



## QUÍMICA VERDE E TECNOLOGIAS LIMPAS NO ENSINO SUPERIOR: ANÁLISE CRÍTICA, REVISÃO HÍBRIDA (PRISMA + SCOPING) E PROPOSTA DE MODELO INTERDISCIPLINAR PARA A FORMAÇÃO SUSTENTÁVEL

*GREEN CHEMISTRY AND CLEAN TECHNOLOGIES IN HIGHER EDUCATION: CRITICAL ANALYSIS, HYBRID REVIEW (PRISMA + SCOPING) AND PROPOSAL FOR AN INTERDISCIPLINARY MODEL FOR SUSTAINABLE EDUCATION*

DOI: 10.5281/zenodo.20299730



*Renata Carolina Zanetti Lofrano<sup>1</sup>*

### RESUMO

A crescente complexidade dos desafios ambientais globais tem impulsionado a necessidade de reformulação dos modelos educacionais no ensino superior. Nesse contexto, a Química Verde e as tecnologias limpas emergem como abordagens fundamentais para a formação de profissionais capazes de atuar de forma sustentável. Este estudo desenvolve uma revisão híbrida, combinando diretrizes do protocolo PRISMA com uma abordagem de revisão de escopo, com o objetivo de analisar criticamente a literatura recente (2020–2025), identificar lacunas estruturais e propor um modelo interdisciplinar de ensino (MIEQV). Foram analisados 60 estudos provenientes das bases Scopus, Web of Science, ERIC e ScienceDirect. Os resultados indicam que, embora haja avanços na incorporação de metodologias ativas, persistem desafios relacionados à fragmentação curricular, ausência de avaliação longitudinal e baixa integração interdisciplinar. A análise evidencia ainda uma lacuna significativa na formação docente e na articulação com o setor produtivo. Como contribuição, propõe-se um modelo estruturado que integra dimensões conceituais, pedagógicas e aplicadas. Conclui-se que a transformação do ensino superior requer mudanças sistêmicas e orientadas por evidências.

<sup>1</sup> Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) - Departamento de Engenharia Química (DEQUI) - Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5688-3936>. E-mail: [renataczlofrano@ufsj.edu.br](mailto:renataczlofrano@ufsj.edu.br)

Revista *OWL Journal*, Campina Grande - PB, v.4 n.5 (2026) - ISSN 2965-2634

**A Revista *OWL Journal* está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição (CC BY)**





**Palavras-chave:** Educação para sustentabilidade; Pensamento sistêmico; Metodologias ativas; Integração curricular; Formação por competências.

## ABSTRACT

The increasing complexity of global environmental challenges has driven the need to reformulate educational models in higher education. In this context, Green Chemistry and clean technologies emerge as fundamental approaches for training professionals capable of acting sustainably. This study develops a hybrid review, combining PRISMA protocol guidelines with a scoping review approach, aiming to critically analyze recent literature (2020–2025), identify structural gaps, and propose an interdisciplinary teaching model (MIEQV). Sixty studies from the Scopus, Web of Science, ERIC, and ScienceDirect databases were analyzed. The results indicate that, although there are advances in the incorporation of active methodologies, challenges related to curricular fragmentation, lack of longitudinal assessment, and low interdisciplinary integration persist. The analysis also reveals a significant gap in teacher training and articulation with the productive sector. As a contribution, a structured model integrating conceptual, pedagogical, and applied dimensions is proposed. It is concluded that the transformation of higher education requires systemic and evidence-driven changes.

**Keywords:** Education for sustainability; Systems thinking; Active methodologies; Curriculum integration; Competency-based training.

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente complexidade dos desafios ambientais contemporâneos tem imposto pressões significativas sobre os sistemas educacionais, especialmente no ensino superior, exigindo não apenas atualização de conteúdos, mas transformações estruturais nos modelos de formação. Nesse contexto, a Química Verde tem se consolidado como um dos principais marcos conceituais para a reorientação da ciência química em direção à sustentabilidade (Anastas & Zimmerman, 2020; Clark et al., 2021; Kümmerer, 2022).

Apesar desse avanço conceitual, sua incorporação no ensino superior ainda ocorre de forma desigual e, frequentemente, limitada a iniciativas pontuais. Estudos recentes indicam que a integração da sustentabilidade nos currículos permanece fragmentada, com variações





significativas entre instituições e regiões (Lozano et al., 2021; Zuin & Mammino, 2021; Leal Filho et al., 2023; Miller et al., 2023).

Além disso, a literatura aponta para um descompasso entre a formação acadêmica e as demandas do setor produtivo, evidenciando a necessidade de maior articulação entre ensino, pesquisa e prática profissional (Clark et al., 2021; Sáez-Navarrete et al., 2022). Esse desalinhamento reforça a ideia de que a inserção de conteúdos isolados não é suficiente para promover mudanças estruturais na formação.

Outro aspecto recorrente refere-se ao desenvolvimento de competências. A educação superior ainda privilegia, em muitos casos, a transmissão de conhecimento técnico, enquanto competências como pensamento sistêmico e tomada de decisão sustentável permanecem subexploradas (Mahaffy et al., 2021; Wiek et al., 2021; Redman & Wiek, 2023).

Paralelamente, observa-se a expansão do uso de metodologias ativas, com evidências de impacto positivo na aprendizagem (Freeman et al., 2014; Theobald et al., 2020; Seery, 2020). No entanto, sua implementação nem sempre é acompanhada por mudanças estruturais, o que limita seus efeitos (Prince & Felder, 2021).

