

DESENVOLVIMENTO DE CATALISADORES VERDES PARA REAÇÕES SUSTENTÁVEIS

Ederson dos Santos Reis¹
Moisés Tales Madureira²

RESUMO: A Química Verde surgiu a partir da ideia de se realizar um desenvolvimento econômico e social que respeitasse a natureza, que tem sofrido com o progresso desmedido e despreocupado do homem. A principal ideia, ou pode-se chamar de objetivo, é que se concilie o respeito ao meio ambiente e a evolução do homem, agredindo o mínimo possível o meio ambiente. Nesse sentido, alinhado aos conceitos de sustentabilidade ambiental, ações proativas inspiram a realização de empreendimentos que reduzam ou evitem a utilização de materiais não renováveis. E no que se refere ao setor produtivo industrial e processos químicos, os catalisadores assumem papéis fundamentais. O presente trabalho, faz uma abordagem do tema na forma de uma revisão de literatura, de caráter exploratória, sobre os aspectos inerentes ao desenvolvimento e emprego de materiais “verdes” na concepção de projetos que visam conformidade em termos ambientais (incluindo os catalisadores verdes). Foi apresentado um estudo de caso, buscando evidenciar os benefícios de se empreender projetos com o emprego de materiais sustentáveis. Através de um levantamento comparativo entre tipos de catalisadores, concluiu-se que catalisadores verdes apresentam vantagens técnicas e econômicas que apontam resultados operacionais satisfatórios, principalmente do ponto de vista ambiental, tais como diminuição da poluição e da quantidade de resíduos na indústria química, bem como redução da toxicidade de reagentes e produtos e o uso de matéria-prima provenientes de fontes renováveis. Vale ressaltar ainda que mais e novos projetos sejam implementados para o incremento da inovação e obtenção de novas tecnologias.

165

Palavras chave: Química. Renováveis. Meio ambiente. Sustentabilidade.

ABSTRACT: Green Chemistry emerged from the idea of achieving economic and social development that respects nature, which has suffered due to the excessive and careless progress of man. The main idea, or one could call it the objective, is to reconcile respect for the environment and the evolution of man, harming the environment as little as possible. In this sense, aligned with the concepts of environmental sustainability, proactive actions inspire the implementation of projects that reduce or avoid the use of non-renewable materials. And with regard to the industrial production sector and chemical processes, catalysts play a fundamental role. This paper approaches the subject in the form of an exploratory literature review on the aspects inherent to the development and use of “green” materials in the design of projects that aim at environmental compliance (including green catalysts). A case study was presented, seeking to highlight the benefits of undertaking projects that use sustainable materials. Through a comparative survey of catalyst types, it was concluded that green catalysts present technical and economic advantages that indicate satisfactory operational results, mainly from an environmental point of view, such as reduced pollution and the amount of waste in the chemical industry, as well as reduced toxicity of reagents and products and the use of raw materials from renewable sources. It is also worth mentioning that more and new projects should be implemented to increase innovation and obtain new technologies.

Keywords: Chemical. Renewables. Environment. Sustainability.

¹ Formando engenharia química, Universidade de Vassouras.

² Engenheiro químico, Professor do curso graduação de engenharia química, Universidade de Vassouras.

I. INTRODUÇÃO

O problema central reside no impacto ambiental negativo associado aos catalisadores tradicionais, que frequentemente utilizam metais pesados, substâncias tóxicas e processos energeticamente intensivos. Estes métodos não apenas contribuem para a poluição ambiental, mas também apresentam riscos à saúde humana e à biodiversidade. Portanto, o desafio é desenvolver novos catalisadores "verdes" que possam minimizar ou eliminar esses impactos, ao mesmo tempo em que mantêm ou melhoram a eficiência catalítica. A busca por alternativas sustentáveis visa utilizar materiais abundantes e não tóxicos, métodos de síntese ecoeficientes e processos de reciclagem eficazes, alinhando-se aos princípios da química verde e às metas de desenvolvimento sustentável.

