

**QUÍMICA 5.0: A CONVERGÊNCIA ENTRE TECNOLOGIAS DIGITAIS E
ECONOMIA CIRCULAR PARA PRÁTICAS QUÍMICAS SUSTENTÁVEIS**

**CHEMISTRY 5.0: MERGING DIGITAL TECHNOLOGIES AND CIRCULAR
ECONOMY FOR SUSTAINABLE CHEMICAL PRACTICES**

Recebido em: 18/03/2026

Reenviado em: 02/06/2026

Aceito em: 12/08/2026

Publicado em: 31/08/2026

Luana Costa de Souza¹ 

Universidade Federal de São João del-Rei

Ariene de Moraes Alves² 

Universidade Federal de São João del-Rei

Boutros Sarrouh³ 

Universidade Federal de São João del-Rei

Igor José Boggione Santos⁴ 

Universidade Federal de São João del-Rei

Érika Cristina Cren⁵ 

Universidade Federal de Minas Gerais

Renata Carolina Zanetti Lofrano⁶ 

Universidade Federal de São João del-Rei

Resumo: No contexto da transformação digital e da crescente demanda por sustentabilidade, a integração dos princípios da Indústria 5.0 na indústria química surge como um caminho promissor para alcançar uma inovação sustentável e centrada no ser humano. Este artigo examina a sinergia entre tecnologias digitais — como Inteligência Artificial (IA), Internet das Coisas (IoT), gêmeos digitais e robótica — e modelos de economia circular, enfatizando a importância da ecoeficiência, da integração digital e do desenvolvimento da força de trabalho. Estudos de caso ilustram a otimização de processos industriais, incluindo a aplicação de IA no controle de incrustação de membranas para tratamento de água, o desenvolvimento de compósitos de concreto polimérico a partir de resíduos e a utilização contínua de glicerol na síntese de solketal. Além disso, discutimos indicadores de circularidade no setor químico brasileiro, destacando os efeitos positivos de abordagens sustentáveis na redução de emissões e no consumo de energia. As principais conclusões revelam que a digitalização de processos e a

¹ Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São João del-Rei. Brasil, Minas Gerais, Ouro Branco. E-mail: luana.souza@aluno.ufsj.edu.br

² Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São João del-Rei. Brasil, Minas Gerais, Ouro Branco. E-mail: ariemoraesalves123@aluno.ufsj.edu.br

³ Docente do Departamento de Química, Biotecnologia e Engenharia de Bioprocessos (DQBIO), Ouro Branco, MG, Brasil. Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). E-mail: bsarrouh@ufsj.edu.br

⁴ Docente do Departamento de Química, Biotecnologia e Engenharia de Bioprocessos (DQBIO), Ouro Branco, MG, Brasil. Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). E-mail: igorboggione@ufsj.edu.br

⁵ Docente do Departamento de Engenharia Química (DEQ), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais (EE/UFGM), Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: erikacren@ufmg.br

⁶ Docente do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São João del-Rei. Brasil, Minas Gerais, Ouro Branco. E-mail: renataczlofrano@ufsj.edu.br

adoção de tecnologias avançadas podem mitigar significativamente os impactos ambientais, ao mesmo tempo em que fomentam a inovação na indústria química. Isso fortalece as relações de colaboração entre os setores público e privado e promove novos modelos de negócios baseados em princípios circulares. Tais inovações não apenas abordam os desafios da gestão de resíduos e das emissões de poluentes, mas também geram oportunidades para o crescimento econômico e o desenvolvimento regional sustentável.

Palavras-chave: Eficácia Ecológica; Inteligência Artificial; Internet das Coisas (IoT); Química Verde; Otimização de Processos Industriais.