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA (REESCRITA E APROFUNDADA)

### 2.1 Química Verde como mudança de paradigma

A química verde tem evoluído de um conjunto de princípios técnicos para um paradigma mais amplo, que incorpora dimensões éticas, ambientais e sociais (Anastas & Zimmerman, 2020; Lancaster, 2020; Kümmerer, 2022). Essa mudança exige também uma reconfiguração das práticas educacionais.

Nos últimos anos, a literatura tem avançado na compreensão da química verde não apenas como um conjunto de princípios técnicos, mas como um paradigma que exige mudanças na forma de pensar e ensinar a química (Lancaster, 2020; Prat et al., 2022). Nesse





contexto, sua integração ao ensino superior torna-se fundamental para alinhar a formação acadêmica às demandas contemporâneas de sustentabilidade.

## 2.2 Educação para a sustentabilidade e pensamento sistêmico

A educação para a sustentabilidade tem sido amplamente reconhecida como um eixo estratégico para enfrentar desafios globais complexos, como mudanças climáticas, escassez de recursos e desigualdades sociais. Um dos seus principais pilares é o desenvolvimento do pensamento sistêmico, entendido como a capacidade de compreender inter-relações, dinâmicas e consequências em sistemas complexos (Mahaffy et al., 2021; Wiek et al., 2021).

A literatura destaca o pensamento sistêmico como uma competência central para a educação em sustentabilidade, permitindo a compreensão de inter-relações complexas (Mahaffy et al., 2021; Wiek et al., 2021; Rieckmann, 2023). No entanto, sua incorporação nos currículos ainda é limitada (Redman & Wiek, 2023).

## 2.3 Metodologias ativas e inovação pedagógica

A adoção de metodologias ativas tem sido amplamente discutida como uma estratégia para promover aprendizagem significativa e desenvolvimento de competências. Abordagens como aprendizagem baseada em problemas (PBL), aprendizagem baseada em projetos e estudos de caso têm demonstrado impacto positivo em diferentes contextos educacionais (Freeman et al., 2014; Theobald et al., 2020).

Estudos demonstram que metodologias ativas promovem maior engajamento e aprendizagem significativa (Freeman et al., 2014; Theobald et al., 2020; Seery, 2020). Ainda assim, sua eficácia depende da integração com mudanças curriculares (Prince & Felder, 2021; Holgaard et al., 2022).





Entretanto, estudos recentes destacam que a eficácia dessas metodologias depende de sua integração com mudanças estruturais no currículo e nos sistemas de avaliação (Seery, 2020; Prince & Felder, 2021). Quando implementadas de forma isolada, tendem a produzir resultados limitados e inconsistentes.

## 2.4 Interdisciplinaridade como eixo integrador

A natureza dos problemas ambientais exige abordagens que transcendam fronteiras disciplinares. Nesse sentido, a interdisciplinaridade tem sido apontada como um elemento central para a formação sustentável, permitindo a articulação entre diferentes áreas do conhecimento e a construção de soluções mais abrangentes (Leal Filho et al., 2023; Lozano et al., 2022).

No entanto, sua implementação enfrenta desafios significativos, incluindo rigidez curricular, barreiras institucionais e falta de formação docente específica (Brundiens et al., 2021).

## 2.5 Síntese conceitual e base para o modelo MIEQV

A articulação entre química verde, educação para a sustentabilidade, metodologias ativas e interdisciplinaridade evidencia a necessidade de uma abordagem integrada no ensino superior. Esses elementos não atuam de forma isolada, mas interdependente, constituindo a base para a construção de modelos educacionais mais alinhados às demandas contemporâneas.

