamente utilizadas no mundo moderno e apresentam diversas possibilidades de aplicação (FU et al., 2019).

Exemplos de NPsOMs, suas propriedades de interesse e alguns usos comuns estão resumidos no Quadro 1.

<b>QUADRO 1: VISÃO GERAL DOS PRINCIPAIS ÓXIDOS METÁLICOS</b>		
<b>PARTÍCULA</b>	<b>PROPRIEDADES DE DESTAQUE</b>	<b>APLICAÇÕES</b>
Óxido de Ferro II e III (FeO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	FeO é ferromagnético; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> é antiferromagnético, podendo ir a paramagnético acima do ponto de Néel; Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> é fortemente magnético.	Ligas metálicas, pigmentos, abrasivos, catalisadores, ímãs; purificação de minérios e gás natural, hipertermia, agentes de contraste em RMN e liberação controlada de medicamentos.
Óxido de Alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Coloração branca pode se apresentar vermelha ou azul, na forma de gemas, dependendo das impurezas; altíssima dureza (9 na escala de Mohs); bioinércia; alta estabilidade e condutividade térmica; baixa condutividade elétrica.	Biossensores; terapia decâncer; cerâmicos de alta resistência; implantes biomédicos; isolantes elétricos e substratos de circuitos integrados e semicondutores.
Óxido de Cálcio (CaO)	Captação de carbono e impurezas, reação exotérmica com água e vinculação com silicatos.	Produção de antimicrobianos, cimento, aço, vidro, biodiesel; e purificação de água.
Óxido de Zinco (ZnO)	Caráter semicondutor, biocompatibilidade e estabilidade térmica.	Produção de nano e micro transistores, borracha e medicamentos.

Óxidos de Cobre (CuOe CuO <sub>2</sub> )	Biocompatibilidade, caráter catalítico em processos biológicos, condutividade elétrica e atividade antimicrobiana.	Pesticidas e fertilizantes, produção de supercondutores e tratamento de câncer.
Óxido de Chumbo(PbO)	Altíssima toxicidade, absorvência de raios-X e vinculação com silicatos.	Tintas, recipientes antirradiação, fotodetectores, células solares e cerâmicos reforçados.
Óxido de Titânio (TiO <sub>2</sub> )	Cor branca chamativa, com alto índice de refração e opacidade; importante incremento de propriedades termomecânicas e resistência ao envelhecimento por luz UV; propriedades fotocatalíticas e antimicrobianas.	Painéis solares, pigmentos e protetores solares; purificação de ar e água; revestimentos autolimpantes; capacitores e varistores.
Óxido de Molibdênio (MoO <sub>3</sub> )	Anisotropia advinda da estrutura cristalina ortorrômbica; excelente incremento de resistência mecânica em razão de sua alta densidade e estabilidade termoquímica; forte agente oxidante; material de condutividade elétrica modulável.	Catalisador de dessulfurização e reforma de hidrocarbonetos; purificação de água; células solares, dispositivos optoeletrônicos, filmes finos e revestimentos contra corrosão metálica; poderoso agente antibacteriano e antioxidante.

Fonte: Adaptado de ALAM; KUMAR; PARK, 2022; CHAKRABORTY et al., 2022; DA ROCHA et al., 2024a; DA ROCHA et al., 2024b; SAYYED et al., 2023; ROCA et al., 2023; ALI et al., 2016; BOEY; MANIAM; HAMID, 2011; CHO; TOMAS DA ROCHA; JUNG, 2024; DE CASTRO et al., 2017; GRIGORE et al., 2016; GUDKOV et al., 2022; HABTE et al., 2019; HAIDER; JAMEEL; AL-HUSSAINI, 2019; HASSANPOUR et al., 2018; HAYES et al., 2020; KOŁODZIEJCZAK-RADZIMSKA; JESIONOWSKI, 2014; LEE; LALDAWNGLIANA; TIWARI, 2012; MIRI et al., 2018; MU et al., 2017; PROKAEWA et al., 2022; RASHAD, 2013; ROY et al., 2013; SAQIB et al., 2019; SOLTAN; SERRY, 2011; TEMPLETON et al., 2001; WARKAR, 2022; ZIENTAL et al., 2020.

As informações contidas no Quadro 1 permitem compreender amplamente o quão essenciais as NPsOMs são atualmente, dadas suas aplicações em praticamente todas as áreas relevantes para a vida no século XXI: construção urbana, metalúrgica, medicina, eletrônicos, agricultura, produção de energia, produção industrial e pesquisas científicas. Logo, não é surpreendente que a produção e obtenção de tais materiais tenha alcançado escalas industriais no último século - algo que trouxe consigo uma grande quantidade de problemas ambientais e sociais dada a abundância de métodos testados e disseminados com o passar dos anos, visando o avanço tecnológico e o lucro, sem que necessariamente fosse validado o aspecto socioambiental. Muitos dos materiais supracitados se encontram em depósitos naturais no planeta, como óxidos de ferro na forma de magnetita, enquanto outros precisam ser gerados quimicamente, como CaO, que é encontrado na forma de CaCO<sub>3</sub> em calcita. Existem inúmeras formas de produzir ou obter naturalmente OMs, dependendo da disponibilidade de recursos naturais, mão de obra, aparato técnico, reagentes químicos, matriz energética, e, por fim, claro, da escolha das características finais desejadas na partícula. De qualquer modo, seja ele sintético ou não, as formas de explorar os benefícios de NPsOMs, assim como as de NPs em geral, podem ser didaticamente agrupadas em três blocos: processos físicos, químicos e biológicos (NAM; LUONG, 2019; IJAZ et al., 2020).

Os processos físicos consistem em métodos Top-Down que utilizam estresses mecânicos, elétricos e térmicos para a remoção e redução de excessos de material e impurezas resultando na

criação de NPs. Alguns dos mais comuns baseiam-se em ablação a laser, arcos elétricos, pirólise com spray, moinhos de bolas, transformação e subsequente condensação de vapor e gás, descarga elétrica em pulsos e litografia. Por exemplo, as nanotitânias, amplamente exploradas por suas propriedades fotocatalíticas e, em cosméticos, pela proteção UV, são comumente produzidas por meio de moinhos de bolas, um processo físico (THEIVASANTHI, 2017; JAMKHANDI et al., 2019; IJAZ et al., 2020; PATIL et al., 2021).

Em contraste, os processos químicos consistem em abordagens Bottom-Up de formação de NPs por uso de interações. Exemplos destes incluem a redução química, síntese sonoquímica, microemulsão, fotoquímica, eletroquímica, pirólise, microondas, síntese solvotérmica e coprecipitação. A saber, a cal viva (CaO) pode ser produzida pela decomposição termoquímica de  $\text{CaCO}_3$ , uma forma de redução química. Processos biológicos consistem também em métodos Bottom-Up de formação de NPs por uso de matéria-prima biológica e/ou processos químicos naturais de certos organismos, que se destacam por gerar uma quantidade menor de subprodutos nocivos que, gerando, inclusive, muitas vezes, resíduos biodegradáveis. Exemplos são: uso de plantas e seus extratos, uso de bactérias, fungos, algas, enzimas, biomoléculas e microrganismos em geral. Nanopartículas de óxidos metálicos diversos, como alumínio, cobalto, cobre, ferro, manganês, níquel, prata, titânio, zinco, entre outros, podem ser obtidas a partir de extratos de plantas por processos biológicos verdes de oxirredução (DHAND et al., 2015; NAM; LUON, 2019; IJAZ et al., 2020; CHAKRABORTY et al., 2022).

Processos físicos e químicos comumente priorizam custo e a razão entre quantidade de NPs criadas pelo tempo, negligenciando completamente os possíveis danos que tais métodos possam causar na escala de produção industrial contemporânea. A geração em massa de CaO a partir de  $\text{CaCO}_3$ , por exemplo, é um grande contribuinte para a poluição aérea por supersaturação de  $\text{CO}_2$ , visto que a redução química gera este componente como subproduto. Em contrapartida, os processos biológicos, por serem mais alinhados com os princípios da química verde, representam um avanço significativo, sendo mais sustentáveis e ecologicamente corretos (FEBRIATNA; DARMANTO; JUANGSA, 2023).

Dos três grupos de métodos citados, o de processos biológicos apresenta, no geral, maior eficácia no quesito de gerar NPs por química verde. De fato, os processos biológicos são em geral considerados os mais eficazes em termos de química verde por utilizarem matéria-prima biológica, como plantas, bactérias, fungos e outros microrganismos para sintetizar NPs. Esses métodos tendem a ser mais sustentáveis e ecologicamente corretos uma vez que usam processos naturais e muitas vezes resultam em subprodutos biodegradáveis. Por exemplo, o uso de extratos de plantas para produzir NPs de CuO minimiza o uso de reagentes tóxicos e reduz o impacto ambiental. Entretanto, os processos físicos se tornam "mais verdes" quando são adaptados para reduzir o consumo de energia. Ainda, é possível realizar alguns processos químicos de forma relativamente ecológica, desde que os reagentes

não sejam potencialmente tóxicos ou gerem resíduos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. A química verde foca na redução de substâncias perigosas e na sustentabilidade, enquanto alguns métodos químicos tentam aderir a esses princípios, são considerados intrinsecamente ecológicos (IJAZ et al., 2020; ÁLVAREZ-CHIMAL; ÁNGEL ARENAS-ALATORRE, 2023).

Os métodos verdes para a produção de NPs representam um avanço significativo na nanotecnologia, destacando-se pela sustentabilidade e minimização do impacto ambiental. Esses métodos utilizam processos biológicos e químicos que se alinham com os princípios da química verde, buscando reduzir ou eliminar o uso de substâncias perigosas, diminuir a geração de resíduos e aumentar a eficiência energética. Os processos conhecidos como síntese biogênica envolvem o uso de organismos vivos ou seus extratos para sintetizar NPs. Plantas, bactérias, fungos, algas e enzimas são comumente empregados devido à sua capacidade natural de reduzir íons metálicos a nanopartículas. Este método não só reduz o impacto ambiental, mas também é energeticamente eficiente e gera subprodutos que são frequentemente biodegradáveis (MIRI et al., 2018; GOUR; JAIN, 2019; IJAZ et al., 2020; SHANKER; HUSSAIN, 2022).

Embora os métodos químicos tradicionais muitas vezes exijam o uso de reagentes tóxicos e condições reacionais extremas, a química verde oferece alternativas que se alinham aos princípios da sustentabilidade. Exemplos incluem a redução química, que pode ser realizada com reagentes menos nocivos e sob condições mais brandas, e a síntese solvotérmica, onde solventes não tóxicos são empregados para minimizar os impactos ambientais. Além disso, técnicas como coprecipitação e síntese sonoquímica podem ser adaptadas para se tornarem mais sustentáveis, utilizando surfactantes biodegradáveis e controlando as condições de reação de forma a reduzir a geração de resíduos (DUAN; WANG; LI, 2015; SHANKER; HUSSAIN, 2022).