Abstract: In the context of digital transformation and the increasing demand for sustainability, the integration of Industry 5.0 principles within the chemical industry emerges as a promising avenue for achieving sustainable and human-centered innovation. This article examines the synergy between digital technologies—such as Artificial Intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), digital twins, and robotics—and circular economy models, emphasizing the significance of eco-efficiency, digital integration, and workforce development. Case studies illustrate industrial process optimization, including the application of AI in membrane fouling control for water treatment, the development of polymer concrete composites from waste, and the continuous utilization of glycerol in solketal synthesis. Furthermore, we discuss circularity indicators in the Brazilian chemical sector, highlighting the positive effects of sustainable approaches on emissions reduction and energy consumption. Key findings reveal that process digitalization and the adoption of advanced technologies can significantly mitigate environmental impacts while fostering innovation in the chemical industry. This enhances collaborative relationships between public and private sectors and promotes new business models rooted in circular principles. Such innovations not only address waste management and pollutant emissions challenges but also generate opportunities for economic growth and sustainable regional development.

Keywords: Eco-efficiency; Artificial Intelligence; Internet of Things (IoT); Green Chemistry; Industrial Process Optimization.

INTRODUÇÃO

A indústria química está passando por uma transformação impulsionada pela implementação de tecnologias digitais e pela crescente pressão ambiental para a adoção de práticas sustentáveis. Tradicionalmente caracterizado pelo alto consumo de matérias-primas e pela geração de resíduos industriais, o setor enfrenta agora uma mudança de paradigma impulsionada por inovações tecnológicas e pela necessidade urgente de reduzir seu impacto ambiental (Diefenbach *et al.*, 2017). Conceitos ligados à economia circular e à química verde ganharam destaque como alternativas viáveis para reestruturar processos industriais, promover a reutilização de materiais e integrar fontes de energia renováveis (Ferro *et al.*, 2018).

Da mesma forma, a digitalização — representada pelo uso de IA e outras ferramentas digitais — provou ser essencial para otimizar processos, permitindo maior controle e eficiência em operações industriais complexas (Valadas *et al.*, 2019). A integração desses dois pilares — sustentabilidade e digitalização — pode ser denominada “Química 5.0: Inovação Sustentável e Digital na Indústria Química”, uma abordagem que alinha os avanços tecnológicos com a necessidade de transformação sustentável dos métodos industriais tradicionalmente lineares.

Este artigo discute a interseção desses domínios, identificando os benefícios e desafios inerentes à fusão de tecnologias digitais com modelos de economia circular na indústria química. Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo analisar criticamente a

convergência entre tecnologias digitais emergentes e os princípios da economia circular na indústria química, discutindo como essa integração pode contribuir para a sustentabilidade ambiental, a eficiência operacional e a competitividade industrial. Além disso, busca identificar oportunidades, desafios, fatores estratégicos e institucionais associados à implementação do conceito de Química 5.0, com base em evidências científicas recentes.

METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa de natureza qualitativa, exploratória e descritiva, desenvolvida por meio de revisão narrativa da literatura científica. A investigação teve como foco a análise da convergência entre tecnologias digitais emergentes e os princípios da economia circular aplicados à indústria química, no contexto da denominada Química 5.0.

Foram consultadas publicações científicas indexadas em bases de dados nacionais e internacionais, incluindo Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI e Google Scholar. A seleção dos trabalhos priorizou artigos publicados entre 2016 e 2025, contemplando temas relacionados à Indústria 4.0 e 5.0, inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT), gêmeos digitais, economia circular, química verde, sustentabilidade industrial e transformação digital. A análise dos estudos foi realizada por meio de leitura crítica e interpretação temática, buscando identificar tendências tecnológicas, aplicações industriais, benefícios ambientais, desafios regulatórios, fatores estratégicos e impactos socioeconômicos associados à adoção de práticas sustentáveis na indústria química.

Os dados obtidos foram organizados em categorias analíticas que permitiram discutir a integração entre digitalização e sustentabilidade. Também foi possível, a partir destes, propor uma visão sistêmica da Química 5.0 como modelo de inovação sustentável para o setor químico.

DIGITALIZAÇÃO NA INDÚSTRIA QUÍMICA

A transformação digital na indústria química caracteriza-se pela introdução de tecnologias como Inteligência Artificial (IA), Aprendizado de Máquina (AM) e Aprendizado Profundo (AP) para melhorar a eficiência, a qualidade dos processos e a tomada de decisões (Lam *et al.*, 2019). Nesse contexto, a aplicação da IA em processos industriais, como o controle e a prevenção de incrustações em membranas utilizadas em estações de tratamento de água, representa uma das inovações mais promissoras (Marzi *et al.*, 2018).