Essa pesquisa se mostra relevante devido a vários fatores cruciais que influenciam tanto o meio ambiente quanto a sociedade em geral. Em primeiro lugar, os catalisadores verdes desempenham um papel fundamental na redução da emissão de poluentes e resíduos tóxicos, o que é essencial para mitigar os efeitos adversos sobre o meio ambiente, incluindo a poluição e as mudanças climáticas. O fato de utilizar materiais não tóxicos e abundantes é diretamente proporcional a que catalisadores promovem a utilização sustentável dos recursos naturais, alinhando-se aos princípios da química verde e contribuindo significativamente para a conservação dos ecossistemas.

E ainda, os catalisadores verdes têm o potencial de aumentar a eficiência das reações químicas, reduzindo o consumo de energia e tornando os processos industriais mais sustentáveis e economicamente viáveis, o que é particularmente importante em um contexto onde a eficiência energética se torna cada vez mais crítica para a sustentabilidade global (SAMPAIO et al., 2020).

No que diz respeito à saúde pública, a substituição de catalisadores tradicionais, que frequentemente utilizam metais pesados e outros componentes tóxicos, por alternativas verdes, diminui os riscos à saúde humana. Tal substituição ajuda a prevenir doenças relacionadas à exposição a substâncias tóxicas, melhorando a qualidade de vida das populações.

Adicionalmente, catalisadores verdes podem ser projetados para serem recicláveis ou biodegradáveis, promovendo uma economia circular onde os materiais são continuamente reutilizados, minimizando a geração de resíduos. Este aspecto é vital para a sustentabilidade a longo prazo, reduzindo a pressão sobre os aterros sanitários e os ecossistemas. No âmbito industrial, especialmente nas indústrias química e farmacêutica, a adoção de catalisadores verdes

pode revolucionar os processos de produção, tornando-os mais seguros, eficientes e ambientalmente responsáveis (SAMPAIO et al., 2020).

Portanto, a relevância da presente pesquisa reside em seu potencial para incentivar uma transformação significativa nas práticas industriais e científicas, contribuindo para um futuro mais sustentável e saudável. Essa transformação é essencial para enfrentar os desafios ambientais e sociais contemporâneos, posicionando a pesquisa sobre catalisadores verdes como uma área estratégica e de alta prioridade no desenvolvimento científico e tecnológico.

2. Objetivos

Avaliar a viabilidade e o impacto do uso de catalisadores verdes em reações químicas sustentáveis, por meio de uma revisão de literatura e de um estudo de caso específico retirado da literatura existente, a fim de promover práticas industriais mais ecológicas e eficientes.

Realizar uma revisão da literatura científica sobre os principais tipos de catalisadores verdes, suas propriedades, métodos de síntese, aplicações e benefícios ambientais, destacando os avanços mais recentes e as lacunas no conhecimento atual.

Analizar um estudo de caso existente na literatura sobre a implementação de catalisadores verdes em um processo industrial, avaliando a eficiência, custos, impactos ambientais e benefícios em comparação aos catalisadores tradicionais, para justificar a aplicabilidade e as vantagens concretas desses materiais em um contexto prático.

167

3. METODOLOGIA

A pesquisa está subdividida em duas etapas principais:

- ✓ Revisão de literatura com inserção de informações relevantes do estado da arte inerentes ao tema;
- ✓ Análise de um estudo de caso extraído da literatura existente. A revisão de literatura está pautada pela compilação e análise de pesquisas existentes sobre catalisadores verdes.

Os critérios da pesquisa incluem: relevância do tema dos catalisadores verdes, data de publicação de trabalhos, origem das fontes (revistas científicas de alto impacto e conferências renomadas) e a abrangência dos tópicos (tipos de catalisadores, métodos de síntese, aplicações industriais, e impactos ambientais).

As bases de dados científicas que estão contempladas na pesquisa incluem Web of Science, Scopus, Google Scholar, ScienceDirect e PubMed. Adicionalmente, foram realizadas consultas de livros que detinham informações relevantes.

Foi realizada uma busca utilizando palavras-chave como “catalisadores verdes”, “química sustentável”, “biocatalisadores”, “fotocatalisadores”, e “catalisadores heterogêneos”. Os artigos foram selecionados com base nos critérios definidos e organizados para análise.

Os artigos selecionados foram analisados no sentido de identificar os principais tipos de catalisadores verdes, seus métodos de síntese, propriedades catalíticas, aplicações e benefícios ambientais. Também buscou-se destacar as lacunas no conhecimento atual e os desafios enfrentados na implementação de catalisadores verdes.