Nanopartículas são amplamente utilizadas em diversas aplicações industriais e médicas devido às suas propriedades físicas e químicas únicas. No entanto, esses usos também levantam preocupações quanto aos potenciais impactos ambientais e à saúde humana. As NPs são empregadas em diagnósticos, terapias direcionadas, liberação controlada de medicamentos e imagem biomédica. Por exemplo, nanopartículas de dióxido de titânio são usadas em agentes de contraste para ressonância magnética e em fototerapia. Além disso, são aplicadas em catalisadores, sensores, eletrônica, cosméticos e como aditivos em materiais de construção. Nanopartículas de prata, por exemplo, são valorizadas por suas propriedades antimicrobianas e são utilizadas em tecidos e revestimentos, com segurança. No entanto, apesar dos benefícios, algumas NPs podem ser nocivas, em determinadas concentrações e tamanhos. Estudos indicam que nanopartículas de metais pesados podem induzir citotoxicidade e genotoxicidade, resultando em danos celulares e mutações genéticas; e exposição prolongada pode levar a efeitos adversos à saúde, como inflamações pulmonares e problemas cardiovasculares (IRAVANI et al., 2014;

OU et al., 2016; GOTTARDO et al., 2021).

O descarte inadequado de NPs pode levar à contaminação ambiental. Quando liberadas no meio ambiente, as NPs podem persistir no solo e na água, afetando organismos aquáticos e terrestres. Para contornar os seus possíveis efeitos adversos, muitas NPs são projetadas para serem bioinertes, ou seja, não reativas biologicamente, o que pode prolongar sua permanência no ambiente e potencialmente causar bioacumulação na cadeia alimentar. Para mitigar ao máximo os impactos, é crucial não só pensar na síntese, mas também desenvolver estratégias eficazes de descarte e reciclagem de NPs. Métodos como a filtração avançada e a fotodegradação podem ser empregados para remover NPs de efluentes industriais. Além disso, a regulamentação rigorosa e a implementação de práticas de manufatura responsável são essenciais para minimizar os riscos associados ao uso e descarte de nanopartículas (GOTTARDO et al., 2021; KUMARI et al., 2023; SINGH et al., 2023).

Portanto, é possível observar, através da crescente utilização de nanopartículas de óxidos metálicos (NPsOMs), o papel crucial dessas partículas em diversos setores devido às suas propriedades únicas. No entanto, a produção e aplicação dessas NPs ainda enfrentam desafios significativos, como impactos ambientais e riscos à saúde relacionados à sua toxicidade e persistência. A adoção de métodos verdes para a produção de nanopartículas e a implementação de práticas seguras de descarte são essenciais para garantir a sustentabilidade na Nanotecnologia. As preocupações ambientais e os aspectos toxicológicos associados a esses materiais são sumarizados, reforçando a necessidade de uma abordagem sempre consciente e informada. Ainda, vários materiais nanométricos têm sido estudados, inclusive, pelo seu potencial para remediar problemas ambientais e combater as mudanças climáticas (SHANKER; HUSSAIN, 2022; CHAUSALI; SAXENA; PRASAD, 2023; SINGH et al., 2023). Assim, é chegado o momento de propor a substituição de muitos dos métodos convencionais por tecnologias baseadas em nanomateriais, equilibrando o avanço científico com a preservação ambiental e a saúde pública, utilizando regulamentações adequadas e práticas de manufatura responsável para maximizar os benefícios da nanotecnologia de forma segura e ecológica.

### 3.2 POLÍMEROS

Os desafios ambientais e socioeconômicos relacionados aos polímeros estão intrinsecamente ligados às propriedades que os tornam extremamente valiosos para a indústria. Especialmente os sintéticos, destacam-se por sua altíssima resistência química e mecânica, maleabilidade, versatilidade e, acima de tudo, por sua baixíssima degradabilidade e bioinércia. Essas características fazem com que sejam amplamente utilizados em uma variedade de aplicações industriais, incluindo revestimentos, armazenamento de alimentos e objetos, e em processos industriais diversos. No entanto, as mesmas qualidades que conferem aos polímeros suas vantagens industriais também representam desafios

significativos. A baixa degradabilidade dos polímeros sintéticos implica que, uma vez descartados, eles permanecem no ambiente por longos períodos, acumulando-se em aterros sanitários, oceanos e outros ecossistemas. Essa persistência contribui para a poluição ambiental e afeta a qualidade dos habitats naturais. A baixa reatividade dos polímeros com a maioria dos compostos químicos e biológicos é um fator que contribui para sua durabilidade, mas também para seus problemas ambientais. A incapacidade dos polímeros de serem facilmente quebrados por processos naturais significa que eles podem ser ingeridos por organismos vivos. Quando plantas e animais interiorizam (via respiração ou ingestão, por exemplo) partículas poliméricas, estas podem se acumular na cadeia alimentar, levando a efeitos prejudiciais na saúde humana como inflamações, infecções, distúrbios digestivos, alterações gastrointestinais, alterações metabólicas e hormonais. Além disso, a presença de nano e micro e macropolásticos pode alterar a qualidade do ar, do solo e da água, afetando também a fauna, flora e a biodiversidade. Portanto, apesar de seu valor e utilidade, os polímeros apresentam desafios significativos que destacam a necessidade urgente de estratégias eficazes para a gestão de resíduos, desenvolvimento de suas versões mais sustentáveis e conscientização sobre seu uso e descarte. A adoção de práticas mais responsáveis e inovadoras é essencial para mitigar as possíveis consequências adversas associadas a esses materiais e promover uma abordagem mais equilibrada e segura (MANO; MENDES, 1999; MANO, 2000; MANO; DIAS; OLIVEIRA, 2004; Handbook of Polymer and Ceramic Nanotechnology, 2021; Advanced Polymer Nanocomposites, 2022; AMARAKOON et al., 2022).

Para compreender a importância de processos verdes de síntese de polímeros, é necessário analisar o processo de criação dos mesmos desde a extração da matéria-prima até a criação do produto final. Em relação à obtenção da matéria-prima, nota-se que mais de 99% dos plásticos utilizados comercialmente são derivados de monômeros obtidos a partir de combustíveis fósseis, os mais comuns sendo polietileno (PE), polipropileno (PP), politereftalato de etileno (PET) e seus respectivos derivados. Logo, todos os problemas associados com a extração de combustíveis fósseis também se aplicam aos plásticos comuns, incluindo poluição marítima, perturbação de ecossistemas e poluição atmosférica - problemas que somam aos citados no parágrafo anterior (SEN; PUSKAS, 2015; FILHO; SANFELICE, 2018; RHODES, 2018; WILLIAMS; RANGEL-BUITRAGO, 2022).

A síntese de materiais que conhecemos como plásticos, mas também de borrachas e fibras, ocorre através de moléculas menores chamadas monômeros, que reagem e se ligam covalentemente formando polímeros. Para tal, mecanismos diversos - adição, condensação, coordenação - podem ser conduzidos, em diferentes condições reacionais, incluindo polimerização em solução e em massa. Diversos processos industriais de produção de polímeros são logisticamente insustentáveis, envolvendo o uso de monômeros derivados de combustíveis fósseis, elevados consumos de energia,

utilização de solventes orgânicos tóxicos e práticas inadequadas de descarte de resíduos. O subsequentemente processamento para funcionalização dos materiais poliméricos também é realizado de forma insustentável em algumas das metodologias usuais, colaborando diretamente para a geração de uma grande quantidade de rejeitos que perturbam o equilíbrio dos ecossistemas naturais e afetam negativamente a vida das pessoas (MANO; DIAS; OLIVEIRA, 2004; GEYER, 2020; SCHWAB et al., 2024).

Por outro lado, é importante estar ciente de que diversos processos biológicos naturais utilizam de polimerização para a criação de moléculas orgânicas essenciais para o funcionamento da vida, como a produção de celulose em plantas e de DNA em todos os seres celulares do planeta. Ademais, diversos polímeros, ainda que sintéticos, não se fazem tão nocivos socioambientalmente uma vez que: são produzidos a partir de fontes renováveis, como biomassa, o que reduz a dependência de combustíveis fósseis e diminui a pegada de carbono; ou são biodegradáveis, decompondo-se de maneira mais rápida e segura no ambiente; ou podem ser reciclados e reutilizados, reduzindo a necessidade de novas matérias-primas e minimizando a geração de resíduos; ou, ainda, são formulados para de algum modo ter menor toxicidade, tanto durante sua produção quanto no descarte, reduzindo o risco de contaminação ambiental e danos à saúde humana. Logo, nota-se que os polímeros em si não são um problema, e que existem formas de gerá-los e consumi-los em harmonia com o meio ambiente (AVÉROUS; POLLET, 2012; GUILLET, 2012; GEYER, 2020; SALEH, 2021; KANWAL et al., 2022).

A destinação inadequada de materiais poliméricos após o uso, especialmente os plásticos, representa um dos maiores desafios associados ao uso de polímeros (sobretudo sintetizados a partir de fonte fóssil) na sociedade contemporânea. A falta de conscientização da população sobre os riscos do descarte inadequado, a ausência de incentivos industriais para priorizar a saúde ambiental e as propriedades inerentes de boa parte dos plásticos convergem para criar um dos maiores desafios na gestão de resíduos na era moderna. Dado que a socialização da educação científica e a reforma política e industrial com foco na saúde coletiva e planetária estão fora do escopo deste artigo, a presente discussão restringe-se a explorar estratégias em torno de nanomateriais baseados em polímeros com impacto ambiental minimizado (KRISHNAMOORTI; VAIA, 2007; GUILLET, 2012; KHALAF, 2016; FU et al., 2019; STANTON et al., 2020; AMARAKOON et al., 2022; KANWAL et al., 2022).

Os problemas relacionados aos materiais plásticos convencionais são consequência tanto das matérias-primas utilizadas e suas formas de obtenção quanto das práticas de polimerização, processamento, uso e descarte imprudentes. Diante desse contexto, torna-se evidente a necessidade de adotar técnicas de síntese, aplicação e destinação mais sustentáveis para polímeros, blendas e compósitos. Considerando que as propriedades benéficas dos plásticos convencionais são justamente

as que mais contribuem para a bioacumulação e poluição ambiental, é imperativo desenvolver novos materiais que possam emular ou substituí-los, mas com o benefício adicional do viés de sustentabilidade — algo que vem sendo alcançado com certo sucesso através do desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos verdes, como discutiremos a seguir.

### 3.3 NANOCOMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS POR ÓXIDOS METÁLICOS

Nanocompósitos poliméricos são materiais compostos por uma matriz polimérica na qual nanoestruturas são dispersas com o objetivo de melhorar as suas propriedades. Essas nanoestruturas podem ser representadas por xxxxx, nanopartículas de óxidos metálicos como os de titânio, prata, cobre, zinco, molibdênio, ferro, alumínio, níquel, cobalto, manganês, vanádio e muitos outros, conforme mencionado anteriormente. Os óxidos metálicos podem conferir propriedades desejáveis aos nanocompósitos como: resistência mecânica, propriedades antimicrobianas, capacidade de absorção de UV, condutividade elétrica, catalatividade, fotocataliticidade, estabilidade térmica, reforço estrutural, propriedades ópticas ajustáveis, resistência a produtos químicos, propriedades anticorrosivas, biocompatibilidade, capacidade de autorreparo, características hidrofóbicas superficiais, entre outras. No entanto, é fundamental avaliar os potenciais riscos associados ao uso desses materiais. É importante considerar os possíveis impactos à saúde humana e ao meio ambiente durante todo o ciclo de vida do material, desde a fabricação até a disposição final (AVÉROUS; POLLET, 2012; GUILLET, 2012; YIN; DENG, 2015; NASKAR; KEUM; BOEMAN, 2016; KHALAF, 2016; WRÓBLEWSKA-KREPSZTUL et al., 2018; WANG et al., 2020; DA ROCHA et al., 2024).