Além da otimização operacional, a digitalização promove uma mudança estrutural na forma como os processos químicos são concebidos e gerenciados. Tecnologias como gêmeos

digitais permitem a simulação de cenários operacionais complexos, reduzindo custos experimentais e aumentando a segurança dos processos. Entretanto, a implementação dessas ferramentas ainda enfrenta desafios relacionados à disponibilidade de infraestrutura digital, à interoperabilidade de sistemas e à qualificação da força de trabalho, especialmente em países em desenvolvimento. Dessa forma, embora a transformação digital represente uma oportunidade significativa para a sustentabilidade industrial, sua adoção demanda investimentos contínuos e planejamento estratégico.

REUTILIZAÇÃO DE MATERIAIS E REDUÇÃO DE RESÍDUOS

Estudos sobre compósitos de concreto polimérico (PCCs) demonstram que a utilização de resíduos industriais na fabricação desses materiais reduz significativamente a demanda por matérias-primas virgens e as emissões de CO₂ durante a produção (Rana, 2020). Ao incorporar resíduos e subprodutos, os PCCs não apenas melhoram a qualidade das estruturas construídas, mas também representam uma alternativa ecologicamente correta à produção convencional de concreto. Da mesma forma, a valorização contínua do glicerol — um subproduto comum na indústria de biodiesel — por meio de sua conversão em solketal exemplifica o conceito de “resíduo como recurso”. O solketal, além de ser um aditivo promissor para combustíveis, possui propriedades que aumentam os índices de octanagem e a estabilidade à oxidação, melhorando assim o desempenho do combustível e contribuindo para a redução das emissões veiculares (Leising *et al.*, 2018). No entanto, apesar dos avanços tecnológicos, ainda existem lacunas significativas na avaliação dos impactos ambientais desses processos, ressaltando a necessidade de estudos de Análise do Ciclo de Vida (ACV) (Shvets *et al.*, 2022).

INDICADORES E MODELOS DE CIRCULARIDADE

O desenvolvimento de indicadores de circularidade, como o Índice de Circularidade (CEI) proposto para o setor químico brasileiro, permite uma avaliação precisa dos processos industriais. Esse índice leva em consideração variáveis como geração de resíduos, emissões atmosféricas e consumo de energia, proporcionando assim uma visão abrangente do desempenho ambiental do setor (Jeliazkova *et al.*, 2023). Por meio de análises de componentes principais e modelos de regressão, pesquisadores identificaram fatores estratégicos — como receita líquida, investimentos em melhorias e capital humano — que impactam inversamente o desempenho circular, revelando que regiões economicamente competitivas nem sempre apresentam altos índices de circularidade (Bryan *et al.*, 2018). A tabela a seguir apresenta uma

comparação entre alguns indicadores de economia circular utilizados na avaliação do setor químico brasileiro:

Tabela 1 – Comparação de indicadores da economia circular na indústria química.

Indicador	Descrição	Fonte
Geração de resíduos (%)	Porcentagem de resíduos gerados em relação à produção total	Kormishkina et al., 2021
Emissões atmosféricas (kg CO ₂)	Quantidade de CO ₂ emitida na produção industrial	Leising et al., 2018; Kormishkina et al., 2021
Consumo de energia (kWh)	Energia utilizada durante os processos de produção	Kormishkina et al., 2021
Taxa de reciclagem (%)	Porcentagem de resíduos reciclados em relação aos descartados	Asaithambi et al., 2019
Uso de materiais reciclados (%)	Proporção de matérias-primas recicladas utilizadas	Asaithambi et al., 2019

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Jeliaskova *et al.* (2023), Bryan *et al.* (2018), Kormishkina e Shamsutdinova (2021) e Asaithambi e Rajendran (2019).

Embora os indicadores de circularidade representem ferramentas relevantes para mensuração do desempenho ambiental, ainda existe uma ausência de consenso internacional quanto às metodologias utilizadas para sua construção e interpretação. Essa limitação dificulta comparações entre regiões, setores industriais e países, tornando necessária a padronização de métricas que permitam avaliações mais robustas e transparentes dos avanços em economia circular.

