

SÍNTESE ORGÂNICA NA PERSPECTIVA DA QUÍMICA VERDE

Caroline Rubi Cardoso¹

Chrystian Pauczinski Roque²

Matheus Volkmer³

Benhur Godoi⁴

Palavras-chave: Revisão; Sustentabilidade; Inteligência Artificial.

INTRODUÇÃO

A indústria química é um setor de extrema importância para a industrialização mundial, sendo fundamental para áreas essenciais, representando 7% do PIB mundial de acordo com o Conselho Internacional de Associações Químicas – ICCA (ICCA, 2019). Todavia, apesar de sua relevância, o setor químico é altamente associado à poluição e degradação ambiental, em razão de anos de negligência com a produção e descarte de resíduos, tornando acidentes químicos comuns por todo o mundo a partir da Segunda Guerra Mundial, quando ocorre o avanço do setor (Prado, 2003).

Assim, a partir da década de 90, movimentos em prol da sustentabilidade foram criados visando eliminar ou reduzir problemáticas ambientais advindas principalmente da geração e descarte incorreto de resíduos (Prado, 2003). Nesse contexto, a Química Verde é desenvolvida sendo uma abordagem de trabalho que perpassa a pesquisa, desenvolvimento e implementação de processos químicos e a síntese de novos produtos, visando reduzir ou eliminar o uso de reagentes tóxicos e a geração de resíduos nocivos ao meio ambiente e ao ser humano (Prado, 2003).

Dessa maneira, o objetivo desse trabalho é desenvolver um mapeamento sistemático a partir de trabalhos publicados recentemente buscando analisar como novos

¹ Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ambiente e Tecnologias Sustentáveis - PPGATS, Universidade Federal da Fronteira Sul, carol.rubi15@gmail.com.

² Acadêmico de Química Licenciatura, Universidade Federal da Fronteira Sul, chrystianroque1234@gmail.com.

³ Acadêmico de Engenharia Civil, Universidade Federal da Fronteira Sul, matheus.volkmer@estudante.uffs.edu.br.

⁴ Doutor em Química, Universidade Federal da Fronteira Sul, benhur.godoi@uffs.edu.br.

protocolos de síntese vêm sendo construídos dentro da perspectiva da química verde, visando as principais ações empregadas pelos pesquisadores.

DESENVOLVIMENTO

Para essa revisão foi utilizado o banco de dados Web of Science, utilizando os termos de busca “synthesis”, “green” e “green chemistry”, utilizadas em conjunto, indicando que fosse buscado apenas trabalhos que continham os termos nos resumos e palavras-chave indicadas pelos autores, entre os anos de 2024 a 2026. O levantamento de trabalhos levou a 192 artigos iniciais, após análise prévia dos títulos e resumos, foram selecionados 88 artigos que de fato estavam na temática síntese orgânica.

Para iniciar o mapeamento foi utilizada a inteligência artificial de acesso livre *Gemini Notebook* do Google para indicar como a química verde foi tratada em cada trabalho, sendo essa escolhida pois as respostas ficam restritas apenas as fontes enviadas, sem a possibilidade de buscar respostas fora do indicado, reduzindo, assim, possíveis erros e respostas genéricas.

Assim, os artigos foram enviados para a IA e o seguinte *prompt* foi utilizado: *faça uma tabela indicando todas as frentes envolvidas na química verde de cada trabalho enviado, inclusive se tiver mais que uma, coloque também os principais grupos orgânicos envolvidos em cada trabalho*. A partir da tabela gerada foi realizado o mapeamento sistemático, onde foi reunido e categorizado as principais metodologias e ações ligadas à química verde.

RESULTADOS, AVANÇOS E REFLEXÕES

Meio Reacional

O uso de solventes orgânicos tradicionais é um dos grandes problemas no desenvolvimento de protocolos de síntese verde, em razão da alta toxicidade dos mesmos para com o meio ambiente, assim, novos estudos buscam utilizar solventes alternativos de modo a substituir os tradicionais sem perder a eficiência e gerando resíduos menos tóxicos (Clarke *et al*, 2018).