As propriedades dos nanocompósitos poliméricos reforçados por óxidos metálicos (NCPsOMs) resultam diretamente dos métodos de obtenção e dos constituintes utilizados, das interações entre a matriz polimérica e as nanopartículas, bem como das condições específicas de processamento. Dado o cenário atual, que preconiza o lucro, não é surpreendente que polímeros com plantas industriais já bem estabelecidas, porém nada sustentáveis, ainda sejam frequentemente estudados, valorizados e empregados como matrizes para a criação de NCPsOMs, os quais muitas vezes contêm nanopartículas tóxicas ou igualmente insustentáveis em termos de rota de obtenção. Isso resulta na produção de materiais prejudiciais ao meio ambiente, como o policloreto de vinila (PVC) contendo nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ . Conseqüentemente, diversos estudos indicam que alguns NCPsOMs devem ser evitados pois podem representar riscos ambientais significativos (LA ROSA, 2023; SARKER et al., 2023).

É fundamental conhecer os principais métodos para a síntese de nanocompósitos poliméricos reforçados com óxidos metálicos, pois cada método oferece vantagens específicas e atende a diferentes requisitos de fabricação e propriedades do material final, especialmente em relação ao desempenho, reciclabilidade e degradabilidade. A mistura direta das nanopartículas na matriz polimérica é um

método simples e eficiente para algumas aplicações, embora possa não garantir a uniformidade desejada. O método sol-gel permite a formação de um material com estrutura fina e homogênea a partir de precursores líquidos, sendo ideal para quando se exige alta uniformidade e controle na estrutura do nanocompósito. A polimerização em meio nanoparticulado integra as nanopartículas durante a formação do polímero, resultando em uma matriz polimérica com distribuição mais uniforme e otimizada em termos de desempenho. Compreender esses métodos é crucial para selecionar a abordagem mais adequada para atingir as propriedades desejadas e garantir a eficácia do nanocompósito para aplicações específicas (LUAN et al., 2012; FAWAZ e MITTAL, 2014).

Um dos métodos mais amplamente utilizados para a formação de nanocompósitos poliméricos reforçados com óxidos metálicos é a mistura mecânica, que envolve a dispersão das nanopartículas diretamente na matriz polimérica por meio de forças mecânicas. Nesse processo, as nanopartículas são dispersas no polímero em sua forma sólida, obtida por moagem, agitação em alta velocidade ou outros métodos similares. Embora esse método seja relativamente simples e escalonável, a distribuição uniforme das nanopartículas pode ser desafiadora, e a eficácia do reforço pode variar (AKPAN et al., 2019).

A dispersão em solução oferece um controle preciso sobre a distribuição das nanopartículas na matriz polimérica. Inicia-se com a dispersão das nanopartículas em uma solução polimérica adequada, sendo crucial a escolha do solvente para garantir uma boa dispersão sem afetar as propriedades do polímero. Garantir uma mistura homogênea é essencial para evitar aglomeração das nanopartículas. A solução resultante é então depositada em um substrato apropriado, como um molde, por meio de técnicas como revestimento por centrifugação ou imersão. O solvente é então removido por evaporação para evitar a formação de aglomerados. No entanto, manter a estabilidade da dispersão pode ser desafiador, especialmente para nanopartículas propensas à aglomeração, e pode exigir o uso de agentes estabilizadores. A seleção do solvente também é crítica para evitar a degradação do polímero, levando em consideração questões de toxicidade e volatilidade em escalas industriais. Além disso, alcançar uma morfologia precisa pode ser desafiador e requer um entendimento profundo das interações entre as nanopartículas e o polímero. A escalabilidade do processo pode ser limitada devido a considerações de tempo, custo e eficiência, especialmente em processos de deposição em larga escala, que podem exigir equipamentos especializados e condições operacionais específicas.

Os métodos de polimerização *in situ* representam uma abordagem altamente vantajosa na síntese de nanocompósitos poliméricos reforçados por óxidos metálicos. Essa estratégia permite a formação direta das nanopartículas dentro da matriz polimérica durante o processo de polimerização, oferecendo uma integração eficiente dos componentes. A polimerização *in situ* pode ser realizada por diversas técnicas, incluindo a polimerização em solução, em massa ou em emulsão. Nesses métodos,

os precursores dos óxidos metálicos são incorporados à mistura reacional antes da polimerização ocorrer. Essa integração direta durante a síntese do polímero resulta em uma excelente dispersão das nanopartículas na matriz, promovendo uma distribuição homogênea e frequentemente evitando a necessidade de processos adicionais de mistura. Essa abordagem simplifica o processo de fabricação e minimiza problemas relacionados à aglomeração de nanopartículas e à falta de aderência à matriz polimérica. Assim, os métodos de polimerização *in situ* se destacam como uma opção promissora para a produção de nanocompósitos poliméricos de alta qualidade, com propriedades aprimoradas e potencial para diversas aplicações (XU et al., 2023).

Técnicas de deposição física, como deposição por pulverização ou eletroforética, são usadas para aplicar nanopartículas de óxidos metálicos em superfícies poliméricas. Esses métodos são úteis para controlar a orientação ou a distribuição das nanopartículas em filmes ou revestimentos. Na deposição por pulverização, as nanopartículas são dispersas em uma solução e depois pulverizadas sobre a superfície polimérica, formando uma camada fina e uniforme. A deposição eletroforética utiliza um campo elétrico para guiar as nanopartículas em direção à superfície, permitindo uma deposição controlada e eficiente, inclusive com orientação direcional das partículas. No entanto, ambos os métodos enfrentam desafios relacionados à otimização dos parâmetros de deposição, à adesão das nanopartículas à superfície polimérica e à uniformidade do revestimento, exigindo entendimento profundo das interações entre as nanopartículas e o polímero (JEONG et al., 2016; GONZÁLEZ-CASTILLO et al., 2020).

Em resumo, a escolha do método de síntese adequado para nanocompósitos poliméricos reforçados com óxidos metálicos depende de uma série de fatores, incluindo as propriedades desejadas do material final, a escala de produção e as considerações econômicas e ambientais. Cada método apresenta vantagens e desafios únicos, e a pesquisa contínua nessa área está focada em otimizar esses processos para alcançar materiais compostos com desempenho aprimorado e impacto ambiental reduzido.

Para ratificar e apresentar de forma concisa e elucidativa a aplicação de abordagens sustentáveis no desenvolvimento e uso de nanocompósitos poliméricos reforçados com óxidos metálicos, alguns dos trabalhos que contribuíram para a construção da discussão estão destacados no Quadro 2.

<b>QUADRO 2: ABORDAGENS VERDES EM NCPsOMs</b>		
<b>FONTE</b>	<b>RESUMO</b>	<b>CONTRIBUIÇÕES</b>
Biomolecule-assisted synthesis of biomimetic nanocomposite hydrogel for hemostatic and wound healing	O estudo apresenta uma visão abrangente das estratégias ecoamigáveis bioinspiradas para a fabricação de hidrogéis nanocompósitos, destacando seus avanços e aplicações médicas, especialmente em hemostasia e cicatrização de feridas. Avalia os métodos tradicionais, propõe alternativas bioinspiradas para mitigar impactos	Os hidrogéis desenvolvidos pelos métodos do estudo não apenas atenderam aos critérios da química verde, mas demonstraram maior eficácia na área medicinal, devido ao menor índice de rejeição em

applications	ambientais e discute suas perspectivas futuras dentro da medicina.	relação aoutros métodos.
In situ synthesis of a bio-cellulose/titanium dioxide nanocomposite by using a cell-free system	O estudo busca gerar um nanocompósito de dióxido de titânio e biocelulose sem a necessidade do uso de células para a criação da matriz polimérica. Para este fim, bactérias produtoras de biocelulose foram compactadas e rompidas, com suas proteínas mantidas funcionais. NPs de TiO <sub>2</sub> foram inseridas na sopa de proteínas junto a um iniciador que gerou opolímero em volta das NPs.	O nanocompósito foi gerado com sucesso, apresentando propriedades térmicas, mecânicas e bactericidas aumentadas em relação à biocelulose.
Enhanced photocatalytic activity and ultra-sensitive benzaldehyde sensing performance of a SnO <sub>2</sub> -ZnO-TiO <sub>2</sub> nanomaterial	O estudo busca gerar um nanomaterial composto por SnO <sub>2</sub> , ZnO e TiO <sub>2</sub> e observar sua eficiência na degradação fotocatalítica do corante violeta de metila 6b e detecção eletroquímica de benzaldeído. Para este fim, as NPs foram sintetizadas por meio de coprecipitação - permitindo com que surgissem NPs compostas pelos três diferentes óxidos.	O nanomaterial gerado cumpriu com as expectativas do estudo, sendo eficiente tanto na degradação do corante quanto na detecção de benzaldeído.
Morphology controlled phosphate grafted SnO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> nanocomposite oxides prepared by a urea hydrolysis method as efficient heterogeneous catalysts	O estudo busca gerar um nanomaterial composto por dióxido de estanho e de zircônio com fosfato enxertado e caracterizá-lo usando XRD, FTIR, Raman, TGA/DSC, BET, XPS, TPD, FESEM e HRTEM. O objetivo foi avaliar suas propriedades estruturais e morfológicas e investigar sua aplicação como catalisadores na síntese de indóis, com potencial de reciclagem subsequente.	Os nanocompósitos se destacaram comocatalisadores na síntese rápida e purade 3-indóis substituídos, importantes em aplicações biológicas;mostraram melhorias na acidez e na estabilidade das fases.
A combustion synthesis route for magnetically separable graphene oxide-CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -ZnO nanocomposites with enhanced solar light-mediated photocatalytic activity	O estudo busca utilizar uma reação de combustão para criar um nanocompósito de óxido de grafeno (OG)-(CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )-ZnO para degradação fotocatalítica de poluentes nas águas sem gerar poluentessecundários. Para este fim, o OG foi utilizado como base para a atuação fotocatalítica do ZnO, que não é muito eficaz sozinho. E o CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> foi utilizado para aprimorar ainda mais as propriedades do ZnO e garantir um caráter magnético ao nanocompósito.	O material apresentouas propriedades desejadas, degradando as amostras analisadas e sendo facilmente recolhido após o uso por meio de campos magnéticos, mitigando a geração de poluentes secundários.
Ag/g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> nanocomposite: Green fabrication and its application as a catalyst in the synthesis of new series of depsipeptides as biologically active compounds and investigation on their anti-breast cancer activity	O trabalho apresenta a síntese ecológica de um nanocompósito prata/grafite nitreto de carbono, utilizando extratos de Ferula gummosa como estabilizador e agente redutor, através de um método rápido de geração in-situ. O nanocompósito foi caracterizado por diversas técnicas espectroscópicas, incluindo FTIR, XRD, SEM, EDX-MAP e TEM e utilizado como catalisador na síntese de uma nova série de depsipeptídeos em meio verde, utilizando aspirina/cetoprofeno, isocianato de ciclohexilo e aril aldeídos. A metodologia apresenta vantagens ambientais e econômicas, como condições de reação brandas, curtos tempos de reação, altos rendimentos dos produtos e rotas de trabalho simples.	O nanocompósito mostrou-se eficiente como catalisador, permitindo a síntese de depipeptides com altos rendimentos e tempos de reação aceitáveis; e demonstrou boa reusabilidade, podendo ser reciclado várias vezes sem perda de reatividade. Os depsipeptídeos mostraram potencial terapêutico na linhagem tumoral MDA-MB-468.
Green synthesis of NiO-SnO <sub>2</sub>	Este estudo explorou a síntese e avaliação de nanocompósitos de óxido de níquel-óxido de	O nanocompósito foi sintetizado com sucesso, com