Os resultados da análise foram sintetizados em uma revisão geral, apresentando uma visão do estado da arte da pesquisa sobre catalisadores verdes e destacando as tendências emergentes e áreas de oportunidade para futuras pesquisas.

3.1 Análise de Estudo de Caso

A análise do estudo de caso está baseada em um exemplo específico retirado da literatura existente, que demonstre a aplicação prática de catalisadores verdes em um processo industrial. 168
A metodologia para esta etapa inclui os seguintes passos:

- ✓ Seleção de um estudo de caso relevante que apresente dados empíricos sobre a implementação de catalisadores verdes. O estudo de caso foi escolhido com base na sua relevância, detalhamento dos dados apresentados e impacto demonstrado na indústria;
- ✓ Os dados do estudo de caso foram extraídos diretamente do artigo selecionado, incluindo informações sobre o tipo de catalisador utilizado, o processo industrial em que foi aplicado, a eficiência catalítica, custos associados, impactos ambientais e benefícios comparados aos catalisadores tradicionais;
- ✓ Os dados foram analisados para avaliar a eficiência, viabilidade econômica e sustentabilidade do catalisador verde utilizado no estudo de caso, sendo realizada uma comparação com os catalisadores tradicionais, destacando as melhorias alcançadas e os desafios enfrentados.
- ✓ Os resultados da análise serão interpretados à luz da revisão de literatura, permitindo uma compreensão mais profunda da aplicabilidade prática dos catalisadores verdes. Serão

discutidas as implicações para a indústria e as oportunidades para a adoção mais ampla dessas tecnologias.

4. Fundamentação Teórica

Os catalisadores, substâncias que aumentam a velocidade das reações químicas sem serem consumidas no processo, são essenciais em diversas indústrias, incluindo a química, farmacêutica e petroquímica. Tradicionalmente, muitos catalisadores utilizados nessas indústrias são baseados em metais pesados e outras substâncias tóxicas, que podem causar sérios danos ao meio ambiente e à saúde humana (FERNANDES et al, 2015).

Catalisadores verdes são desenvolvidos para minimizar impactos ambientais, promover eficiência energética e utilizar matérias-primas renováveis. O estudo de caso exemplifica essa definição ao explorar o uso de níquel/alumina na produção de diesel verde, um biocombustível sustentável (FERREIRA, L. E. M.; RIBEIRO, 2022.).

De acordo com os princípios da química verde, como delineado por Wender; Handy; Wright (1997), um dos objetivos é desenvolver processos químicos que reduzam ou eliminem a geração de substâncias perigosas.

Os catalisadores verdes se alinham com esse objetivo ao utilizar materiais menos tóxicos e mais sustentáveis, como metais de transição benignos, enzimas, e catalisadores baseados em materiais abundantes na natureza, como óxidos metálicos e compostos organocatalíticos (Dos SANTOS; et al., 2021).

Estudos indicam que esses catalisadores não apenas são menos prejudiciais ao meio ambiente, mas também podem oferecer vantagens em termos de eficiência e seletividade em reações químicas (J H CLARK, 2001).

Os catalisadores verdes podem ser divididos em várias categorias, incluindo biocatalisadores, fotocatalisadores e catalisadores heterogêneos, cada um com suas próprias vantagens e desafios. Biocatalisadores, como enzimas, são altamente específicos e funcionam sob condições moderadas de temperatura e pressão, o que reduz o consumo de energia e a necessidade de solventes tóxicos (BORNSCHEUER et al., 2012).

Fotocatalisadores utilizam a luz como fonte de energia, promovendo reações químicas através da absorção de fôtons, uma abordagem que pode ser particularmente útil na degradação de poluentes orgânicos (HOFFMANN et al., 1995).

Já os catalisadores heterogêneos são sólidos que catalisam reações no estado líquido ou gasoso, facilitando a separação e a recuperação dos catalisadores após a reação, o que é uma vantagem significativa em termos de reciclagem e reutilização (ANATAS; KIRCHHOFF, 2002).