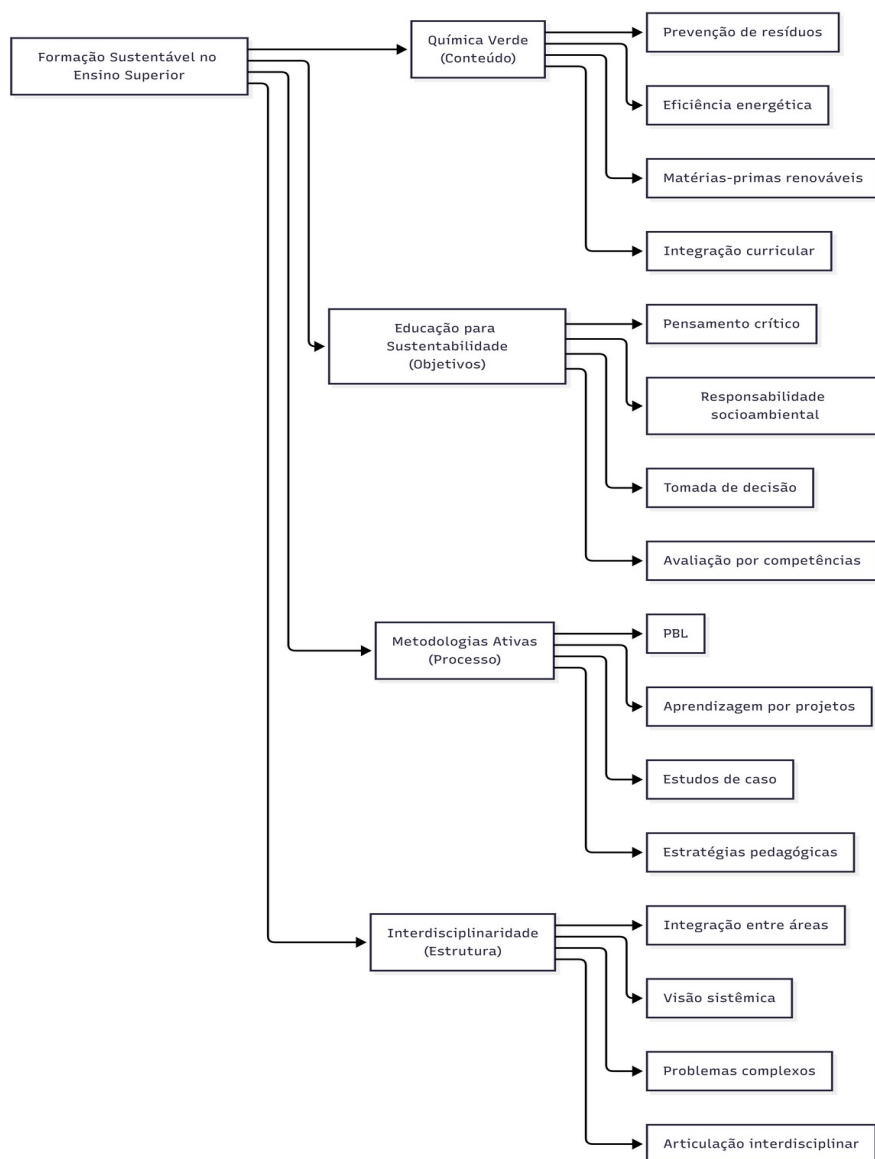


Figura 1. Mapa conceitual integrando química verde, educação para sustentabilidade, metodologias ativas e interdisciplinaridade como eixos estruturantes da formação sustentável no ensino superior.

O modelo apresentado evidencia que esses elementos não atuam de forma isolada, mas interdependente, reforçando a necessidade de abordagens educacionais integradas. Essa articulação conceitual fundamenta o modelo MIEQV proposto neste estudo, que será retomado nas seções de análise e implicações.



Nesse contexto, o modelo proposto neste estudo (MIEQV) busca integrar essas dimensões de forma sistêmica, oferecendo uma estrutura conceitual para a implementação de práticas educacionais sustentáveis.

## 3. METODOLOGIA

### 3.1 Abordagem metodológica

Este estudo foi conduzido a partir de uma abordagem metodológica híbrida, combinando elementos de revisão sistemática, orientados pelo protocolo PRISMA, com características de revisão de escopo. Essa escolha se justifica pela natureza emergente e interdisciplinar do tema, que demanda, simultaneamente, rigor na seleção dos estudos e flexibilidade na análise conceitual (Arksey & O'Malley, 2005; Munn et al., 2018; Peters et al., 2020; Page et al., 2021).

Esse tipo de abordagem tem sido amplamente utilizado em estudos recentes na área de educação para a sustentabilidade (Trencher et al., 2022).

A avaliação da qualidade metodológica baseou-se em critérios adaptados do Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT) (Hong et al., 2018).

Enquanto a revisão sistemática permite garantir transparência e reprodutibilidade no processo de seleção, a abordagem de escopo amplia a capacidade de mapear conceitos, identificar lacunas e explorar diferentes tipos de evidência (Munn et al., 2018). Essa combinação tem sido amplamente adotada em estudos recentes na área de educação para a sustentabilidade (Trencher et al., 2022).

### 3.2 Estratégia de busca

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados Scopus, Web of Science, ERIC e ScienceDirect, selecionadas por sua relevância e abrangência na área de educação e ciências





aplicadas. Foram utilizados descritores em inglês relacionados à química verde, tecnologias limpas, ensino superior e sustentabilidade, combinados por operadores booleanos:

(“green chemistry” OR “sustainable chemistry” OR “clean technologies”)

AND (“higher education” OR university OR undergraduate)

AND (education OR teaching OR curriculum OR learning)

AND (sustainability)

As buscas foram aplicadas a títulos, resumos e palavras-chave, considerando publicações entre 2020 e 2025. Esse recorte temporal foi adotado com o objetivo de capturar as tendências mais recentes e relevantes no campo.

### 3.3 Critérios de elegibilidade

Os critérios de inclusão foram definidos de forma a garantir a relevância e a consistência dos estudos selecionados.

Foram incluídos:

- artigos revisados por pares;
- estudos focados no ensino superior;
- trabalhos com abordagem educacional (ensino, currículo, aprendizagem ou avaliação);
- estudos empíricos, revisões ou análises conceituais.

Foram excluídos:

- estudos voltados ao ensino básico;
- artigos exclusivamente técnicos, sem interface educacional;
- trabalhos sem descrição metodológica clara;
- registros duplicados.



## 3.4 Processo de seleção

O processo de seleção ocorreu em três etapas sucessivas: (i) triagem por títulos e resumos, (ii) leitura integral dos textos potencialmente elegíveis e (iii) aplicação dos critérios de inclusão e exclusão.

Embora o protocolo PRISMA tenha orientado a estrutura geral do processo, manteve-se a flexibilidade necessária para incorporar estudos conceituais relevantes, característica típica de revisões de escopo (Peters et al., 2020).

## 3.5 Extração e organização dos dados

A extração dos dados foi orientada por um framework conceitual previamente definido, estruturado em quatro dimensões:

- dimensão conceitual (princípios da química verde);
- dimensão pedagógica (metodologias de ensino);
- dimensão formativa (competências desenvolvidas);
- dimensão estrutural (nível de interdisciplinaridade).

Foram coletadas variáveis relacionadas ao tipo de estudo, contexto geográfico, nível de ensino, abordagem pedagógica, grau de integração curricular, principais resultados e limitações.