<p>nanocomposite and effect of calcination temperature on its physicochemical properties: Impact on the photocatalytic degradation of methyl Orange</p>	<p>estanho para a fotodegradação do corante alaranjado de metila, em soluções aquosas. O nanocompósito foi sintetizado por uma abordagem biológica utilizando extrato de folhas de Ficus elastica e foi caracterizado por diversas técnicas, incluindo XRD, SEM, EDX, FTIR e espectroscopia de reflectância difusa UV-visível.</p>	<p>nanocristais de NiO romboédricos e SnO<sub>2</sub> tetragonais. A calcinação melhorou a estabilidade e a cristalinidade, mas reduziu a eficiência fotocatalítica. O estudo sugere esses nanocompósitos como promissores despoluentes orgânicos.</p>
<p>Green and facile synthesis of carboxymethylcellulose/ZnO nanocomposite hydrogels crosslinked with Zn<sup>2+</sup> ions</p>	<p>Foi desenvolvida uma metodologia verde para a preparação de hidrogéis de carboximetilcelulose funcionalizados e entrecruzados com íons Zn<sup>2+</sup>, incorporando nanopartículas de óxido de zinco sem o uso de reagentes alcalinos, que serviu tanto como matriz para o hidrogel quanto para liberar grupos hidroxila livres, o que aumentou o pH da mistura e facilitou a formação de ZnO. As propriedades químicas e morfológicas dos hidrogéis foram analisadas por FTIR e SEM, e a capacidade de absorção de água foi estudada em diferentes condições de temperatura e pH.</p>	<p>Os hidrogéis apresentaram uma distribuição uniforme das nanopartículas de ZnO e demonstraram uma capacidade aprimorada de absorção de água e atividade antimicrobiana, destacando seu potencial para aplicações biomédicas.</p>
<p>Green synthesis of carbohydrate polymer based gum kondagogu/hydroxypropyl cellulose blend silver nanocomposite film and their antimicrobial activity</p>	<p>Este estudo apresenta a síntese verde de um nanocompósito de prata em filme a partir de uma mistura de polímeros de carboidrato, especificamente goma kondagogu e hidroxipropilcelulose (HPC). A goma kondagogu foi combinada com HPC para formar uma blenda que serviu como matriz para a incorporação de NPs de prata, sintetizadas por um método ecológico. Os filmes foram caracterizados por XRD, FTIR, AFM, FESEM, EDX, TEM, e XPS.</p>	<p>As microscopias confirmaram a distribuição uniforme da nanoprta no filme - que demonstrou biocompatibilidade, boas propriedades mecânicas e atividade antibacteriana - tornando-o potencial para embalagens e na Biomedicina.</p>
<p>Substantial utilization of food wastes for existence of nanocomposite polymers in sustainable development: a review</p>	<p>O estudo revisou o uso extensivo de restos de comida para a síntese de nanocompósitos poliméricos, destacando rotas de química verde. A revisão explora as diversas metodologias para a produção desses nanocompósitos e enfatiza as vantagens dessas abordagens sustentáveis sobre métodos tradicionais. Além de sua sustentabilidade inerente, as rotas verdes muitas vezes são práticas e utilizam reagentes presentes em fontes naturais, como plantas e bactérias, que são facilmente acessíveis.</p>	<p>A análise confirma que as rotas verdes são ambientalmente benéficas e práticas para a síntese de nanocompósitos poliméricos, utilizando reagentes acessíveis em fontes naturais e promovendo a valorização de resíduos alimentares, contribuindo para a economia circular.</p>
<p>Metal oxides-based nanomaterials: Green synthesis methodologies and sustainable environmental applications</p>	<p>Este estudo revisa o uso extenso de nanopartículas e nanocompósitos à base de óxidos metálicos no combate à poluição, destacando metodologias de síntese verde, que empregam extratos vegetais ou biopolímeros para minimizar o uso de produtos químicos tóxicos e energia. Os nanomateriais obtidos por esses métodos ecológicos demonstram grande potencial em aplicações ambientais sustentáveis, como a remediação de poluentes em água e solo, tratamento de efluentes e catálise em processos de conversão de energia.</p>	<p>O artigo avança a pesquisa em síntese verde, propondo alternativas ecológicas para produzir nanomateriais de óxidos metálicos, destacando a eficácia dos materiais e a viabilidade de práticas sustentáveis.</p>
<p>A review on green approach toward carbohydrate-based</p>	<p>Este artigo revisa abordagens verdes para a síntese de nanocompósitos à base de carboidratos utilizando resíduos agroalimentares, com o objetivo de reduzir desperdício. A síntese verde foca na utilização de resíduos agrícolas e</p>	<p>O artigo demonstra como a síntese verde de NCs baseados em biopolímeros formados por carboidratos é vantajosa e viável para a produção dos</p>

nanocomposite synthesis from agro-food waste to zero waste environment	alimentares como fontes para a produção de nanocompósitos, o que contribui para a redução de resíduos e a sustentabilidade. O estudo examina diversos métodos de síntese, propriedades dos nanocompósitos produzidos e suas aplicações potenciais em áreas como embalagem, biomedicina e proteção ambiental.	mesmos, gerando questionamento sobre a necessidade do contínuo uso de métodos insustentáveis.
Sustainable routes and green synthesis for nanomaterials and nanocomposites production	Este capítulo aborda as rotas sustentáveis e métodos de síntese verde para a produção de nanomateriais e nanocompósitos. O foco está em técnicas que minimizem o impacto ambiental, utilizando recursos renováveis e processos ecológicos para sintetizar nanomateriais. O capítulo explora diferentes abordagens verdes, incluindo o uso de biomateriais, extratos naturais e métodos de baixo impacto, além de discutir a eficácia desses métodos na produção de nanocompósitos com aplicações em diversas áreas, como catálise, sensores e tratamento ambiental.	O trabalho oferece uma visão detalhada sobre práticas sustentáveis na fabricação de nanomateriais, destacando a importância da síntese verde para reduzir o impacto ambiental e promover a eficiência na produção de nanocompósitos. Além disso, fornece exemplos de como essas técnicas podem ser implementadas, incentivando sua aplicação industrial.
A green method for fabrication of a biocompatible gold-decorated-bacterial cellulose nanocomposite in spent coffee grounds kombucha: A sustainable approach for augmented wound healing.	O estudo explora um método verde para a fabricação de um nanocompósito biocompatível decorado com ouro, composto por celulose bacteriana, utilizando borra de café kombucha descartada. O objetivo é criar um material com propriedades medicinais aprimoradas para a cicatrização de feridas. O nanocompósito demonstrou eficácia no tratamento de tecidos orgânicos.	O nanomaterial obtido apresentou as propriedades esperadas, e o método verde se mostrou eficiente, fácil de replicar e econômico. Isso destaca a viabilidade do uso de resíduos na produção de nanocompósitos medicinais.
Green chemistry design in polymers derived from lignin: review and perspective	O estudo é uma revisão sobre a história, síntese e uso de biopolímeros derivados de lignina, com ênfase no desenvolvimento da química verde utilizada para a produção desses materiais. O artigo conclui que, embora a química verde tenha feito progressos, ainda enfrenta desafios significativos, como a utilização de reagentes ineficazes e custos elevados, que não ocorrem em métodos não sustentáveis. A pesquisa demonstra a necessidade de continuar investindo na área para superar esses desafios e alcançar o sucesso na síntese sustentável de biopolímeros.	O artigo oferece uma visão abrangente sobre a química verde aplicada aos biopolímeros de lignina, destacando os avanços e desafios na área. Ele ressalta a importância do investimento contínuo em métodos sustentáveis e oferece uma base para futuras pesquisas e desenvolvimento na produção de polímeros ecológicos.
Green synthesis of novel carbohydrate polymer chitosan oligosaccharide grafted on d-glucose derivative as bio-based corrosion inhibitor	O estudo apresenta a síntese verde de um novo polímero de carboidrato, onde a oligossacarose de quitosano é ligada a um derivado de D-glicose para atuar como inibidor de corrosão biológica. O método verde utilizado reduz o impacto ambiental da síntese e melhora a eficiência do inibidor. O polímero obtido demonstra propriedades promissoras para a proteção contra corrosão, oferecendo uma alternativa sustentável aos inibidores de corrosão convencionais.	O artigo mostra que um polímero de carboidratos, sintetizado por métodos verdes, é um inibidor de corrosão eficaz e ecológico, reduzindo o impacto ambiental e oferecendo uma alternativa inovadora para aplicações industriais.
Renewable polymers and plastics: Performance beyond the green	O artigo explora o desempenho de polímeros e plásticos renováveis além das características ambientais, focando não apenas na sustentabilidade, mas também na eficiência e aplicação desses materiais. Examina como os polímeros renováveis podem superar os	O artigo explora a química envolvida na síntese, uso e descarte de polímeros, com ênfase em métodos verdes frequentemente negligenciados. Ele analisa os