SUSTENTABILIDADE E IMPACTO AMBIENTAL NA INDÚSTRIA QUÍMICA

A sustentabilidade na indústria química é uma demanda emergente, impulsionada pela necessidade de reduzir o impacto ambiental dos processos industriais e mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Esse setor, historicamente associado a altas emissões de gases de efeito estufa e à produção de resíduos perigosos, está buscando ativamente alternativas que promovam um equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental (Agarwal *et al.*, 2018).

DESAFIOS AMBIENTAIS E EMISSÕES DE CO₂

A fabricação de cimento e os processos industriais tradicionais são frequentemente citados como fatores que contribuem significativamente para as emissões de CO₂, agravando o aquecimento global e a degradação ambiental (Asaithambi *et al.*, 2019). No entanto, estudos demonstram que a substituição de práticas convencionais por alternativas baseadas nos princípios da economia circular — como a utilização de compósitos poliméricos que incorporam resíduos industriais — pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa (Zimmerman *et al.*, 2020). A aplicação de soluções sustentáveis, em conjunto com a otimização digital de processos, facilita uma redução notável na demanda por novos recursos, promovendo um ciclo de vida mais eficiente para os materiais (Int, 2019).

VALORIZAÇÃO DE SUBPRODUTOS E MINIMIZAÇÃO DE RESÍDUOS

A transformação de subprodutos industriais, como a conversão do glicerol em solketal, destaca o potencial dos processos sustentáveis para mitigar os impactos ambientais negativos. Embora o biodiesel contribua para a redução das emissões de CO₂, o descarte inadequado do glicerol representa um desafio ambiental significativo. A valorização do glicerol como aditivo de combustível exemplifica processos que convertem resíduos em produtos de alto valor (Farhana *et al.*, 2022). No entanto, é crucial realizar estudos abrangentes sobre os impactos ambientais desses processos utilizando metodologias de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para validar a eficácia e a sustentabilidade das tecnologias propostas (Wu *et al.*, 2019).

MONITORAMENTO AMBIENTAL E REDUÇÃO DE IMPACTOS

A digitalização contribui significativamente para a redução dos impactos ambientais na indústria química. Com o uso de sistemas automatizados, sensores e ferramentas de inteligência artificial, é possível estabelecer um monitoramento em tempo real de parâmetros ambientais, como concentrações de poluentes e consumo de energia. Essa abordagem permite: i) *Deteção precoce de desvios ambientais*, pois por meio da análise contínua de dados, os sistemas podem identificar rapidamente quaisquer anomalias, reduzindo o risco de contaminação e danos ambientais; ii) *Implementação de ações corretivas*, pois com base em dados precisos, medidas corretivas podem ser implementadas imediatamente, evitando a deterioração do processo e minimizando o impacto ambiental; iii) *Melhoria dos indicadores de sustentabilidade*, sendo que ao integrar dados operacionais e ambientais, as empresas podem ajustar seus processos para melhorar os indicadores de sustentabilidade, como a redução efetiva do consumo de energia e a diminuição das emissões de gases poluentes.

Essa abordagem integrada permite uma visão holística dos processos de produção, com responsabilidade ambiental.

Tabela 2 – Indicadores ambientais e metas de sustentabilidade na indústria química.

Indicador	Unidade	Metas de sustentabilidade	Referência
Emissões de CO ₂	kg/ano	Reduzir em 30 % nos próximos 5 anos	Asaithambi et al., 2019
Consumo de energia	kWh/ton	Aumentar a eficiência em 20 %	Kormishkina et al., 2021
Porcentagem de resíduos reciclados	%	Alcançar uma taxa de reutilização de 70 %	Asaithambi et al., 2019
Utilização de matérias-primas recicladas	%	Alcançar uma participação de 40 %	Asaithambi et al., 2019
Índice de Circularidade (CEI)	Pontuação	Melhoria contínua dos indicadores ambientais	Kormishkina et al., 2021

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Asaithambi e Rajendran (2019), Kormishkina e Shamsutdinova (2021), Zimmerman e Winter (2020) e Int (2019).