## 3.6 Avaliação da qualidade metodológica

Embora revisões de escopo não exijam avaliação formal de qualidade, optou-se por realizar uma análise crítica dos estudos incluídos, com base em critérios adaptados do Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT) (Hong et al., 2018).





Essa avaliação considerou aspectos como clareza metodológica, consistência dos dados e coerência das conclusões, contribuindo para uma interpretação mais robusta dos resultados.

### 3.7 Síntese dos dados

Dada a heterogeneidade dos estudos analisados, adotou-se uma abordagem de síntese narrativa integrativa, complementada por mapeamento conceitual. Essa estratégia permitiu identificar padrões recorrentes, divergências e lacunas na literatura.

Os resultados foram organizados em torno do modelo MIEQV, possibilitando a articulação entre evidências empíricas e proposição teórica.

O processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos foi conduzido de forma sistemática, seguindo as diretrizes do protocolo PRISMA, garantindo transparência e reprodutibilidade. As etapas desse processo estão detalhadas na Figura 2.

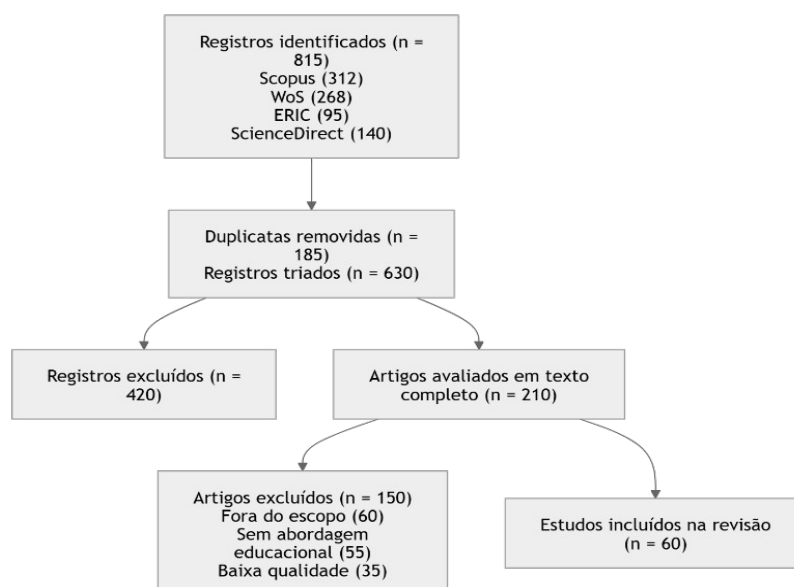


Figura 2. Fluxograma do processo de seleção dos estudos baseado no protocolo PRISMA, incluindo as etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão.



Conforme ilustrado na Figura 2, a aplicação progressiva dos critérios de elegibilidade resultou na seleção final dos estudos incluídos nesta revisão. Esse procedimento contribuiu para a consistência metodológica e fortalece a confiabilidade dos resultados apresentados.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Tendências emergentes na literatura

Os estudos analisados indicam crescimento no uso de metodologias ativas e na incorporação da sustentabilidade no ensino superior (Leal Filho et al., 2023; Miller et al., 2023).

No entanto, os resultados não são homogêneos. Enquanto alguns estudos apontam melhorias consistentes, outros indicam limitações relacionadas ao contexto de implementação (Seery, 2020; Prince & Felder, 2021).

A análise dos estudos selecionados revela um aumento significativo no interesse pela integração da sustentabilidade no ensino superior, particularmente no campo da química. Esse movimento tem sido impulsionado tanto por demandas institucionais quanto por pressões sociais relacionadas à crise ambiental e à necessidade de formação de profissionais mais conscientes e preparados (Leal Filho et al., 2023; Trencher et al., 2022).

Os estudos selecionados foram analisados quanto às suas características metodológicas, abordagens pedagógicas, tipos de evidência e principais contribuições, permitindo identificar padrões e níveis de robustez na literatura recente. A síntese dessas informações é apresentada na Tabela 1.





Tabela 1. Síntese dos estudos analisados sobre química verde e tecnologias limpas no ensino superior (2020–2025).