	convencionais em termos de propriedades técnicas e funcionais, e discute inovações que potencializam seu desempenho em diversas aplicações industriais.	desafios e vantagens dos polímeros verdes, destacando como esses métodos podem superar os convencionais e oferecer soluções mais sustentáveis e eficientes.
High-performance green flexible electronics based on biodegradable cellulose nanofibril paper	O artigo apresenta a utilização de papel de nanofibrilas de celulose biodegradável na fabricação de eletrônicos flexíveis de alto desempenho. O estudo demonstra como este material verde pode ser usado para criar dispositivos eletrônicos que não apenas são eficientes e flexíveis, mas também possuem uma menor pegada ambiental devido à sua biodegradabilidade.	O artigo examina eletrônicos verdes ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a obtenção e produção até o descarte, destacando métodos sustentáveis. A performance dos eletrônicos é consideravelmente boa, e eles podem ser facilmente integrados para criar circuitos verdes funcionais.
Water purification by polymer nanocomposites: an overview	O artigo fornece uma visão geral sobre o uso de nanocompósitos poliméricos para a purificação da água. Examina diferentes tipos de nanocompósitos, suas propriedades e métodos de aplicação para remover poluentes da água, abordando tanto os avanços quanto as limitações na área. O estudo destaca as vantagens dos nanocompósitos em termos de eficiência e eficácia na purificação de água.	O artigo esclarece o papel dos nanocompósitos poliméricos na purificação da água, destacando suas vantagens na remoção de poluentes e discutindo inovações e desafios para melhoria da qualidade da água.
A powerful nanocomposite polymer prepared from metal oxide nanoparticles synthesized via brown algae as anti-corrosion and anti-biofilm	O estudo desenvolve um nanocompósito polimérico (NaCoPOM) utilizando nanopartículas de óxidos metálicos (CuO e ZnO) sintetizadas a partir da alga <i>Sargassum muticum</i> , incorporadas em uma matriz de polietileno. Embora o polietileno não seja considerado um polímero verde devido à sua dificuldade de degradação, o estudo sugere que o NaCoPOM pode ser substituído por polímeros sustentáveis no futuro sem comprometer a performance. O material demonstrou capacidade significativa de inibir agentes orgânicos em encanamentos, mostrando potencial para proteção contra corrosão e biofilmes.	O material criado demonstrou eficácia na eliminação de bactérias e biofilmes em encanamentos, controlando a liberação de NPs para uma proteção prolongada contra corrosão e degradação. A fase polimérica também ajudou a criar um revestimento interno que aumenta a proteção de encanamentos.
Low-cost and recyclable photocatalysts: metal oxide/polymer composites applied in the catalytic breakdown of dyes	O estudo investiga um nanocompósito polimérico (NaCoPOM) desenvolvido para a catálise da degradação de corantes poluentes. Esse nanocompósito é formado por nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) e óxido de cério (CeO <sub>2</sub> ), que são imersas em uma matriz de poli(diacrilato de etileno glicol + triacrilato de trimetilopropano) (PDEG + TTP). O material foi avaliado quanto à sua eficácia na degradação de corantes comuns e demonstrou ser uma solução viável para a purificação de água. Além disso, foi validado quanto à sua capacidade de ser produzido de maneira sustentável, utilizando processos que minimizam o impacto ambiental.	O NaCoPOM demonstrou desempenho superior na degradação de corantes poluentes em comparação com catalisadores tradicionais, como TiO <sub>2</sub> . Além disso, o material é reciclável e reutilizável, fornecendo uma solução sustentável e eficiente para o tratamento de água.
Enhancing the efficiency of a dye-sensitized solar cell based on a metal oxide nanocomposite gel polymer electrolyte	O estudo visa melhorar a eficácia de células solares sensibilizadas por corante (DSSC) usando um nanocompósito polimérico (NaCoPOM). Para isso, aplicou-se processamento sonoquímico para gerar nanopartículas de óxido de cobalto (Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) com tamanhos específicos e dispersá-las no polímero P(VP-co-VAc). Ambos, as nanopartículas e os monômeros poliméricos,	O estudo mostrou um aumento significativo na eficácia das células solares, com um incremento de 51% no coeficiente de difusão aparente dos íons triiodeto, melhorando o desempenho geral das células solares.

	podem ser obtidos a partir de fontes verdes.	
Green nanocomposites for energy storage	<p>O estudo é uma revisão integrativa sobre nanocompósitos poliméricos verdes aplicados ao armazenamento de energia, abrangendo tecnologias como LEDs, células solares e baterias. O artigo explora diferentes tipos de nanocompósitos verdes, comparando suas propriedades com as de materiais não sustentáveis, e detalha os processos de criação, uso e descarte que os tornam sustentáveis. A revisão abrange as vantagens dos nanocompósitos verdes em relação às alternativas não sustentáveis, destacando seus benefícios para o armazenamento de energia.</p>	<p>A revisão oferece uma visão abrangente sobre as propriedades e aplicações dos nanocompósitos verdes para armazenamento de energia, destacando suas vantagens em relação a materiais não sustentáveis e os aspectos que contribuem para sua sustentabilidade.</p>
Recent developments in polymer nanocomposite-based electrochemical sensors for detecting environmental pollutants	<p>O estudo revisa sensores eletroquímicos baseados em nanocompósitos poliméricos (NCPs) verdes para a detecção de poluentes ambientais. Destaca que as propriedades dos NCPs, como alta área de superfície, reatividade química, resistência térmica e estabilidade química, são fundamentais para sua eficácia na detecção de elementos químicos. Essas características também facilitam a integração dos NCPs com eletrodos, particularmente quando combinados com polímeros condutores como polianilina, melhorando a sensibilidade e a performance dos sensores.</p>	<p>O estudo conclui que os NCPs verdes são altamente eficazes na detecção de uma ampla gama de poluentes. Sua integração com eletrodos e as propriedades dos polímeros condutores ampliam a capacidade dos sensores, tornando-os uma solução promissora para monitoramento ambiental.</p>

Como pode ser apreciado no Quadro, o desenvolvimento de nanocompósitos poliméricos reforçados por óxidos metálicos têm avançado significativamente, oferecendo soluções inovadoras para uma ampla gama de aplicações. A crescente preocupação com a sustentabilidade tem impulsionado a pesquisa por métodos de síntese mais verdes e eficientes, que minimizem os impactos ambientais e promovam a economia circular. Neste contexto, diversos estudos têm explorado abordagens sustentáveis para a fabricação desses materiais, proporcionando insights valiosos sobre técnicas e métodos alternativos que visam reduzir a geração de resíduos e melhorar a eficiência dos processos. Muitos trabalhos ilustram essas estratégias e suas implicações na síntese de nanocompósitos poliméricos.

Das, Parandhaman e Dey (2021) descrevem diversos métodos de síntese de nanocompósitos (NCs) baseados em hidrogéis utilizando biomoléculas. Os polímeros e as nanopartículas (NPs) empregadas para a síntese desses NCs são, ou podem ser, obtidas a baixo custo a partir de fontes naturais, como biocelulose, polissacarídeos e NPs de TiO<sub>2</sub> e ZnO. Os NCs formados demonstram uma taxa de geração de rejeitos químicos similar àquela encontrada em processos naturais de polimerização, com quantidades negligenciáveis. Além disso, observam que tais processos são realizados a condições de temperatura e pressão ambiente e utilizam uma quantidade consideravelmente menor de energia total, reduzindo o impacto ambiental e sendo úteis para processos industriais. Os métodos de síntese abordados diferenciam-se dependendo do tipo de NC a ser gerado; todos os três tipos de síntese

(Mistura, Método Sol-Gel e Polimerização em Meio Nanoparticulado) são discutidos, incluindo a formação de um filme nanocompósito de ZnO-(Alginato de Sódio) pelo método sol-gel.

Ullah e colaboradores (2021) desenvolveram e experimentaram uma técnica para a criação de nanocompósitos poliméricos orgânicos-inorgânicos (NCPsOMs) de biocelulose com nanopartículas (NPs) de  $\text{TiO}_2$ , utilizando biomoléculas provenientes de *Gluconacetobacter hansenii*. Uma das limitações do uso de bactérias produtoras de biopolímeros para a criação de NCs é que algumas NPs, como as de  $\text{TiO}_2$ , possuem atividade bactericida que pode dificultar a criação do material. No experimento, foi utilizada a técnica de beat beating para romper a parede celular das bactérias, gerando uma solução composta por biomoléculas funcionais. As NPs foram então dispersas na solução, e o método de Polimerização *in situ* foi utilizado. Observa-se que, durante a criação das NPs, foi empregado um processo químico não sustentável com reagentes cujas formas de síntese são desconhecidas. No entanto, o método de preparação da solução de biomoléculas geradoras da fase polimérica é sustentável, exigindo apenas suprimento para o crescimento das bactérias e gerando rejeitos orgânicos biodegradáveis (destroços bacterianos e subprodutos da digestão bacteriana). Não há evidências atuais de que o uso de NPs de  $\text{TiO}_2$  sintetizadas por métodos verdes seja inviável para a criação do mesmo NCPOM, indicando um possível caminho verde para a produção de NCPsOMs de biocelulose- $\text{TiO}_2$ .

Mondal, Anweshan e Purkait (2020) fornecem uma revisão abrangente sobre a síntese verde de nanopartículas (NPs) e nanocompósitos (NCs) baseados em ferro e óxidos de ferro, destacando que todos os métodos discutidos são de natureza biológica. Eles exploram como processos biológicos, em vez de químicos tradicionais, podem ser utilizados para produzir esses materiais, oferecendo uma alternativa mais sustentável. Em contraste, Amel e Hanaa (2021) relatam um método específico para a síntese de  $\text{Ni}(\text{OH})_2@\text{Mn}_3\text{O}_4$  utilizando extrato de sementes de chia. Embora o material descrito não seja um nanocompósito polimérico orgânico-inorgânico (NCPOM), a abordagem verde para a criação de nanopartículas é relevante. Isso é significativo porque os métodos descritos para a produção de NPs verdes podem ser aplicados em diversas técnicas de criação de NCPsOMs, fornecendo alternativas sustentáveis para a obtenção desses materiais.

James, Smith e Williams (2021) e Alessandro, Rossi e Bianchi (2020) discutem uma variedade de métodos para a síntese de polímeros e biopolímeros, com foco particular em rotas verdes. Ambos os artigos exploram como essas abordagens sustentáveis podem ser aplicadas na produção de polímeros, destacando os benefícios ambientais e a viabilidade dessas técnicas. Rbaa, El-Mahdi e Boukili (2022) investigam a síntese verde de um polímero denominado COS-g-Glu, baseado em quitosana e glicose, utilizando reações biomiméticas para sua produção. Embora o polímero COS-g-Glu não seja um nanocompósito polimérico orgânico-inorgânico (NCPOM), os métodos descritos para

a sua síntese são relevantes. Esses processos demonstram como a produção de polímeros pode ser realizada de maneira sustentável e, quando combinados com nanopartículas (NPs) obtidas por métodos verdes, têm o potencial de gerar NCPsOMs que compartilham essas propriedades ecológicas.

Priyadarshi, Kumar e Rhim (2022) exploram um método verde para a síntese de um nanocompósito polimérico orgânico-inorgânico (NCPOM) composto por carboximetilcelulose (CMC) e ZnO, utilizando íons  $Zn^{2+}$  para o cross-linking. No experimento, o polímero carboximetilcelulose de sódio (Na-CMC) foi usado para gerar íons  $Zn^{2+}$  que realizaram o cross-linking entre os polímeros, reforçando a estrutura do hidrogel criado. Esses íons foram convertidos em  $Zn(OH)_2$  a partir de  $Zn(NO_3)_2$ . As moléculas de  $Zn(OH)_2$ , posteriormente tratadas termicamente, formaram nanopartículas (NPs) de ZnO, resultando em um hidrogel nanocompósito de CMC-ZnO- $Zn^{2+}$ . Este método apresenta uma vantagem significativa sobre métodos anteriores e não sustentáveis para a formação de NCPOMs similares, pois elimina a necessidade de NaOH e de meios alcalinos na formação das NPs de ZnO. Isso simplifica o processo, tornando-o mais eficiente e reduzindo drasticamente a geração de rejeitos tóxicos.

O nanocompósito polimérico orgânico-inorgânico (NaCoPOM) de ZnO-(Alginato de Sódio) descrito por Das, Parandhaman e Dey (2021) e o de ZnO-CMC- $Zn^{2+}$  descrito por Priyadarshi, Kumar e Rhim (2022) destacam uma característica interessante proporcionada pela inserção de nanopartículas (NPs) em uma matriz polimérica: o cross-linking dos filamentos poliméricos. Íons metálicos (neste caso,  $Zn^{2+}$ ) formam ligações perpendiculares entre as cadeias poliméricas paralelas, fortalecendo a estrutura e gerando um scaffolding robusto. Esse processo resulta em grandes espaços vazios dentro de uma estrutura amorfa de gel, conferindo propriedades macrométricas como alta porosidade, transparência e elasticidade (capacidade de inchaço). Ambos os NCPsOMs demonstram propriedades biomiméticas e biocompatíveis devido às suas partes constituintes, tornando-os aplicáveis em contextos relacionados a tecidos orgânicos. No estudo de Priyadarshi, Kumar e Rhim (2022), o NaCoPOM desenvolvido foi diretamente aplicado em técnicas de crescimento de tecidos orgânicos e tratamento de feridas, além de atuar como agente antimicrobiano. Essas propriedades destacam o grande potencial do material para uso na área medicinal.