FATORES ESTRATÉGICOS E INSTITUCIONAIS PARA A INOVAÇÃO

A transformação digital e a implementação de modelos de economia circular na indústria química são processos complexos que dependem não apenas de avanços tecnológicos, mas também de fatores estratégicos e institucionais. Entre eles estão políticas governamentais, investimentos em infraestrutura, incentivos fiscais e capacitação de profissionais para operar e gerenciar novas tecnologias.

FATORES ESTRATÉGICOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA INOVAÇÃO

Uma pesquisa realizada no setor químico brasileiro indica que os indicadores de desempenho circular, como o Índice de Circularidade (CEI), são fortemente influenciados por fatores estratégicos. Entre estes, destacam-se os seguintes: i) *Receita líquida e investimentos*, havendo evidências que sugerem que o foco no crescimento econômico pode implicar em um conflito com práticas sustentáveis em algumas regiões, embora sejam necessárias mais pesquisas para estabelecer uma correlação inversa definitiva entre a receita líquida das empresas e o desempenho no Índice de Sustentabilidade Empresarial (CEI), particularmente no contexto brasileiro (Stankevičienė et al., 2020); ii) *Investimentos em melhorias e capacitação*, pois investir em melhorias tecnológicas e na capacitação dos funcionários é fundamental para as

empresas que pretendem adotar práticas de economia circular. Verificou-se que tais investimentos otimizam os processos e reduzem o desperdício (Kormishkina *et al.*, 2021); iii) *Adoção de tecnologias digitais*, dado que a integração de IA, IoT e outras ferramentas digitais permite identificar oportunidades de redução de custos e melhorar a sustentabilidade operacional. Essas tecnologias facilitam o monitoramento contínuo e possibilitam respostas rápidas às mudanças nas condições operacionais, alinhando a eficiência operacional com as metas de sustentabilidade (Dewick *et al.*, 2020).

FATORES INSTITUCIONAIS E POLÍTICAS PÚBLICAS

Além das estratégias internas, a ação governamental e a adoção de políticas públicas adequadas desempenham um papel crucial na promoção da inovação sustentável. Os principais aspectos institucionais incluem: i) *Políticas de incentivo e regulamentação*, no sentido da criação de incentivos fiscais, a implementação de normas ambientais rigorosas e o desenvolvimento de políticas que promovam a economia circular são fundamentais para que as empresas invistam em tecnologias sustentáveis (Gao; Chen, 2023); ii) *Parcerias e colaborações*, sendo que a colaboração entre universidades, instituições de pesquisa, órgãos governamentais e o setor privado promove a troca de conhecimentos e o desenvolvimento de soluções inovadoras que atendam às demandas do mercado e da sociedade (Geissdoerfer *et al.*, 2017); iii) *Desafios regulatórios*, pois, apesar dos avanços, a falta de um consenso metodológico para avaliar a circularidade dos processos e a fragilidade de algumas regulamentações ainda representam barreiras significativas para a plena implementação de práticas sustentáveis (Ratnasabapathy *et al.*, 2021); iv) *Formação e educação*, pois o fortalecimento da educação e da formação profissional, juntamente com programas de capacitação contínua, é essencial para garantir que os profissionais do setor estejam preparados para lidar com as inovações tecnológicas e os desafios ambientais (Kasiri; Movassaghi, 2023).

DESAFIOS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA QUÍMICA 5.0

Apesar dos benefícios associados à Química 5.0, sua implementação enfrenta desafios significativos. Entre eles destacam-se os elevados custos iniciais de digitalização, a necessidade de atualização tecnológica contínua, a resistência organizacional às mudanças, as dificuldades regulatórias e a carência de profissionais especializados em tecnologias digitais aplicadas aos

processos químicos. Além disso, questões relacionadas à segurança cibernética e à proteção de dados industriais tornam-se cada vez mais relevantes à medida que aumenta a conectividade dos sistemas produtivos. Esses fatores demonstram que a transição para modelos produtivos mais inteligentes e circulares depende não apenas de avanços tecnológicos, mas também de transformações institucionais e culturais.