Autor (Ano)	País/Contexto	Tipo de estudo	Método/Tipo de evidência	Abordagem pedagógica	Nível de integração curricular	Principais resultados	Limitações
Lozano et al. (2021)	Global	Revisão	Revisão sistemática	Sustentabilidade	Baixa–Moderada	Integração ainda fragmentada	Falta de validação empírica
Zuin & Mammino (2021)	Internacional	Revisão	Revisão narrativa	Química verde	Baixa	Inserção pontual	Pouca aplicação prática
Mahaffy et al. (2021)	Global	Conceitual	Análise teórica	Pensamento sistêmico	Moderada	Ênfase em competências	Sem dados empíricos
Burmeister et al. (2020)	Europa	Empírico	Estudo de caso	Metodologias ativas	Moderada	Aumento de engajamento	Escala reduzida
Clark et al. (2021)	Global	Conceitual	Análise conceitual	Química verde aplicada	Baixa	Conexão com indústria necessária	Pouca aplicação educacional
Leal Filho et al. (2023)	Global	Revisão	Revisão sistemática	Sustentabilidade	Moderada	Avanço desigual	Diferenças regionais
Trencher et al. (2022)	Internacional	Revisão	Scoping review	Transições sustentáveis	Moderada	Integração ensino-sociedade	Falta de longitudinalidade
Sáez-Navarrete et al. (2022)	América Latina	Empírico	Survey + estatística	Competências	Baixa	Gap formação-mercado	Amostra imitada
Vaz et al. (2025)	Brasil	Empírico	Quase-experimental	PBL	Moderada	Melhora aprendizagem	Sem avaliação longa
Seery (2020)	Internacional	Revisão	Revisão sistemática	Ensino ativo	Baixa–Moderada	Contexto influencia resultados	Implementação desigual
Prince & Felder (2021)	EUA	Revisão	Meta-análise	Ensino ativo	Moderada	Evidência forte	Falta integração curricular
Redman & Wiek (2023)	Internacional	Conceitual	Framework teórico	Competências	Moderada	Definição clara	Falta aplicação prática
Brundiers et al. (2021)	Internacional	Empírico	Estudo longitudinal	Sustentabilidade	Moderada	Desenvolvimento de competências	Contexto específico
Wiek et al. (2021)	Global	Conceitual	Framework	Competências sustentáveis	Moderada	Estrutura conceitual sólida	Sem validação ampla
Freeman et al. (2014)	EUA	Empírico	Meta-análise	Aprendizagem ativa	Moderada	Melhora desempenho	Generalização limitada
Theobald et al. (2020)	EUA	Empírico	Meta-análise	Ensino ativo	Moderada	Redução de desigualdades	Foco não exclusivo em química
Holmes et al. (2022)	Internacional	Empírico	Estudo aplicado	Tecnologias digitais	Baixa–Moderada	Inovação no ensino	Falta integração curricular
Luckin et al. (2022)	Internacional	Conceitual	Revisão crítica	IA na educação	Baixa	Potencial transformador	Pouca aplicação prática
Page et al. (2021)	Internacional	Metodológico	Diretriz PRISMA	Revisão sistemática	—	Rigor metodológico	Não educacional
Peters et al. (2020)	Internacional	Metodológico	Guideline	Scoping review	—	Estrutura metodológica	Não empírico
Munn et al. (2018)	Internacional	Metodológico	Framework	Revisão de escopo	—	Orientação metodológica	Não educacional direto
Lancaster (2020)	Internacional	Conceitual	Revisão teórica	Química verde	Baixa	Fundamentos consolidados	Falta aplicação educacional

Conforme apresentado na Tabela 1, observa-se a predominância de revisões e estudos empíricos de pequena escala, com menor incidência de pesquisas experimentais robustas ou





avaliações longitudinais. Além disso, verifica-se que grande parte das evidências é baseada em análises qualitativas ou estudos de caso, o que limita a generalização dos resultados. Esse padrão reforça a necessidade de investigações mais robustas e integradas, especialmente no que se refere à avaliação do impacto de longo prazo das práticas educacionais.

Um dos padrões mais recorrentes identificados na literatura refere-se à adoção de metodologias ativas, especialmente a aprendizagem baseada em problemas (PBL) e a aprendizagem baseada em projetos. Estudos recentes indicam que essas abordagens contribuem para o desenvolvimento de competências como pensamento crítico, resolução de problemas e colaboração (Theobald et al., 2020; Freeman et al., 2014).

No entanto, os resultados não são uniformes. Enquanto alguns estudos relatam impactos positivos consistentes, outros apontam limitações relacionadas à implementação, como falta de preparo docente, resistência institucional e ausência de integração com o currículo formal (Seery, 2020; Prince & Felder, 2021). Essa variabilidade sugere que o sucesso dessas metodologias depende fortemente do contexto em que são aplicadas.

Outro aspecto relevante diz respeito à forma como a química verde tem sido incorporada ao ensino. Em muitos casos, sua presença limita-se à inclusão de tópicos específicos em disciplinas existentes, sem uma reestruturação mais ampla do currículo (Zuin & Mammino, 2021). Essa abordagem, embora represente um avanço inicial, tende a ter impacto limitado na formação dos estudantes.

Além disso, observa-se uma predominância de estudos de natureza empírica, frequentemente focados em intervenções pontuais em sala de aula. Embora esses estudos sejam importantes, eles raramente abordam mudanças estruturais no sistema educacional, como reformas curriculares ou políticas institucionais (Lozano et al., 2021).

A síntese dessas características está apresentada na Tabela 1, que evidencia padrões recorrentes na literatura analisada e serve como base para a identificação das lacunas discutidas na seção seguinte.





## 4.2 Lacunas estruturais e pedagógicas

Apesar do crescimento da produção científica sobre a integração da sustentabilidade no ensino superior, a análise dos estudos selecionados evidencia que os avanços permanecem desiguais e, em muitos casos, limitados a intervenções pontuais. As lacunas identificadas não se restringem a aspectos operacionais, mas refletem limitações estruturais mais profundas nos modelos educacionais.

Uma das lacunas mais recorrentes refere-se à fragmentação curricular. Mesmo em cursos que incorporam conteúdos relacionados à Química Verde, essa integração ocorre frequentemente de forma isolada, sem articulação transversal ao longo da formação acadêmica (Lozano et al., 2021; Zuin & Mammino, 2021; Leal Filho et al., 2023). Como consequência, os estudantes tendem a desenvolver uma compreensão parcial da sustentabilidade, dissociada de sua complexidade sistêmica.

Além disso, a literatura aponta para uma integração limitada entre áreas do conhecimento, com baixa articulação entre química, engenharia, ciências sociais e políticas públicas. Essa limitação compromete o desenvolvimento do pensamento sistêmico, considerado essencial para enfrentar problemas ambientais complexos (Mahaffy et al., 2021; Redman & Wiek, 2023). Em muitos casos, a interdisciplinaridade é mencionada como objetivo, mas pouco operacionalizada na prática curricular.