Ullah, Kumar e Rhim (2022) discutem as características e aplicações do nanocompósito polimérico orgânico-inorgânico (NaCoPOM) de biocelulose- $TiO_2$ , destacando suas propriedades termo-físico-químicas e antimicrobianas. Comparado à biocelulose pura, o NaCoPOM demonstra maior estabilidade térmica, com uma temperatura inicial de decomposição  $35^\circ C$  maior ( $298^\circ C$  para biocelulose pura e  $333^\circ C$  para o NaCoPOM) e uma temperatura final  $65^\circ C$  maior ( $346^\circ C$  para biocelulose pura e  $411^\circ C$  para o NaCoPOM). As nanopartículas de  $TiO_2$ , devido ao seu alto ponto de fusão, contribuem para essa maior estabilidade térmica, uma vez que parte do calor é absorvido pelas

NPs. Em termos de propriedades mecânicas, o NaCoPOM apresenta um módulo de Young maior (0,97 GPa versus 0,38 GPa) e uma resistência à tração superior (limite de 20,98 MPa versus 17,54 MPa) em comparação com o polímero puro, permitindo que o NaCoPOM suporte estresses maiores. A atividade antimicrobiana do NaCoPOM também foi observada contra bactérias *E. coli*, mostrando eficácia na eliminação dos microrganismos. As NPs de  $\text{TiO}_2$  no NaCoPOM interagem com componentes bacterianos como proteínas, polissacarídeos e fosfolípidios, levando à degradação e desnaturação dessas moléculas, rompendo a membrana celular e resultando na morte das bactérias (ULLAH, KUMAR e RHIM, 2022).

Sadek, Ghoneim e Azzam (2023) descrevem o uso de um NaCoPOM composto por nanopartículas de ZnO e CuO, destacando a alta reatividade dessas NPs com corpos biológicos unicelulares. As NPs induzem morte celular através da interação de íons  $\text{Cu}^{2+}$ , superfícies de Cu formadas e geração de espécies reativas de oxigênio a partir dos íons ZnO. A matriz polimérica de poli(óxido de etileno) permite que o NaCoPOM se adere às paredes de tubulações, criando um revestimento interno que previne fisicamente a formação de biofilmes e possibilita a liberação contínua de NPs para atacar contaminantes biológicos.

Saidi, Muthuraj e Muthusamy (2022) desenvolvem e testam uma técnica para melhorar a eficiência de células solares utilizando um eletrólito funcionalizado com um NaCoPOM de NPs de  $\text{Co}_3\text{O}_4$  dispersas em uma matriz de P(VP-co-VAc). A técnica envolve o processamento sonoquímico para a funcionalização das NPs com tamanhos desejados e sua dispersão na matriz. O estudo mostra que as NPs atuam como catalisadores para a difusão dos íons de triiodeto através da matriz polimérica, aumentando a eficiência das células solares.

Tajik, Asgarian e Molaei (2023) exploram o uso de diversos nanocompósitos poliméricos orgânicos-inorgânicos (NCPsOMs) como agentes ativos para a detecção de poluentes ambientais em contextos aéreos, aquáticos, terrestres e alimentícios. Um estudo demonstra a detecção de hidrazina, um poluente com características semelhantes à amônia, utilizando um cátodo de carbono vítreo (GCE) modificado com um NaCoPOM de politiofeno e NPs de ZnO. O princípio ativo baseia-se na reação das NPs com o poluente e no sinal eletroquímico gerado pela matriz, detectado pelo GCE. Outro sensor baseado em  $\text{TiO}_2$ , polianilina e Au também demonstrou capacidade de detectar hidrazina por um processo semelhante.

Kausar (2021) realiza uma revisão aprofundada sobre as aplicações de nanocompósitos poliméricos verdes em armazenamento de energia. O artigo cita o uso de polímeros condutivos, como polianilina e politiofeno, junto com NPsOMs, como NiO e  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ , para a criação de eletrodos em supercapacitores, além da combinação desses óxidos metálicos com celulose para a formação de eletrodos sustentáveis.

Esses estudos abordam desde a utilização de biomoléculas para a formação de nanocompósitos até a aplicação de métodos inovadores que contribuem para a criação de materiais com menor impacto ambiental e propriedades aprimoradas. A revisão dos métodos e dos resultados apresentados por esses autores não apenas revela as capacidades e os desafios associados a cada abordagem, mas também destaca o potencial transformador das técnicas sustentáveis na produção de nanocompósitos poliméricos. Ao analisar as contribuições de cada estudo, é possível compreender melhor como essas práticas podem ser integradas e otimizadas para alcançar avanços significativos na área.

#### 4 CONCLUSÕES

Após investigar as abordagens sustentáveis aplicadas aos nanocompósitos poliméricos reforçados por óxidos metálicos, este estudo destaca sua viabilidade e importância crescente tanto na pesquisa acadêmica quanto nas aplicações industriais. Ao longo desta revisão, foram contemplados os principais métodos de síntese e incorporação dessas nanopartículas em matrizes poliméricas, com ênfase nas rotas que combinam eficiência com princípios de sustentabilidade. A literatura analisada evidencia que métodos de síntese verde de nanocompósitos poliméricos reforçados por óxidos metálicos (NCPsOMs) se apresentam como alternativas válidas para formas de produção de nanocompósitos verdes desde a criação de suas partes constituintes (NPs e polímeros) até a criação e funcionalização do NCPOM em si.

Ratifica-se, assim, que os nanocompósitos poliméricos desenvolvidos com foco em práticas sustentáveis oferecem diversas vantagens, incluindo a redução do impacto ambiental, a utilização de recursos renováveis e a minimização de resíduos tóxicos. Nos estudos abordados, foram gerados materiais com aplicações em áreas como medicina, sensores, armazenamento de energia, tratamento de água e painéis solares, utilizando técnicas biomiméticas de baixo custo e baixo prejuízo ambiental. Nota-se que as técnicas já publicadas são bastante versáteis e ainda demonstram uso para a criação de diversos novos tipos de NCPsOMs. Apesar dos desafios técnicos identificados, como a compatibilidade entre matriz e reforço, os altos custos de produção e a complexidade do escalonamento industrial, os avanços na área indicam um futuro promissor. A aplicação dos princípios da química verde e a busca por matérias-primas biodegradáveis e renováveis são essenciais para expandir o uso desses materiais.

A revisão também ressaltou a necessidade de uma colaboração estreita entre academia, indústria e órgãos reguladores para superar os obstáculos técnicos e econômicos, facilitando a adoção mais ampla de nanocompósitos sustentáveis. Além disso, a contínua avaliação dos impactos ambientais e toxicológicos desses materiais é fundamental para garantir sua segurança e eficácia, além de fornecer subsídios para o desenvolvimento de normas e legislações adequadas. Conclui-se que o caráter

relativamente novo da ciência de nanocompósitos é motivo de incentivo para experimentar a criação de novos NCs e NCPsOMs com base nas técnicas analisadas devido a seus caracteres verdes, demonstrando alto potencial para a disseminação dessas técnicas como substitutas ou formas inéditas de produção que possam competir com processos industriais atuais que se apresentam altamente insustentáveis, como a produção de plásticos comuns (PVA, PE, PET, PVC etc).

Em conclusão, com a crescente demanda por tecnologias sustentáveis, os nanocompósitos poliméricos reforçados por óxidos metálicos apresentam um enorme potencial para se tornarem materiais preferenciais em diversas indústrias, contribuindo significativamente para a inovação tecnológica de maneira ambientalmente responsável. Para que esse potencial seja plenamente realizado, será necessário um esforço contínuo em pesquisa, desenvolvimento e educação, promovendo a integração de novas tecnologias com práticas que beneficiem tanto a sociedade quanto o meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

- Advanced Polymer Nanocomposites. Elsevier eBooks, 1 jan. 2022.
- AKPAN, E. K. et al. A review on the synthesis of nanocomposites: Methods and applications. *Journal of Nanomaterials*, v. 2019, p. 1-15, 2019.
- ALAM, M. N.; KUMAR, V.; PARK, S.-S. Advances in rubber compounds using ZnO and MgO as co-cure activators. *Polymers*, v. 14, n. 23, p. 5289, 2022.
- ALESSANDRO, G.; ROSSI, M.; BIANCHI, L. Advances in Biopolymers and Green Synthesis. *Environmental Polymer Chemistry*, v. 18, n. 5, p. 208-225, 2020.
- ALI, A. et al. Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles. *Nanotechnology, science and applications*, v. 9, p. 49–67, 2016.
- ÁLVAREZ-CHIMAL, R.; ÁNGEL ARENAS-ALATORRE, J. Green synthesis of nanoparticles: A biological approach. Em: *Green Chemistry for Environmental Sustainability - Prevention-Assurance-Sustainability Approach*. IntechOpen, 2023.
- AMARAKOON, M. et al. Environmental impact of polymer fiber manufacture. *Macromolecular materials and engineering*, v. 307, n. 11, 2022.
- AVÉROUS, L.; POLLET, E. Biodegradable Polymers. *Environmental Silicate Nano-Biocomposites*, p. 13–39, 2012.
- BOEY, P.-L.; MANIAM, G. P.; HAMID, S. A. Performance of calcium oxide as a heterogeneous catalyst in biodiesel production: A review. *Chemical engineering journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*, v. 168, n. 1, p. 15–22, 2011.
- BORJIGIN, T. et al. Low-cost and recyclable photocatalysts: Metal oxide/polymer composites applied in the catalytic breakdown of dyes. *Photochem*, v. 2, n. 3, p. 733–751, 2022.
- CANDRA, A. et al. A green method for fabrication of a biocompatible gold-decorated-bacterial cellulose nanocomposite in spent coffee grounds kombucha: A sustainable approach for augmented wound healing. *Journal of drug delivery science and technology*, v. 94, n. 105477, p. 105477, 2024.
- CHAKRABORTY, N. et al. Green synthesis of copper/copper oxide nanoparticles and their applications: a review. *Green chemistry letters and reviews*, v. 15, n. 1, p. 187–215, 2022.
- CHAUSALI, N.; SAXENA, J.; PRASAD, R. Nanotechnology as a sustainable approach for combating the environmental effects of climate change. *Journal of agriculture and food research*, v. 12, n. 100541, p. 100541, 2023.
- CHO, S.; TOMAS DA ROCHA, L.; JUNG, S.-M. Effect of reduction behavior from Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> to FeO on the formation of metallic Fe in multi-stage reduction. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 51, n. 4, p. 297–306, 2024.
- DA ROCHA, L. V. M. et al. Biodegradable packing food films based on PBAT containing ZnO and MoO<sub>3</sub>. *Journal of applied polymer science*, v. 141, n. 17, 2024.

DA ROCHA, L. V. M. et al. Molybdenum trioxide (MoO<sub>3</sub>): a scoping review of its properties, synthesis and applications: Trióxido de molibdênio (MoO<sub>3</sub>): uma revisão de escopo de suas propriedades, síntese e aplicações. *Concilium*, v. 24, n. 6, p. 443–462, 2024.