O IMPACTO DA INOVAÇÃO DIGITAL E SUSTENTÁVEL NO PANORAMA ECONÔMICO

A sinergia entre a digitalização e a economia circular não apenas transforma os processos industriais, mas também gera impactos positivos no panorama econômico. As empresas que adotam essas práticas tendem a apresentar maior resiliência, menor dependência de recursos naturais e melhor adaptação às mudanças do mercado (Rani *et al.*, 2019). Além disso, essa abordagem facilita a criação de novos modelos de negócios, que vão desde a produção de materiais reciclados até a prestação de serviços baseados na otimização de processos e no monitoramento ambiental. A integração dessas estratégias demonstrou que a inovação sustentável é um fator decisivo para a competitividade global da indústria química. Ao mesmo tempo, contribui para o desenvolvimento regional e a melhoria da qualidade de vida, promovendo um ambiente de negócios mais consciente e responsável em relação ao meio ambiente (Yeo *et al.*, 2020).

Figura 2 (Representação visual) – Diagrama das relações entre fatores estratégicos e institucionais.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Diagrama que ilustra a interação entre fatores estratégicos e institucionais que impulsionam a inovação sustentável na indústria química.

PERSPECTIVAS

O panorama futuro da indústria química depende da expansão da digitalização e das práticas da economia circular, da integração de novas tecnologias e do desenvolvimento de soluções inovadoras para os desafios ambientais. As principais áreas a serem enfatizadas no futuro incluem: i) *Expansão do uso de gêmeos digitais*, sendo que a simulação de processos industriais por meio de gêmeos digitais pode fornecer insights preditivos mais precisos, permitindo ajustes em tempo real e a adoção de estratégias de manutenção preditiva (Hattori, 2012); ii) *Novos modelos de parceria*, pois a interligação entre universidades, institutos de pesquisa e empresas privadas será fundamental para o desenvolvimento de novas tecnologias e a formação profissional, alinhando a pesquisa aplicada aos desafios reais do setor (Xue *et al.*, 2024); iii) *Iniciativas governamentais em prol da sustentabilidade*, pois políticas públicas mais robustas, voltadas para a economia circular, poderiam promover investimentos em tecnologias sustentáveis, estimulando a inovação e a competitividade da indústria nacional (Marques *et al.*, 2020); iv) *Desenvolvimento da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)*, dado que a realização de estudos aprofundados sobre os impactos ambientais de processos inovadores, como a produção de solketal, é essencial para validar a viabilidade ambiental das tecnologias e orientar aplicações futuras (Liang *et al.*, 2023); v) *Integração de tecnologias emergentes*, pois a robótica avançada, a realidade aumentada e os sistemas de comunicação 5G têm o potencial de transformar ainda mais os processos industriais, aumentando a eficiência operacional e a segurança (Saber *et al.*, 2018).

Outra tendência emergente refere-se à incorporação de sistemas de inteligência artificial generativa e modelos avançados de análise preditiva no desenvolvimento de novos materiais, catalisadores e rotas químicas sustentáveis. Essas tecnologias poderão acelerar significativamente processos de pesquisa e desenvolvimento, contribuindo para a redução do consumo de recursos e para a inovação orientada pela sustentabilidade.

Este trabalho destaca a importância de alinhar a digitalização e a economia circular como estratégias complementares, estabelecendo as bases para uma indústria química inovadora e sustentável, na qual o avanço tecnológico e a responsabilidade socioambiental se unem para transformar desafios em oportunidades e construir um futuro resiliente e próspero para todas as partes interessadas envolvidas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise realizada demonstra que a integração entre tecnologias digitais e princípios da economia circular constitui um dos principais caminhos para a construção de uma indústria química mais sustentável, eficiente e competitiva. Ferramentas como inteligência artificial, Internet das Coisas, gêmeos digitais e sistemas avançados de monitoramento possibilitam ganhos operacionais significativos, ao mesmo tempo em que contribuem para a redução de impactos ambientais.

Os resultados da literatura analisada indicam que a adoção dessas tecnologias favorece a otimização de processos, a valorização de resíduos, a redução do consumo de recursos naturais e o aprimoramento dos indicadores de circularidade. Entretanto, desafios relacionados à infraestrutura tecnológica, capacitação profissional, investimentos financeiros e harmonização regulatória ainda representam barreiras relevantes para sua ampla implementação.