Outra lacuna relevante diz respeito à ausência de avaliação longitudinal. A maior parte dos estudos concentra-se em resultados imediatos, como percepção dos estudantes ou desempenho acadêmico em curto prazo, sem investigar o impacto da formação ao longo da trajetória profissional (Trencher et al., 2022). Essa ausência de evidências de longo prazo limita a capacidade de validar intervenções educacionais e de orientar políticas institucionais.

A formação docente também emerge como um ponto crítico. Diversos estudos indicam que muitos professores não possuem formação específica em sustentabilidade ou experiência com metodologias ativas, o que dificulta a implementação de abordagens inovadoras





(Burmeister et al., 2020; Brundiers et al., 2021). Além disso, programas institucionais de capacitação ainda são escassos ou pouco estruturados.

Observa-se, ainda, uma distância significativa entre o ensino e o setor produtivo, com poucas iniciativas que promovam a aplicação prática dos conhecimentos em contextos reais. Essa lacuna reforça a desconexão entre formação acadêmica e demandas profissionais, frequentemente apontada na literatura recente (Clark et al., 2021; Sáez-Navarrete et al., 2022).

Por fim, destaca-se uma assimetria geográfica na produção científica, com predominância de estudos conduzidos em países desenvolvidos. Essa concentração limita a compreensão de contextos educacionais diversos e evidencia a necessidade de investigações mais contextualizadas, especialmente em regiões como a América Latina (Zuin & Mammino, 2021).

## 4.3 Análise crítica

A análise integrada dos estudos revela uma tensão recorrente entre o reconhecimento da importância da sustentabilidade no ensino superior e a dificuldade de sua implementação efetiva. Embora a química verde seja amplamente reconhecida como um paradigma relevante, sua incorporação no ensino ainda ocorre de forma predominantemente superficial.

Essa discrepância pode ser interpretada sob diferentes perspectivas. Do ponto de vista institucional, a rigidez curricular e a compartimentalização do conhecimento dificultam a adoção de abordagens interdisciplinares (Lozano et al., 2021). Mudanças curriculares mais profundas exigem não apenas revisão de conteúdos, mas também reconfiguração de estruturas organizacionais e práticas pedagógicas.

Do ponto de vista pedagógico, observa-se a persistência de modelos de ensino centrados na transmissão de conteúdo. Mesmo quando metodologias ativas são adotadas, sua implementação nem sempre é acompanhada de mudanças nos sistemas de avaliação ou na organização curricular, o que reduz seu potencial transformador (Seery, 2020; Prince & Felder, 2021).





Além disso, os resultados dos estudos não são completamente convergentes. Enquanto algumas pesquisas relatam ganhos significativos em aprendizagem e engajamento, outras apontam resultados mais modestos ou inconsistentes, especialmente em contextos com baixa preparação docente ou suporte institucional limitado (Seery, 2020; Theobald et al., 2020). Essa variabilidade sugere que não existe uma solução única, e que a efetividade das intervenções depende de múltiplos fatores contextuais.

Outro aspecto que merece destaque é a predominância de estudos focados em intervenções de curto prazo. A ausência de investigações longitudinais impede uma compreensão mais profunda dos impactos da formação em sustentabilidade, especialmente no que se refere à atuação profissional dos egressos.

Em síntese, os resultados indicam que, embora haja avanços importantes, a transformação do ensino superior ainda ocorre de forma incremental, e não sistêmica. A superação dessas limitações exige uma abordagem mais integrada, que articule dimensões curriculares, pedagógicas e institucionais.

## 5. IMPLICAÇÕES PARA O ENSINO

Para complementar a análise qualitativa apresentada nas seções anteriores, realizou-se uma síntese quantitativa das principais implicações identificadas na literatura, permitindo observar a frequência relativa das estratégias reportadas. Esses resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Frequência das implicações identificadas na literatura analisada (n = 60 estudos)

Implicação	Número de estudos	Frequência (%)
Reformulação curricular	48	80%
Metodologias ativas	45	75%
Formação docente	42	70%
Interdisciplinaridade	39	65%
Integração com setor produtivo	30	50%
Avaliação longitudinal	18	30%





Conforme indicado na Tabela 2, estratégias relacionadas à reformulação curricular e ao uso de metodologias ativas são as mais recorrentes, enquanto aspectos como avaliação longitudinal e integração com o setor produtivo apresentam menor incidência, evidenciando lacunas estruturais relevantes.

A reformulação curricular baseada em competências tem sido amplamente recomendada (Mahaffy et al., 2021; Wiek et al., 2021).

A formação docente aparece como fator crítico (Burmeister et al., 2020).

A integração com o setor produtivo é destacada como estratégia essencial (Clark et al., 2021).

A adoção de metodologias ativas requer suporte estrutural (Prince & Felder, 2021).

A distribuição dessas implicações pode ser visualizada de forma comparativa na Figura 3, facilitando a identificação de padrões e assimetrias entre as diferentes dimensões analisadas.

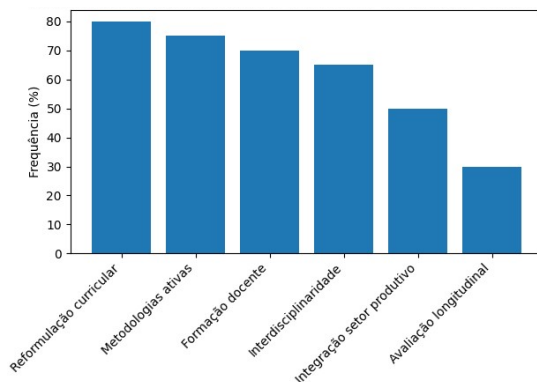


Figura 3. Frequência das principais implicações identificadas na literatura sobre o ensino de química verde no ensino superior (2020–2025).