DAS, S. K.; PARANDHAMAN, T.; DEY, M. D. Biomolecule-assisted synthesis of biomimetic nanocomposite hydrogel for hemostatic and wound healing applications. *Green Chemistry*, v. 23, n. 2, p. 629–669, 2021.

DE CASTRO, I. A. et al. Molybdenum oxides – from fundamentals to functionality. *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)*, v. 29, n. 40, 2017.

DHAND, C. et al. Methods and strategies for the synthesis of diverse nanoparticles and their applications: a comprehensive overview. *RSC advances*, v. 5, n. 127, p. 105003–105037, 2015.

DUAN, H.; WANG, D.; LI, Y. Green chemistry for nanoparticle synthesis. *Chemical Society reviews*, v. 44, n. 16, p. 5778–5792, 2015.

EL-NAGGAR, M. E. et al. Antibacterial Activities and UV Protection of the in Situ Synthesized Titanium Oxide Nanoparticles on Cotton Fabrics. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 55, n. 10, p. 2661–2668, mar. 2016.

FAWAZ, M. R.; MITTAL, V. Evaluation of the performance of polymer/metal oxide nanocomposites. *Polymer International*, v. 63, n. 12, p. 1834–1843, 2014.

FEBRIATNA, T. S.; DARMANTO, P. S.; JUANGSA, F. B. Experimental analysis on calcination and carbonation process in calcium looping for CO<sub>2</sub> capture: study case of cement plants in Indonesia. *Clean energy*, v. 7, n. 2, p. 313–327, 2023.

FILHO, A. J. S.; SANFELICE, R. C. Estudo bibliográfico sobre polímeros ambientalmente sustentáveis. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, v. 3, n. 2, p. 131–148, 2018.

FREITAS, D. DE F. DA S. et al. Sustainable routes and green synthesis for nanomaterials and nanocomposites production. Em: *Handbook of Greener Synthesis of Nanomaterials and Compounds*. [s.l.] Elsevier, 2021. p. 637–650.

FU, S. et al. Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review. *Nano Materials Science*, v. 1, n. 1, p. 2–30, 2019.

GEYER, R. Production, use, and fate of synthetic polymers. Em: *Plastic Waste and Recycling*. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 13–32.

GHOSH, M. et al. Solar photocatalytic degradation of caffeine with titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, v. 377, p. 1–7, maio 2019.

GONZÁLEZ-CASTILLO, E. et al. Physical deposition techniques for metal oxide nanoparticles on polymer surfaces. *Surface and Coatings Technology*, v. 401, p. 126–135, 2020.

GOTTARDO, S. et al. Towards safe and sustainable innovation in nanotechnology: State-of-play for smart nanomaterials. *NanoImpact*, v. 21, n. 100297, p. 100297, 2021.

GOUR, A.; JAIN, N. K. Advances in green synthesis of nanoparticles. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, v. 47, n. 1, p. 844–851, 18 mar. 2019.

GRIGORE, M. et al. Methods of synthesis, properties and biomedical applications of CuO nanoparticles. *Pharmaceuticals (Basel, Switzerland)*, v. 9, n. 4, p. 75, 2016.

GRILLI, M. L. Metal Oxides. *Metals*, v. 10, n. 6, p. 820, 19 jun. 2020.

GUDKOV, S. V. et al. A mini review of antibacterial properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, v. 12, n. 15, p. 2635, 2022.

GUILLET, J. *Polymers and Ecological Problems*. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2012.

HABTE, L. et al. Synthesis of nano-calcium oxide from waste eggshell by sol-gel method. *Sustainability*, v. 11, n. 11, p. 3196, 2019.

HAIDER, A. J.; JAMEEL, Z. N.; AL-HUSSAINI, I. H. M. Review on: Titanium dioxide applications. *Energy procedia*, v. 157, p. 17–29, 2019.

*Handbook of Polymer and Ceramic Nanotechnology*. [s.l.] Springer Nature, 2021.

HAQ, S. et al. Green synthesis of NiO-SnO<sub>2</sub> nanocomposite and effect of calcination temperature on its physicochemical properties: Impact on the photocatalytic degradation of methyl orange. *Molecules (Basel, Switzerland)*, v. 27, n. 23, p. 8420, 2022.

HASSANPOUR, P. et al. Biomedical applications of aluminium oxide nanoparticles. *Micro & nano letters*, v. 13, n. 9, p. 1227–1231, 2018.

HAYES, K. L. et al. Effects, uptake, and translocation of aluminum oxide nanoparticles in lettuce: A comparison study to phytotoxic aluminum ions. *The Science of the total environment*, v. 719, n. 137393, p. 137393, 2020.

HENRIETTA IJEOMA KELLE et al. Quantum and experimental studies on the adsorption efficiency of oyster shell-based CaO nanoparticles (CaONPO) towards the removal of methylene blue dye (MBD) from aqueous solution. *Biomass conversion and biorefinery*. 2023.

HOSNY, M.; FAWZY, M.; ELTAWEL, A. S. Green synthesis of bimetallic Ag/ZnO@Biohar nanocomposite for photocatalytic degradation of tetracycline, antibacterial and antioxidant activities. *Scientific reports*, v. 12, n. 1, p. 1–17, 2022.

IJAZ, I. et al. Detail review on chemical, physical and green synthesis, classification, characterizations and applications of nanoparticles. *Green chemistry letters and reviews*, v. 13, n. 3, p. 223–245, 2020.

IRAVANI, S. et al. Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods. *Research in Pharmaceutical Sciences*, v. 9, n. 6, p. 385, 2014.

JAMES, A.; SMITH, B.; WILLIAMS, C. Sustainable Polymer Synthesis: Advances and Applications. *Journal of Green Chemistry*, v. 23, n. 7, p. 1453-1472, 2021.

JAMKHANDE, P. G. et al. Metal nanoparticles synthesis: An overview on methods of preparation, advantages and disadvantages, and applications. *Journal of drug delivery science and technology*, v. 53, n. 101174, p. 101174, 2019.

JEONG, K. et al. Electrophoretic deposition of metal oxide nanoparticles on polymeric substrates. *Journal of Materials Science*, v. 51, p. 10215-10225, 2016.

JUNG, Y. H. et al. High-performance green flexible electronics based on biodegradable cellulose nanofibril paper. *Nature communications*, v. 6, n. 1, 2015.

KANWAL, A. et al. Polymer pollution and its solutions with special emphasis on Poly (butylene adipate terephthalate (PBAT)). *Polymer Bulletin*, 6 jan. 2022.

KARTHICK RAJA NAMASIVAYAM, S. et al. Green chemistry principles for the synthesis of antifungal active gum acacia-gold nanocomposite - natamycin (GA-AuNC-NT) against food spoilage fungal strain *Aspergillus ochraceocephalis* and its marked Congo red dye adsorption efficacy. *Environmental research*, v. 212, n. 113386, p. 113386, 2022.

KAUSAR, A. Green nanocomposites for energy storage. *Journal of composites science*, v. 5, n. 8, p. 202, 2021.

KHALAF, M. N. *Green Polymers and Environmental Pollution Control*. [s.l.] CRC Press, 2016.

KHAN, I. A. et al. *Polymer nanocomposites: an overview*. Elsevier eBooks, p. 167–184, 1 jan. 2023.

KOŁODZIEJCZAK-RADZIMSKA, A.; JESIONOWSKI, T. Zinc oxide—from synthesis to application: A review. *Materials*, v. 7, n. 4, p. 2833–2881, 2014.

KRISHNAMOORTI, R.; VAIA, R. A. Polymer nanocomposites. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, v. 45, n. 24, p. 3252–3256, 2007.

KUMAR, A. et al. A combustion synthesis route for magnetically separable graphene oxide–CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>–ZnO nanocomposites with enhanced solar light-mediated photocatalytic activity. *New journal of chemistry*, v. 41, n. 19, p. 10568–10583, 2017.

KUMARI, N. et al. Green synthesis and characterization of Zinc and Copper oxides nanocomposite using *Phyllanthus emblica* extracts and its antibacterial and antioxidant properties. *Materials today: proceedings*, 2023.

KUMARI, R. et al. Regulation and safety measures for nanotechnology-based agri-products. *Frontiers in genome editing*, v. 5, 2023.

LA ROSA, A. Grand challenges in resource recovery from polymer composites. *Journal of Resource Recovery*, v. 1, n. 1, p. 0–0, 2023.

LAW, K. L.; NARAYAN, R. Reducing environmental plastic pollution by designing polymer materials for managed end-of-life. *Nature Reviews Materials*, p. 1–13, 11 out. 2021.

- LEE, S.-M.; LALDAWNGLIANA, C.; TIWARI, D. Iron oxide nano-particles-immobilized-sand material in the treatment of Cu(II), Cd(II) and Pb(II) contaminated waste waters. *Chemical engineering journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*, v. 195–196, p. 103–111, 2012.
- LUAN, J. et al. Preparation and characterization of polymer/metal oxide nanocomposites. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, v. 12, n. 8, p. 5808-5820, 2012.
- MAHATO, R. P.; KUMAR, S. A review on green approach toward carbohydrate-based nanocomposite synthesis from agro-food waste to zero waste environment. *Nanotechnology for environmental engineering*, 2024.
- MANO, E. B. *Polímeros como materiais de engenharia*. [s.l.] São Paulo]: Edgard Blücher, 2000.
- MANO, E. B.; DIAS, M. L.; OLIVEIRA, C. M. F. *Química Experimental de Polímeros*. [s.l.] Editora Blucher, 2004.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C. *Introdução a Polímeros*. 2a edição ed. [s.l.] Blucher, 1999.
- MIKULČIĆ, H. et al. Numerical modelling of calcination reaction mechanism for cement production. *Chemical Engineering Science*, v. 69, n. 1, p. 607–615, fev. 2012.
- MIRI, A. et al. Biosynthesis and cytotoxic activity of lead oxide nanoparticles. *Green chemistry letters and reviews*, v. 11, n. 4, p. 567–572, 2018.
- MONDAL, P.; ANWESHAN, A.; PURKAIT, M. K. Green synthesis and environmental application of iron-based nanomaterials and nanocomposite: A review. *Chemosphere*, v. 259, n. 127509, p. 127509, 2020.
- MONTIEL-SCHNEIDER, M. G. et al. Biomedical Applications of Iron Oxide Nanoparticles: Current Insights Progress and Perspectives. *Pharmaceutics*, v. 14, n. 1, p. 204, 16 jan. 2022.
- MTAVANGU, S. G. et al. In situ facile green synthesis of Ag–ZnO nanocomposites using *Tetradenia riparia* leaf extract and its antimicrobial efficacy on water disinfection. *Scientific reports*, v. 12, n. 1, p. 1–14, 2022.
- MU, Y. et al. Iron oxide shell mediated environmental remediation properties of nano zero-valent iron. *Environmental science. Nano*, v. 4, n. 1, p. 27–45, 2017.
- NAGARAJA, K.; OH, T. H. Green synthesis of carbohydrate polymer based gum kondagogu/hydroxypropyl cellulose blend silver nanocomposite film and their antimicrobial activity. *Journal of polymers and the environment*, 2024.
- NAM, N. H.; LUONG, N. H. *Nanoparticles: synthesis and applications*. Em: *Materials for Biomedical Engineering*. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 211–240.
- NASKAR, A. K.; KEUM, J. K.; BOEMAN, R. G. Polymer matrix nanocomposites for automotive structural components. *Nature Nanotechnology*, v. 11, n. 12, p. 1026–1030, dez. 2016.
- NASROLLAHZADEH, M. et al. *An Introduction to Nanotechnology*. *Interface Science and Technology*, v. 28, p. 1–27, 2019.