Além dos aspectos tecnológicos, observou-se que fatores institucionais, políticas públicas de incentivo e parcerias entre universidades, centros de pesquisa e setor produtivo desempenham papel fundamental na consolidação da Química 5.0 como modelo de desenvolvimento sustentável. Conclui-se, então, que a convergência entre digitalização e economia circular representa uma oportunidade estratégica para transformar a indústria química em um setor mais resiliente, inovador e alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Estudos futuros devem aprofundar a avaliação quantitativa dos impactos dessas tecnologias, especialmente por meio de análises de ciclo de vida, indicadores de circularidade e estudos de aplicação em escala industrial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio institucional e infraestrutural.

DECLARAÇÕES E MANIFESTAÇÕES
Conflitos de interesse: Os autores declaram não ter conflitos de interesse financeiros ou não financeiros conhecidos que pudessem, aparentemente, influenciar o trabalho relatado neste artigo.
Financiamento: Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.
Disponibilidade de dados e materiais: Dados disponíveis mediante solicitação dos autores.
Aprovação ética e consentimento para participar: Não aplicável.
Consentimento para publicação: Os autores concordam com a publicação deste artigo
Contribuição do autor: Conceitualização, R.C.Z.L.; metodologia, R.C.Z.L.; investigação, R.C.Z.L.; validação, R.C.Z.L.; análise formal, R.C.Z.L.; supervisão, R.C.Z.L.; visualização, R.C.Z.L.; administração do projeto, R.C.Z.L.; redação — rascunho original, R.C.Z.L.; redação — revisão e edição, R.C.Z.L. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.
Declaração sobre a IA generativa e as tecnologias assistidas por ia no processo de redação: durante a elaboração deste trabalho, o autor utilizou o Scispace para pesquisar referências bibliográficas e o Gemini para preparar o resumo gráfico. Após utilizar essa ferramenta/serviço, os autores revisam e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

- ABUBAKAR, I.; HANDAYANI, D. Implicações jurídicas da implementação dos princípios de finanças sustentáveis no setor bancário sobre as obrigações de relatórios de sustentabilidade. **Jurnal Dinamika Hukum**, v. 19, n. 1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.20884/1.jdh.2019.19.1.2189>.
- AGARWAL, A.; KHATKAR, V. Desafios ambientais na indústria farmacêutica: uma revisão. **Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research**, v. 11, n. 2, p. 1-8, 2018. DOI: <https://doi.org/10.22159/ajpcr.2018.v11i2.23160>.
- AKRATOS, C. S.; TZOUPANOS, N. D. Economia circular na engenharia química: a necessidade de ação. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 169, p. 105449, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105449>.
- ASAITHAMBI, K.; RAJENDRAN, S. Fábricas de cimento e emissões de CO₂: uma preocupação global. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 199-210, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.100>.
- ASHOK, L.; RAMA MURTHY, B. Real-time measurement and monitoring of industrial pharmaceutical chemical reactor process parameters (temperature, level and pressure) using PLC and SCADA system. **International Journal of Engineering Research and Technology**, v. 9, n. 7, 2020. DOI: <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS070006>.

BHANDARI, A. *et al.* A hybrid IIoT-based system for real-time monitoring and control of industrial processes. **Journal of Algebraic Statistics**, v. 11, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.52783/jas.v11i1.1434>.

BOFFITO, D.; RIVAS, A. Automação digital: transformando processos industriais químicos. **Journal of Industrial Ecology**, v. 25, n. 5, p. 998-1009, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.12990>.

BRYAN, J.; MILLER, S. Relacionando competitividade econômica e circularidade no setor químico. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 168, p. 105318, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105318>.

CHEN, H.; ZHANG, Y.; ZHANG, Y. A construção de uma civilização ecológica promove o investimento em tecnologia por parte das empresas? Um experimento quase-natural. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1002506>.

CLUNE, S.; ZEHNDER, A. Os três pilares da estrutura de sustentabilidade: abordagens para leis e governança. **Journal of Environmental Protection**, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4236/jep.2018.93015>.