A revisão de literatura proposta neste estudo visa compilar e analisar as pesquisas existentes sobre essas diversas categorias de catalisadores verdes, avaliando seus métodos de síntese, eficiência catalítica, e impactos ambientais. Além disso, será analisado um estudo de caso extraído da literatura, focado na implementação de catalisadores verdes em um processo industrial específico. Este estudo de caso fornecerá uma visão prática das vantagens e desafios associados ao uso de catalisadores verdes em um ambiente real, complementando a análise teórica com dados empíricos.

O foco na literatura existente permitirá identificar tanto os sucessos quanto as áreas que necessitam de mais pesquisa, estabelecendo um quadro comprehensivo do estado atual do desenvolvimento de catalisadores verdes. Compreender essas dinâmicas é crucial para promover a adoção mais ampla dessas tecnologias e para guiar futuras pesquisas e inovações no campo da química sustentável.

170

5. Análise de Estudo de Caso

Análise do Estudo de Caso: Níquel - Catalisadores de Alumina para a Transformação de Óleos Vegetais em Diesel Verde. As descrições a seguir (dos itens “a” ao “c”) refletem relevantes informações apuradas e extraídas de NIKOLOPOULOS et al, (2023):

a) Método de Preparação, Temperatura de Ativação e Condições de Reação

Os catalisadores de níquel suportados em alumina foram preparados por diferentes métodos, incluindo impregnação úmida e coprecipitação. Cada método impacta a distribuição e a dispersão do níquel sobre a alumina, afetando a atividade catalítica. A temperatura de ativação é crítica para a formação de fases ativas do catalisador, onde temperaturas inadequadas podem levar à sinterização do níquel ou à formação de fases inativas. As condições de reação, como temperatura, pressão de hidrogênio e tempo de contato, também são fundamentais para a eficiência da conversão de óleos vegetais em diesel verde.

b) Dados do Estudo

O estudo de caso foi extraído de um artigo que detalha a aplicação industrial dos catalisadores de níquel/alumina na hidrogenação de óleos vegetais. Foram coletados dados sobre

a eficiência catalítica, custos de produção, impactos ambientais e benefícios comparados aos catalisadores tradicionais, como os de sulfeto de níquel e molibdênio.

c) Análise de Eficiência, Viabilidade Econômica e Sustentabilidade

Eficiência Catalítica: Os catalisadores de níquel/alumina mostraram alta eficiência na conversão de óleos vegetais em diesel verde, com rendimentos superiores a 90%. A atividade catalítica foi influenciada positivamente pelo método de preparação e pelas condições de ativação e reação.

Viabilidade Econômica: Os custos associados à produção dos catalisadores de níquel/alumina foram analisados e comparados aos catalisadores tradicionais. Embora o custo inicial dos catalisadores de níquel/alumina seja mais elevado, a sua maior durabilidade e menor necessidade de regeneração compensam este investimento inicial, resultando em uma economia a longo prazo.

Sustentabilidade: Em termos de impacto ambiental, os catalisadores de níquel/alumina apresentam vantagens significativas. Eles evitam o uso de metais tóxicos como o molibdênio e reduzem a emissão de enxofre, contribuindo para a produção de combustíveis mais limpos. Além disso, a utilização de óleos vegetais como matéria-prima promove a sustentabilidade, uma vez que são fontes renováveis.

171

Comparação com Catalisadores Tradicionais: Os catalisadores tradicionais, como os de sulfeto de níquel e molibdênio, são menos eficientes e mais poluentes. A transição para catalisadores de níquel/alumina representa uma melhoria em termos de eficiência de processo, redução de custos operacionais e impactos ambientais positivos. Contudo, os desafios incluem a necessidade de otimização contínua das condições de ativação e reação para maximizar a eficiência catalítica.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Das informações encontradas na pesquisa do estudo de caso, destaca-se a possibilidade de viabilizar o desenvolvimento de catalisadores de níquel/alumina. A transição para esses catalisadores pode ser uma solução sustentável para a indústria de biocombustíveis, promovendo a produção de diesel verde com menor impacto ambiental. As implicações e vantagens que podem ser identificadas para alcance desse propósito são:

Adoção de Tecnologias Mais Limpas - Incentivando a utilização de catalisadores de níquel/alumina, que são mais eficientes e menos poluentes. Redução de Custos a Longo Prazo:

Apesar do custo inicial elevado, a durabilidade e menor necessidade de manutenção tornam essa tecnologia economicamente viável.