Os principais solventes verdes utilizados em pesquisas recentes são água, etanol (Aggarwal, *et al.*, 2026) e os chamados solventes eutéticos profundos (Cheng *et al*, 2025), uma mistura de dois ou mais compostos sólidos, aceitor e um doador de ligação

de hidrogênio, que, quando combinados, formam um líquido a temperaturas amenas com baixa toxicidade, biodegradável e com capacidade de atuar também como catalisador, a partir da diminuição da energia de ativação em razão da interação entre os grupos funcionais e o solvente.

Outra maneira de reduzir a geração de resíduos é o uso de técnicas que não utilizam solventes como meio reacional como aquecimento por micro-ondas (Lorenzo *et al*, 2026), e a mecanoquímica, a partir de energia mecânica (Suut-Tuule *et al*, 2025), utilizando da moagem para causar a aproximação necessária para que a reação aconteça sem a necessidade de solventes.

Sistemas catalíticos

Catalisadores heterogêneos já são amplamente utilizados em metodologias de síntese orgânica, nos últimos anos, além do uso, os estudos também se concentram na recuperação e reciclagem dos catalisadores, buscando reutilizá-los em mais de um ciclo catalítico. Os metais de transição vêm sendo extensivamente utilizados em razão da sua alta seletividade e bom rendimento em condições brandas, em especial sais contendo cobre (Ribeiro *et al*, 2025) e ferro (Aggarwal *et al.*, 2026), devido a maior facilidade de recuperação, principalmente do ferro, que pode ser retirado a partir de separadores magnéticos.

Concomitantemente, estudos com catalisadores alternativos também vêm crescendo, sobretudo com biocatalisadores à base de enzimas (Meola *et al*, 2026), polímeros naturais (Houssaini *et al*, 2026) e as chamadas *whole-cell* (Li *et al*, 2025), técnica que utiliza micro-organismos vivos na catálise. Outro método alternativo é o uso de líquidos iônicos, ácidos de Bronsted, como meio reacional e catalisadores recicláveis, principalmente para substâncias carboniladas (Altalbawy *et al*, 2025).

Fontes de ativação

Fontes de ativação como micro-ondas (Lorenzo *et al*, 2026) e mecanoquímica (Suut-Tuule *et al*, 2025), já citados anteriormente, são importantes técnicas utilizadas para substituir o uso de solventes através da ativação por aquecimento e por energia mecânica, aumentando consideravelmente a velocidade da reação e rendimento do produto final.

Já a técnica de ultrassom é utilizada na ativação molecular a partir da geração de pontos localizados de alta temperatura e pressão, acelerando a reação em temperatura ambiente, sem necessidade de aquecimento (Bosak *et al*, 2026).

Eficiência de processos

Estratégias de planejamento experimental são de extrema importância para diminuir a quantidade de etapas, evitando desperdícios, possíveis contaminações e perdas. Técnicas como *one-pot*, onde os reagentes são combinados em um único recipiente de reação, sem a necessidade de isolar ou purificar intermediários, e reações multicomponentes (RMC), que reage todos os substratos simultaneamente, formando múltiplas ligações ao mesmo tempo, estão sendo amplamente utilizadas visando a diminuição de etapas reacionais, sendo comumente utilizadas em conjunto, como é o caso das reações de Biginelli (Savaliya *et al*, 2026).

CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROJEÇÕES

Assim, o mapeamento sistemático realizado demonstrou que os novos protocolos de síntese orgânica vêm sendo construídos sob uma perspectiva mais sustentável, em que os pesquisadores associam múltiplas frentes da Química Verde em um mesmo processo.