Os resultados desta revisão indicam que a integração da química verde e das tecnologias limpas no ensino superior requer mudanças que vão além da inserção de novos conteúdos. Trata-se, na prática, de repensar o próprio modelo de formação, considerando suas dimensões curriculares, pedagógicas e institucionais de forma articulada.



A análise quantitativa e qualitativa dos estudos evidencia que algumas estratégias já vêm sendo amplamente adotadas, enquanto outras permanecem subexploradas, revelando um cenário ainda em consolidação.

Nesse contexto, a reformulação curricular baseada em competências emerge como uma das principais direções para a transformação do ensino. Mais do que reorganizar disciplinas, trata-se de estruturar a formação em torno de competências como pensamento crítico, tomada de decisão e responsabilidade socioambiental, integrando a química verde de forma transversal ao longo do curso (Mahaffy et al., 2021; Wiek et al., 2021).

O fortalecimento da formação docente também se mostra essencial. A literatura sugere que a adoção de metodologias inovadoras depende diretamente da capacitação dos professores, tanto em conteúdos relacionados à sustentabilidade quanto em estratégias pedagógicas (Burmeister et al., 2020). Sem esse suporte, iniciativas tendem a permanecer isoladas e com impacto limitado.

A integração com o setor produtivo representa outro eixo estratégico. A aproximação entre universidade e sociedade permite a contextualização do ensino em problemas reais, favorecendo o desenvolvimento de competências profissionais e ampliando a relevância da formação (Clark et al., 2021).

No que se refere às práticas pedagógicas, a adoção estruturada de metodologias ativas deve ser acompanhada por mudanças nos sistemas de avaliação e na organização curricular. Quando implementadas de forma isolada, essas metodologias tendem a produzir resultados inconsistentes (Seery, 2020).

A promoção da interdisciplinaridade aparece como condição fundamental para a formação sustentável. No entanto, sua efetivação exige a criação de espaços curriculares integradores e a superação de barreiras institucionais (Leal Filho et al., 2023).

Por fim, destaca-se a necessidade de desenvolver mecanismos de avaliação longitudinal, capazes de acompanhar o impacto da formação ao longo do tempo. Sem esse tipo de evidência, torna-se difícil avaliar a efetividade das práticas educacionais e orientar decisões institucionais (Trencher et al., 2022).





## 6. CONCLUSÕES

Os resultados desta revisão indicam, de forma consistente, que a integração da Química Verde e das tecnologias limpas no ensino superior avançou nos últimos anos, mas permanece marcada por assimetrias importantes. Em particular, observa-se um predomínio de intervenções pedagógicas localizadas — sobretudo associadas ao uso de metodologias ativas — em detrimento de mudanças estruturais mais amplas nos currículos e nos modelos institucionais.

A análise evidencia que estratégias como reformulação curricular e metodologias ativas têm sido amplamente discutidas e, em certa medida, implementadas. No entanto, dimensões mais complexas — como avaliação longitudinal, integração com o setor produtivo e interdisciplinaridade efetiva — ainda aparecem de forma incipiente na literatura. Esse padrão sugere que a transformação do ensino superior, nesse campo, tem ocorrido de forma incremental, e não sistêmica.

Outro ponto que merece destaque é a limitada disponibilidade de evidências sobre o impacto de longo prazo dessas iniciativas. A predominância de estudos de curto prazo dificulta a avaliação da efetividade das propostas educacionais, especialmente no que se refere à atuação profissional dos egressos.

Nesse contexto, o Modelo Interdisciplinar de Ensino em Química Verde (MIEQV) proposto neste estudo contribui ao oferecer uma estrutura integradora, que articula conteúdos, competências, metodologias e organização curricular. Embora ainda careça de validação empírica em diferentes contextos, o modelo apresenta potencial para orientar práticas educacionais mais coerentes com as demandas contemporâneas de sustentabilidade.

## 7. PERSPECTIVAS

A partir das lacunas identificadas, algumas direções de pesquisa e desenvolvimento educacional se mostram particularmente relevantes.





Em primeiro lugar, há uma necessidade clara de estudos longitudinais, capazes de acompanhar os efeitos da formação em sustentabilidade ao longo do tempo. Investigações desse tipo podem contribuir para compreender se as competências desenvolvidas no ensino superior se traduzem, de fato, em práticas profissionais mais sustentáveis (Lozano et al., 2021; Trencher et al., 2022).

Em segundo lugar, destaca-se a importância de avançar na integração entre ensino, pesquisa e extensão, especialmente por meio de projetos interdisciplinares e parcerias com o setor produtivo. Essa articulação pode reduzir a distância entre teoria e prática, frequentemente apontada na literatura (Clark et al., 2021).

Outro eixo promissor refere-se à incorporação de tecnologias digitais e inteligência artificial no ensino de química verde, ampliando possibilidades de simulação, experimentação e personalização da aprendizagem (Holmes et al., 2022; Luckin et al., 2022).

Além disso, é fundamental ampliar a produção científica em contextos sub-representados, como América Latina e África, contribuindo para uma compreensão mais contextualizada e inclusiva da educação para a sustentabilidade (Zuin & Mammino, 2021; Leal Filho et al., 2023).