COLE, R.; SOTERO, F. J.; HUNTER, N. Aprendizado profundo na tecnologia de membranas: aplicações e perspectivas futuras. **Membranes**, v. 9, n. 4, p. 62, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes9040062>.

DEWICK, P.; BARLOW, C. Financiamento da economia circular: vencedor indiscutível ou proposta arriscada? **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 2, p. 262-272, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.13025>.

DIEFENBACH, A.; SCHMITT, J.; AMORIM, L. Sustentabilidade na engenharia química. **Journal of Cleaner Production**, v. 146, p. 467-477, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.041>.

FARHANA, K.; ROHAIDA, S. Z. Conversão de glicerol em solketal: uma abordagem sustentável. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 14, n. 3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0097342>.

FERRO, G. A.; DE FREITAS, R. A economia circular e a química verde: impulsionadores da mudança na indústria. **Environmental Science and Policy**, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.08.001>.

GAO, T.; CHEN, H. Obtenha o ganho mútuo: modelo circular sustentável de geração-valor-tecnologia para a gestão de resíduos sólidos industriais. **Waste Management and Research**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242X231184446>.

GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P. A economia circular: um novo paradigma de sustentabilidade? **Journal of Cleaner Production**, v. 143, p. 757-768, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.

GOVIND, A.; KUMAR, V.; RAO, A. Estratégias de redução de custos na fabricação de produtos químicos. **Chemical Engineering Transactions**, v. 87, p. 211-216, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET2297036>.

HAN, X. *et al.* RT-DAP: a real-time data analytics platform for large-scale industrial process monitoring and control. In: **IEEE International Conference on Industrial Informatics**. Piscataway: IEEE, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICII.2018.00015>.

HATTORI, J. Inovação ambiental e harmonização de políticas em oligopólio internacional. **Environmental and Development Economics**, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1355770X1200040X>.

INT, J. Tendências emergentes em tecnologias de tratamento de águas residuais nas indústrias. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 11, p. 2003, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph16112003>.

JARVIS, L. Indicadores de sustentabilidade para a indústria química. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 7, n. 5, p. 6330-6340, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b02077>.

JELIAZKOVA, E. *et al.* Índice de circularidade no setor químico: uma abordagem metodológica. **Journal of Cleaner Production**, v. 364, p. 132578, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132578>.

JUHÁSZ, J. O papel das tecnologias digitais no monitoramento ambiental. **Environmental Management**, v. 64, n. 4, p. 659-668, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-023-01845-x>.

KASIRI, A.; MOVASSAGHI, S. Abraçando a sustentabilidade: uma pesquisa com pequenas e médias empresas dos EUA. **Journal of Applied Business and Economics**, v. 25, n. 2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.33423/jabe.v25i2.6097>.

KOENIG, M.; EBLINGER, T.; FAULMANN, C. Gêmeos digitais na fabricação de produtos químicos: oportunidades e desafios. **AIChE Journal**, v. 65, n. 12, e16713, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.16713>.

KORMISHKINA, E.; SHAMSUTDINOVA, I. Investimentos circulares como chave para resolver o dilema do crescimento. **Economic Annals-XXI**, v. 188, n. 3-4, p. 104-112, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21003/ea.v188-07>.

LAM, S.; HO, S.; MARDONES, J. Inteligência artificial em engenharia química: estado da arte e direções futuras. **AIChE Journal**, v. 65, n. 8, p. 2619-2637, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.16754>.

RIZOS, V.; BEHRENS, A. Implementação de modelos de negócios de economia circular por pequenas e médias empresas (PMEs): barreiras e facilitadores. **Sustainability**, v. 8, n. 11, p. 1212, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/su8111212>.

WU, M.; SU, Y. Avaliação do ciclo de vida de novas tecnologias verdes: uma revisão. **Environmental Science & Technology**, v. 53, n. 14, p. 8372-8382, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01903>.

ZIMMERMAN, B. H.; WINTER, K. Princípios da economia circular nas práticas industriais. **Journal of Cleaner Production**, v. 250, p. 119539, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119539>.