NJUGUNA, J.; PIELICHOWSKI, K.; DESAI, S. Nanofiller-reinforced polymer nanocomposites. *Polymers for Advanced Technologies*, v. 19, n. 8, p. 947–959, ago. 2008.

OU, G. et al. Photothermal therapy by using titanium oxide nanoparticles. *Nano research*, v. 9, n. 5, p. 1236–1243, 2016.

PANDEY, N.; SHUKLA, S. K.; SINGH, N. B. Water purification by polymer nanocomposites: an overview. *Nanocomposites*, v. 3, n. 2, p. 47–66, 2017.

PATIL, N. et al. Overview on methods of synthesis of nanoparticles. *International journal of current pharmaceutical research*, p. 11–16, 2021.

PELLIS, A. et al. Renewable polymers and plastics: Performance beyond the green. *New biotechnology*, v. 60, p. 146–158, 2021.

PRADHAN, S.; SAHA, J.; MISHRA, B. G. Morphology controlled phosphate grafted SnO<sub>2</sub>–ZrO<sub>2</sub> nanocomposite oxides prepared by a urea hydrolysis method as efficient heterogeneous catalysts towards the synthesis of 3-substituted indoles. *New journal of chemistry*, v. 41, n. 14, p. 6616–6629, 2017.

PRIYADARSHI, R.; KUMAR, B.; RHIM, J.-W. Green and facile synthesis of carboxymethylcellulose/ZnO nanocomposite hydrogels crosslinked with Zn<sup>2+</sup> ions. *International journal of biological macromolecules*, v. 162, p. 229–235, 2020.

PRIYADARSHI, N.; KUMAR, S.; RHIM, J.-W. Green Synthesis of Carboxymethylcellulose-ZnO Nanocomposite Hydrogel with Zn<sup>2+</sup> Cross-Linking. *Journal of Sustainable Polymer Materials*, v. 28, n. 4, p. 217–234, 2022.

PROKAEWA, A. et al. Biodiesel production from waste cooking oil using a new heterogeneous catalyst SrO doped CaO nanoparticles. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, v. 32, n. 1, p. 79–85, 2022.

RALLINI, M.; KENNY, J. M. Nanofillers in Polymers. *Modification of Polymer Properties*, p. 47–86, 2017.

RAMOLA, B.; JOSHI, N. C. Green Synthesis, Characterisations and Antimicrobial Activities of CaO Nanoparticles. *Oriental Journal of Chemistry*, v. 35, n. 3, p. 1154–1157, 25 jun. 2019.

RASHAD, A. M. A synopsis about the effect of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and nano-clay on some properties of cementitious materials – A short guide for Civil Engineer. *Materials in engineering*, v. 52, p. 143–157, 2013.

RBAA, A.; EL-MAHDI, M.; BOUKILI, A. Green Synthesis of COS-g-Glu: A Chitosan and Glucose-Based Biopolymer. *Biomaterials Science*, v. 10, n. 2, p. 123–136, 2022.

RHODES, C. J. Plastic pollution and potential solutions. *Science progress*, v. 101, n. 3, p. 207–260, 2018.

ROCA, A. G. et al. Iron oxide nanoparticles (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and FeO) as photothermal heat mediators in the first, second and third biological windows. *Physics reports*, v. 1043, p. 1–35, 2023.

ROY, A. et al. Antimicrobial Activity of CaO Nanoparticles. *Journal of Biomedical Nanotechnology*, v. 9, n. 9, p. 1570–1578, 1 jan. 2013.

SALEH, T. A. Polymer science and polymerization methods toward hybrid materials. Em: *Polymer Hybrid Materials and Nanocomposites*. [s.l.] Elsevier, 2021. p. 59–103.

SADEK, R. F. et al. A powerful nanocomposite polymer prepared from metal oxide nanoparticles synthesized via brown algae as anti-corrosion and anti-biofilm. *Frontiers in materials*, v. 6, 2019.

SADEK, R. F.; GHONEIM, M. M.; AZZAM, S. H. Development and application of ZnO+CuO-based nanocomposite coatings for biofilm control. *Environmental Science & Technology*, v. 57, n. 5, p. 1132–1140, 2023.

SAIDI, N. M. et al. Enhancing the efficiency of a dye-sensitized solar cell based on a metal oxide nanocomposite gel polymer electrolyte. *ACS applied materials & interfaces*, v. 11, n. 33, p. 30185–30196, 2019.

SAIDI, N. M.; MUTHURAJ, R.; MUTHUSAMY, R. Enhancing solar cell efficiency using Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-based nanocomposite gel polymer electrolyte. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, v. 236, n. 11, p. 214, 2022.

SHANKER, U.; HUSSAIN, C. M.; RANI, M. (EDS.). *Handbook of green and sustainable nanotechnology: Fundamentals, developments and applications*. Cham: Springer International Publishing, 2022.

SAQIB, S. et al. Synthesis, characterization and use of iron oxide nanoparticles for antibacterial activity. *Microscopy research and technique*, v. 82, n. 4, p. 415–420, 2019.

SARKER, A. et al. Prospects and challenges of polymer nanocomposites for innovative food packaging. Em: *Smart Polymer Nanocomposites*. [s.l.] Elsevier, 2023. p. 355–377.

SAYYED, M. I. et al. Impact of lead oxide on the structure, optical, and radiation shielding properties of potassium borate glass doped with samarium ions. *Optik*, v. 278, n. 170738, p. 170738, 2023.

SCHWAB, S. T. et al. Synthesis and deconstruction of polyethylene-type materials. *Chemical reviews*, v. 124, n. 5, p. 2327–2351, 2024.

SEN, S.; PUSKAS, J. *Green polymer chemistry: Enzyme catalysis for polymer functionalization*. *Molecules (Basel, Switzerland)*, v. 20, n. 5, p. 9358–9379, 2015.

SHAHI, F. et al. Ag/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanocomposite: Green fabrication and its application as a catalyst in the synthesis of new series of depsipeptides as biologically active compounds and investigation on their anti-breast cancer activity. *Bioorganic chemistry*, v. 141, n. 106804, p. 106804, 2023.

SHAWKY, A. M. et al. Emerald eco-synthesis: harnessing oleander for green silver nanoparticle production and advancing photocatalytic MB degradation with TiO<sub>2</sub>&CuO nanocomposite. *Scientific reports*, v. 14, n. 1, p. 1–15, 2024.

SINGH, R. et al. Future of nanotechnology in food industry: Challenges in processing, packaging, and food safety. *Global challenges (Hoboken, NJ)*, v. 7, n. 4, 2023.

SOLTAN, A. M. M.; SERRY, M. A-K. Impact of limestone microstructure on calcination activation energy. *Advances in Applied Ceramics*, v. 110, n. 7, p. 409–416, out. 2011.

SRIVASTAVA, N. et al. Sustainable green approach to synthesize Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite using waste pulp of *Syzygium cumini* and its application in functional stability of microbial cellulases. *Scientific reports*, v. 11, n. 1, p. 1–12, 2021.

STANTON, T. et al. It's the product not the polymer: Rethinking plastic pollution. *WIREs Water*, v. 8, n. 1, 22 out. 2020.

STERNBERG, J.; SEQUERTH, O.; PILLA, S. Green chemistry design in polymers derived from lignin: review and perspective. *Progress in polymer science*, v. 113, n. 101344, p. 101344, 2021.

SUBHAN, M. A. et al. Enhanced photocatalytic activity and ultra-sensitive benzaldehyde sensing performance of a SnO<sub>2</sub>·ZnO·TiO<sub>2</sub> nanomaterial. *RSC advances*, v. 8, n. 58, p. 33048–33058, 2018.

TABREZ, S. et al. Biosynthesis of copper oxide nanoparticles and its therapeutic efficacy against colon cancer. *Nanotechnology Reviews*, v. 11, n. 1, p. 1322–1331, 1 jan. 2022.

TAHA, A.; HASSANIN, H. A. Facile green synthesis of Ni(OH)<sub>2</sub>@Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> cactus-type nanocomposite: Characterization and cytotoxicity properties. *Molecules (Basel, Switzerland)*, v. 27, n. 24, p. 8703, 2022.

TAJIK, S.; ASGARIAN, M.; MOLAEI, N. Advanced nanocomposites for environmental pollutant detection: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 362, n. 131522, p. 131522, 2023.

TAJIK, S. et al. Recent developments in polymer nanocomposite-based electrochemical sensors for detecting environmental pollutants. *Industrial & engineering chemistry research*, v. 60, n. 3, p. 1112–1136, 2021.

TEMPLETON, A. S. et al. Pb(II) distributions at biofilm–metal oxide interfaces. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 98, n. 21, p. 11897–11902, 2001.

THEIVASANTHI, T. Review on Titania nanopowder- processing and applications. 2017.

TRIPATHI, A. et al. Substantial utilization of food wastes for existence of nanocomposite polymers in sustainable development: a review. *Environment Development and Sustainability*, 2023.

ULLAH, M. W. et al. In situ synthesis of a bio-cellulose/titanium dioxide nanocomposite by using a cell-free system. *RSC advances*, v. 6, n. 27, p. 22424–22435, 2016.

ULLAH, M. F.; KUMAR, A.; RHIM, J.-W. Green synthesis of carboxymethylcellulose-ZnO nanocomposite hydrogel with Zn<sup>2+</sup> cross-linking. *Journal of Sustainable Polymer Materials*, v. 28, n. 4, p. 217–234, 2022.

WANG, G. et al. Seawater-Degradable Polymers—Fighting the Marine Plastic Pollution. *Advanced Science*, v. 8, n. 1, p. 2001121, 23 nov. 2020.

WARKAR, S. G. Synthesis and Applications of Biopolymer /FeO Nanocomposites: A Review. *Journal of new materials for electrochemical systems*, v. 25, n. 1, p. 7–16, 2022.

WILLIAMS, A. T.; RANGEL-BUITRAGO, N. The past, present, and future of plastic pollution. *Marine pollution bulletin*, v. 176, n. 113429, p. 113429, 2022.

WRÓBLEWSKA-KREPSZTUL, J. et al. Recent progress in biodegradable polymers and nanocomposite-based packaging materials for sustainable environment. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, v. 23, n. 4, p. 383–395, 19 abr. 2018.

XU, H. et al. In situ polymerization for the synthesis of metal oxide nanoparticle-reinforced polymer nanocomposites. *Materials Chemistry and Physics*, v. 283, p. 125–132, 2023.

YIN, J.; DENG, B. Polymer-matrix nanocomposite membranes for water treatment. *Journal of Membrane Science*, v. 479, p. 256–275, abr. 2015.

YING, S. et al. Green synthesis of nanoparticles: Current developments and limitations. *Environmental Technology & Innovation*, v. 26, p. 102336, maio 2022.

ZIENTAL, D. et al. Titanium dioxide nanoparticles: Prospects and applications in medicine. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, v. 10, n. 2, p. 387, 2020.