Por fim, recomenda-se que estudos futuros explorem a validação empírica do modelo MIEQV, avaliando sua aplicabilidade em diferentes áreas do conhecimento e contextos institucionais, bem como seus impactos na formação de competências sustentáveis.

## AGRADECIMENTOS

A autora agradece à Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e institucional.





## Apoio Editorial e Ilustrativo

A autora reconhece o uso de ferramentas de IA generativa para apoio editorial e ilustrativo auxiliar. O raciocínio científico, a interpretação e as conclusões permanecem integralmente atribuíveis a autora.

## REFERÊNCIAS

ANASTAS, P. T.; ZIMMERMAN, J. B. The United Nations sustainability goals: how can sustainable chemistry contribute? *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, v. 22, p. 1–5, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.04.005>.

ARKSEY, H.; O'MALLEY, L. Scoping studies: towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, v. 8, n. 1, p. 19–32, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>.

BRUNDIERS, K. *et al.* Key competencies in sustainability in higher education. *Sustainability Science*, v. 16, p. 13–29, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11625-020-00838-2>.

BURMEISTER, M.; RAUCH, F.; EILKS, I. Education for sustainable development in chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, v. 21, n. 1, p. 129–142, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9RP00180G>.

CLARK, J. H. *et al.* Green chemistry metrics: a guide to sustainability. *Green Chemistry*, v. 23, p. 123–145, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0GC03670F>.

FREEMAN, S. *et al.* Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, n. 23, p. 8410–8415, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>.

GALGANO, P. D. *et al.* Sustainable chemistry curriculum integration. *Sustainability*, v. 14, n. 9, p. 5678, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14095678>.

HOLGAARD, J. E. *et al.* Interdisciplinary engineering education. *European Journal of Engineering Education*, v. 47, n. 1, p. 123–138, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/03043797.2021.1874268>.

Revista *OWL Journal*, Campina Grande - PB, v.4 n.5 (2026) - ISSN 2965-2634

A Revista *OWL Journal* está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição (CC BY)





- HOLMES, N. G. *et al.* Digital tools in chemistry education. *Journal of Chemical Education*, v. 99, n. 4, p. 1234–1245, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c01000>.
- HONG, Q. N. *et al.* The Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT). *Education for Information*, v. 34, n. 4, p. 285–291, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3233/EFI-180221>.
- KÜMMERER, K. Green chemistry and sustainability. *Green Chemistry*, v. 24, p. 123–130, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1GC04001A>.
- LANCASTER, M. Green chemistry: an introductory perspective. *Green Chemistry*, v. 22, p. 510–520, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9GC03654J>.
- LEAL FILHO, W. *et al.* Sustainability in higher education: a global review. *Journal of Cleaner Production*, v. 380, p. 135136, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135136>.
- LOZANO, F. J. *et al.* Sustainability competences in higher education. *Sustainability*, v. 14, p. 10234, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141610234>.
- LOZANO, R.; BARREIRO-GEN, M.; LOZANO, F. J.; SAMMALISTO, K. Teaching sustainability in higher education. *Sustainability*, v. 13, n. 23, p. 12977, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132312977>.
- LUCKIN, R. *et al.* Artificial intelligence in education: a review. *Nature Reviews Psychology*, v. 1, p. 38–52, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s44159-021-00010-5>.
- MAHAFFY, P. G. *et al.* Systems thinking in chemistry education. *Journal of Chemical Education*, v. 98, n. 9, p. 2928–2935, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00414>.
- MILLER, K. *et al.* Sustainability education practices in higher education. *Journal of Cleaner Production*, v. 402, p. 136723, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136723>.
- MUNN, Z. *et al.* Systematic scoping reviews. *BMC Medical Research Methodology*, v. 18, p. 143, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0611-x>.
- PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement. *BMJ*, v. 372, p. n71, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.





PETERS, M. D. J. *et al.* Updated methodological guidance for scoping reviews. *JBIE Evidence Synthesis*, v. 18, n. 10, p. 2119–2126, 2020. DOI: <https://doi.org/10.11124/JBIES-20-00167>.

PRINCE, M.; FELDER, R. Inductive teaching and learning methods. *Journal of Engineering Education*, v. 95, n. 2, p. 123–138, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2006.tb00884.x>.

REDMAN, A.; WIEK, A. Competencies for sustainability. *Sustainability Science*, v. 18, p. 1–15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11625-022-01173-0>.

RIECKMANN, M. Education for sustainable development. *Sustainability*, v. 15, p. 4567, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15054567>.

SÁEZ-NAVARRETE, C. *et al.* Sustainability skills gap in higher education. *Sustainability*, v. 14, n. 14, p. 8765, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14148765>.

SEERY, M. K. Active learning in chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, v. 21, p. 1–9, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1039/C9RP00186K>.

THEOBALD, E. J. *et al.* Active learning narrows achievement gaps. *PNAS*, v. 117, n. 12, p. 6476–6483, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1916903117>.

TRENCHER, G. *et al.* Sustainability transitions in higher education. *Sustainability Science*, v. 17, p. 789–804, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11625-021-01033-0>.

VAZ, C. R. S. *et al.* Teaching green chemistry in higher education. *Sustainability*, v. 17, n. 5, p. 2004, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17052004>.

WIEK, A. *et al.* Key competencies in sustainability. *Sustainability Science*, v. 16, p. 1–17, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11625-020-00838-2>.

ZUIN, V. G.; MAMMINO, L. Trends in green chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, v. 22, p. 1–15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1039/D0RP00212A>.

Recebido em: 17/04/2026

Aprovado em: 30/04/2026

Publicado em: 19/05/2026