A análise dos trabalhos publicados entre 2024 e junho de 2026 revelou que as principais ações empregadas se concentram na substituição ou eliminação de meios reacionais tóxicos, uso de sistemas catalíticos recicláveis, ao uso de fontes de ativação para diminuir o tempo de reação, e consequentemente, o consumo de energia e à diminuição de etapas, por meio da aplicação de reações multicomponentes *one-pot*.

Dessa forma, foi possível evidenciar maior preocupação com desenvolvimento de protocolos mais sustentáveis para a síntese orgânica, por meio de estratégias integradas que otimizam a eficiência ao mesmo tempo em que reduzem o impacto ambiental e os riscos à saúde humana.

Financiamento: CNPq (Edital N° 08/PPGATS/UFFS/2026)

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, V. *et al*. Biomass derived magnetically separable heterogeneous iron nanocatalyst for reduction of nitroarenes and reductive amination of carbonyl

compounds under sustainable conditions. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 208, n.1, 2026.

ALTALBAWY, Farag M. A. *et al.* CuFe₂O₄@PDMA/Cu (II) MNPs: a novel nanomagnetic catalyst for the synthesis of dihydropyrano[3,2-c]chromenes. **Monatshefte fur chemie**, v. 156, n. 3, p. 315–327, 2025.

BOSAK, Natalia *et al.* Ultrasound-assisted synthesis and biological profiling of 1,3,5-triazine derivatives with antiproliferative activity in triple-negative breast cancer. **Current Issues in Molecular Biology**, v. 48, n. 3, 2026.

Chemical Industry Contributes \$5.7 Trillion to Global GDP and Supports 120 Million Jobs, New Report Shows. (2019). In International Council of Chemical Associations (ICCA). Disponível em: <https://icca-chem.org/news/chemical-industry-contributes-5-7-trillion-to-global-gdp-and-supports-120-million-jobs-new-report-shows/>. Acesso em: 15 de julho 2026.

CHENG, Wenqin *et al.* Performance optimization and mechanism of urea diacetic acid synthesis from glycine catalyzed by DES. **Materials Today. Communications**, v. 46, 2025.

CLARKE, Coby J. *et al.* Green and sustainable solvents in chemical processes. **Chemical Reviews**, v. 118, n. 2, p. 747–800, 2018.

HOUSSAINI, Jamal *et al.* Bio-extracted chitosan-functionalized Mg–Al bimetallic as an innovative hybrid catalyst for green and sustainable synthesis of bioactive molecules with medicinal potential. **Journal of Organometallic Chemistry**, v. 1050, 2026.

LI, Fengxi *et al.* Construction of chiral tricyclic structures using whole-cell biocatalysts: A strategy via the cyclopropanation of unsaturated π -systems. **Chinese Journal of Chemistry**, v. 43, n. 17, p. 2143–2150, 2025.

LORENZO, Fernando J. *et al.* A sustainable approach to 1,3-Oxathiolan-5-ones and their identification as a new anthelmintic scaffold. **Bioorganic & Medicinal Chemistry**, v. 140, 2026.

MEOLA, Domenico *et al.* Development of a sustainable biocatalytic process for geranyl benzoate production using immobilized lipase. **ChemistryOpen**, v. 15, n. 4, 2026.

PRADO, Alexandre G. S.. Química Verde, os Desafios da Química do Novo Milênio. **Química Nova**, [S. L.], v. 26, n. 5, p. 738-744, 2003.

RIBEIRO, Alyne Pereira de Oliveira *et al.* Copper molybdate-catalyzed esterification of levulinic acid: A heterogeneous approach for biofuel synthesis. **Catalysts (Basel, Switzerland)**, v. 15, n. 4, 2025.

SAVALIYA, Gautam P. *et al.* Design and synthesis of novel pyrimidine-based heterocyclic compounds and study their biological potency, molecular docking, ADMET properties, MD-simulation and DFT analysis. **Journal of Molecular Structure**, v. 1371, 2026

SUUT-TUULE, Elina *et al.* Scalable mechanochemical synthesis of biotin[6]uril. **ChemSusChem**, v. 18, n. 9, 2025.