Conformidade com Normas Ambientais - Atendendo às regulamentações ambientais mais rigorosas e promovendo a sustentabilidade.

Pesquisa e Desenvolvimento: Continuar a pesquisa para otimizar os métodos de preparação e as condições de ativação/reação, maximizando a eficiência catalítica e a sustentabilidade.

Relação do Estudo de Caso com o Desenvolvimento de Catalisadores Verdes para Reações Sustentáveis: O estudo de caso sobre níquel—catalisadores de alumina para a transformação de óleos vegetais em diesel verde está intimamente relacionado com o desenvolvimento de catalisadores verdes para reações sustentáveis.

Eficiência Catalítica: O estudo destaca como diferentes métodos de preparação e condições de reação influenciam a eficiência dos catalisadores de níquel/alumina. Catalisadores verdes devem ser altamente eficientes para serem viáveis comercialmente e ambientalmente. O rendimento superior a 90% na conversão de óleos vegetais em diesel verde demonstra essa eficiência.

Sustentabilidade: A utilização de óleos vegetais, uma fonte renovável, em vez de combustíveis fósseis, representa um passo significativo em direção à sustentabilidade; os catalisadores de níquel/alumina evitam o uso de metais pesados e tóxicos, reduzindo a pegada ambiental. 172

Comparação com Catalisadores Tradicionais: Os catalisadores tradicionais, como os de sulfeto de níquel e molibdênio, são menos sustentáveis devido à emissão de poluentes e ao uso de metais tóxicos. O estudo mostra que os catalisadores de níquel/alumina oferecem melhorias significativas: menor emissão de enxofre e outros poluentes; uso de óleos vegetais como matéria-prima; maior durabilidade dos catalisadores e economia a longo prazo devido à menor necessidade de regeneração.

Adoção de Tecnologias Sustentáveis: O estudo sugere que a indústria de biocombustíveis pode se beneficiar significativamente da transição para catalisadores de níquel/alumina. Esta mudança não só melhora a eficiência do processo, mas também promove práticas industriais mais verdes.

Conformidade com Regulamentações Ambientais: Com regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas, a adoção de catalisadores verdes ajuda a indústria a se manter em conformidade e a evitar multas e sanções.

Inovação e P&D: O estudo incentiva a contínua pesquisa e desenvolvimento (P&D) para otimizar os métodos de preparação dos catalisadores e as condições de reação. Isso é essencial para maximizar a eficiência e a sustentabilidade, garantindo que os catalisadores verdes possam competir e superar as tecnologias tradicionais.

Benefícios: Redução do Impacto Ambiental: Menor emissão de poluentes e uso de matérias-primas renováveis.

Eficiência Energética: Alta eficiência na conversão de óleos vegetais em diesel verde.

Economia a Longo Prazo: Menor custo total devido à durabilidade dos catalisadores.

Desafios: Custos Iniciais: Necessidade de investimentos iniciais mais altos.

Otimização Contínua: Necessidade de otimização contínua das condições de ativação e reação para maximizar os benefícios.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de caso sobre níquel—catalisadores de alumina para a transformação de óleos vegetais em diesel verde exemplifica a aplicação prática e os benefícios dos catalisadores verdes para reações sustentáveis. Ele destaca como a indústria pode avançar em direção a processos mais eficientes e ambientalmente responsáveis, enfrentando os desafios com inovação e desenvolvimento contínuo. Este caso reforça a importância de investir em tecnologias verdes para um futuro mais sustentável.

Os catalisadores de níquel/alumina são uma alternativa promissora aos catalisadores tradicionais na produção de diesel verde. Sua implementação oferece melhorias significativas em eficiência, sustentabilidade e viabilidade econômica, embora os desafios de otimização permaneçam. A indústria deve considerar a adoção ampla dessa tecnologia para promover práticas mais sustentáveis e economicamente viáveis.

A pesquisa sobre o desenvolvimento e a aplicação de catalisadores verdes revela-se essencial para promover práticas industriais mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis. A revisão de literatura realizada destacou os avanços recentes no campo dos catalisadores verdes, identificando várias categorias promissoras, como biocatalisadores, fotocatalisadores e catalisadores heterogêneos, cada uma com suas próprias vantagens e desafios. Esses catalisadores

oferecem soluções mais eficientes e menos prejudiciais ao meio ambiente, alinhando-se aos princípios da química verde.

O estudo de caso analisado, focado na utilização de catalisadores à base de níquel suportado em alumina para a produção de biodiesel, forneceu evidências empíricas sobre a viabilidade e os benefícios dos catalisadores verdes em um contexto industrial. Os resultados demonstraram que esses catalisadores podem alcançar altos rendimentos e eficiências sob condições moderadas, além de serem reutilizáveis, o que reduz significativamente os resíduos e o consumo de energia.

Os impactos ambientais e econômicos positivos observados no estudo de caso reforçam a importância de investir em tecnologias de catalisadores verdes. A adoção desses catalisadores pode levar a uma redução substancial nos custos operacionais e na pegada ambiental das indústrias químicas e relacionadas.

Enfim, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos de catalisadores verdes são cruciais para a transição para uma economia mais sustentável e resiliente. A combinação de revisão teórica e análise prática apresentada neste estudo fornece uma base sólida para futuras investigações e implementações, sublinhando o papel vital dos catalisadores verdes na construção de um futuro industrial mais sustentável.

174

8. Propostas de Trabalhos Futuros

Desenvolvimento de Novos Materiais para Catalisadores Verdes: Futuras pesquisas podem focar na identificação e desenvolvimento de novos materiais que possam servir como catalisadores verdes ainda mais eficientes e sustentáveis. Isso inclui a exploração de compostos orgânicos, polímeros biodegradáveis, e materiais nanoestrutura dos que possam oferecer propriedades catalíticas superiores.

Otimização de Processos de Síntese: Investigar métodos de síntese mais eficientes e sustentáveis para catalisadores verdes é uma área promissora. Trabalhos futuros podem explorar técnicas de síntese ecológicas, como a síntese assistida por micro-ondas, ultrassom e técnicas de solvo termia, visando a redução do uso de solventes tóxicos e a diminuição da energia necessária para a produção dos catalisadores.

Aplicação de Catalisadores Verdes em Diversas Indústrias: Embora o estudo de caso tenha focado na produção de biodiesel, é crucial expandir a aplicação dos catalisadores verdes para outras indústrias, como a farmacêutica, alimentícia e petroquímica. Pesquisas podem

avaliar a eficácia desses catalisadores em diferentes tipos de reações químicas e processos industriais, contribuindo para uma ampla adoção das tecnologias sustentáveis.

Estudos de Ciclo de Vida e Análise de Sustentabilidade: Realizar estudos de ciclo de vida (LCA – *Life Cycle Analisys*) e análises de sustentabilidade para diferentes catalisadores verdes pode fornecer uma visão abrangente sobre os impactos ambientais e econômicos a longo prazo. Esses estudos são essenciais para comparar os benefícios reais dos catalisadores verdes em relação aos tradicionais, considerando todas as etapas, desde a síntese até o descarte.

Desenvolvimento de Catalisadores Verdes Baseados em Biotecnologia: Explorar o uso de biocatalisadores, como enzimas e microrganismos modificados geneticamente, para promover reações químicas de maneira mais ecológica. Trabalhos futuros podem focar na engenharia genética para melhorar a eficiência e a estabilidade desses biocatalisadores em condições industriais.

Integração de Catalisadores Verdes com Tecnologias Renováveis: Pesquisar a integração de catalisadores verdes com tecnologias de energia renovável, como a energia solar e eólica, para criar processos químicos completamente sustentáveis. Isso inclui o desenvolvimento de fotocatalisadores que utilizam luz solar para promover reações químicas e a investigação de processos eletrocatalíticos alimentados por eletricidade de fontes renováveis.

175

Avaliação de Escalabilidade e Viabilidade Comercial: Investigar a escalabilidade dos processos envolvendo catalisadores verdes e sua viabilidade comercial é crucial para a transição da pesquisa de laboratório para a indústria. Estudos futuros devem focar em avaliar os desafios técnicos e econômicos associados à produção em larga escala e à implementação industrial desses catalisadores.

Impacto dos Catalisadores Verdes na Economia Circular: Explorar como os catalisadores verdes podem ser integrados em uma economia circular, promovendo a reutilização e reciclagem de materiais. Pesquisas podem investigar métodos para a recuperação e reciclagem de catalisadores após o uso, minimizando a geração de resíduos e fechando os ciclos de materiais.

Essas propostas de trabalhos futuros visam aprofundar o conhecimento sobre catalisadores verdes, melhorar suas aplicações práticas e promover a sustentabilidade industrial de maneira abrangente e eficaz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANASTAS, P.T.; KIRCHHOFF, M.M. Origins, Current Status, and Future Challenges of Green. Chemistry. *Acc. Chem. Res.*, v. 35, n. 9, 686-694, 2002.

BORNSCHEUER, U. T.; HUISMAN, G. W.; KAZLAUSKAS, R. J.; LUTZ, S.; MOORE, J. C.; ROBINS, K. Engineering the third wave of biocatalysis. *Nature*, v. 485, n. 7397, p. 185-194, 9 maio 2012. DOI: 10.1038/nature11117. PMID: 22575958. BORNSCHEUER, U. T.; HUISMAN, G. W.; KAZLAUSKAS, R. J.; LUTZ, S.; MOORE, J. C.; ROBINS, K. Engineering the third wave of biocatalysis. *Nature*, v. 485, n. 7397, p. 185-194, 9 maio 2012. DOI: 10.1038/nature11117. PMID: 22575958.

DOS SANTOS, T. V.; Pryston, D. B. A.; Assis, G. C.; Meneghetti, M. R.; Meneghetti, S. M. P.; Tin, niobium and tin-niobium oxides obtained by the Pechini method using glycerol as a polyol: Synthesis, characterization and use as a catalyst in fructose conversion. *Catalysis Today* 2021, 379, 62.

FERNANDES, Ricardo Ferreira. Catalisador. *Revista Ciência Elementar*, v. 3, n. 2, p. 036, 2015. DOI: <http://doi.org/10.24927/rce2015.036>.

FERREIRA, L. E. M.; RIBEIRO, R. S. A.; MADRIAGA, V. G. C.; VASCONCELOS, S. C.; SHIMABUKURO, E. T. T.; ROSSA, V.; VIEIRA, S. S.; PASSOS, F. B.; LIMA, T. M. Uma breve revisão sobre a catálise por átomos isolados: conceitos e aplicações. *Química Nova*, v. 45, n. 2, p. 194-206, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170822>.

HOFFMANN, M. R.; Martin, S. T.; Choi, W.; Bahnemann, D. W.; *Chem. Rev.* 1995, 95, 69. 176

JH Clark, “Catálise para Química Verde”, *Química Pura e Aplicada*, Vol. 73, No. 1, 2001, pp. 103-111. doi:10.1351/pac200173010103

NIKOLOPOULOS, I.; KOGKOS, G.; TSAVATOPOULOU, V. D.; KORDOULI, E.; BOURIKAS, K.; KORDULIS, C.; LYCOURGHOTIS, A. Nickel-Alumina Catalysts for the Transformation of Vegetable Oils into Green Diesel: The Role of Preparation Method, Activation Temperature, and Reaction Conditions. *Nanomaterials* (Basel), v. 13, n. 3, p. 616, 2023. DOI: 10.3390/nano13030616. PMID: 36770577; PMCID: PMC9919930.

SAMPAIO, Vitor Hugo de Goes; ASSUNÇÃO, João Carlos da Costa; DANTAS, Camylla Rachelle Aguiar Araújo; FERREIRA, Daniele Alves; BASTOS, Ana Karine Pessoa; SAMPAIO, Caroline de Goes. Biocatalisadores vegetais na redução de acetofenonas pró-quirais e suas contribuições para a química verde. *Conexões - Ciência e Tecnologia*, Fortaleza/CE, v. 14, n. 3, p. 34-44, jul. 2020. Artigo submetido em 06 out. 2017 e aceito em 29 jan. 2019.

WENDER, P. A.; Handy, S. T.; Wright, D. L.; *Chem. Ind.* 1997, 765 e referências citadas.