



03 a 05 de dezembro de 2025

As Engenharias na Transformação Digital das PMEs

Evolução e perspectivas da gestão da cadeia de suprimentos: sustentabilidade, inovação e desafios na indústria 4.0

Mario Vinicio Garcia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UEM

Danilo Hisano Barbosa

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UEM

Syntia Lemos Cotrim

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - UEM

Resumo: A gestão da cadeia de suprimentos (GCS) consolidou-se como uma das áreas mais estratégicas no cenário corporativo contemporâneo, evoluindo de uma função operacional voltada à redução de custos para um campo multidisciplinar que integra eficiência, inovação, sustentabilidade e digitalização. Essa transformação não foi linear, mas resultado de mudanças econômicas, sociais, tecnológicas e ambientais que exigiram das organizações maior adaptabilidade e visão sistêmica. Inicialmente centrada na eficiência logística e no controle de estoques, a GCS expandiu-se para além dos limites internos das empresas, estruturando-se como uma rede integrada de fornecedores, distribuidores e clientes, capaz de gerar valor por meio da cooperação entre os diferentes elos. Com a globalização e o avanço das tecnologias digitais, novos desafios emergiram, destacando a importância da resiliência, da transparência e da capacidade de resposta em tempo real diante de crises e instabilidades. Nesse contexto, a sustentabilidade tornou-se um eixo estratégico, dando origem ao conceito de Green Supply Chain Management, que integra práticas ambientais e sociais às decisões de gestão. Mais recentemente, a Indústria 4.0 vem remodelando a lógica das cadeias de suprimentos, introduzindo tecnologias como IoT, IA, blockchain e manufatura aditiva, que ampliam a rastreabilidade, a agilidade e a inteligência operacional. Assim, a GCS do século XXI assume um papel central na competitividade empresarial, exigindo a integração equilibrada entre desempenho econômico, inovação tecnológica e responsabilidade socioambiental.

Palavras-chave: Gestão da Cadeia de Suprimentos, Sustentabilidade, Indústria 4.0, Resiliência, Inovação Tecnológica.

Evolution and perspectives of supply chain management: sustainability, innovation, and challenges in industry 4.0

Abstract: Supply Chain Management (SCM) has consolidated itself as one of the most strategic areas in the contemporary corporate environment, evolving from an operational function focused on cost reduction to a multidisciplinary field that integrates efficiency, innovation, sustainability, and digitalization. This transformation was not linear but rather the result of economic, social, technological, and environmental changes that required organizations to become more adaptable and adopt a systemic perspective. Initially centered on logistics efficiency and inventory control, SCM expanded beyond the internal boundaries of companies, becoming an interconnected network of suppliers, distributors, and customers capable of generating value through cooperation among different links. With globalization and the advancement of digital technologies, new challenges emerged, highlighting the importance of resilience, transparency, and real-time responsiveness in

the face of crises and instabilities. In this context, sustainability has become a strategic axis, giving rise to the concept of Green Supply Chain Management, which integrates environmental and social practices into managerial decisions. More recently, Industry 4.0 has been reshaping the logic of supply chains, introducing technologies such as IoT, AI, blockchain, and additive manufacturing, which enhance traceability, agility, and operational intelligence. Thus, 21st-century SCM assumes a central role in business competitiveness, demanding a balanced integration between economic performance, technological innovation, and socio-environmental responsibility.

Keywords: Supply Chain Management, Sustainability, Industry 4.0, Resilience, Technological Innovation

1. Introdução

A gestão da cadeia de suprimentos consolidou-se como uma das áreas mais estratégicas no ambiente corporativo contemporâneo, desempenhando um papel essencial na integração de processos que vão desde a aquisição de matérias-primas até a entrega do produto ao consumidor. Essa evolução não ocorreu de forma linear, mas sim como resposta a mudanças econômicas, sociais, tecnológicas e ambientais que exigiram das organizações maior adaptabilidade e visão sistêmica (BALLOU, 2006; SIQUEIRA, 2024). Nesse sentido, compreender a trajetória histórica e as transformações conceituais da cadeia de suprimentos é fundamental para contextualizar sua relevância atual e os desafios emergentes associados à sustentabilidade e à digitalização (NEGRI *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022).

Nas primeiras décadas, a ênfase estava voltada predominantemente para a eficiência operacional, com foco em reduzir custos e otimizar recursos. Entretanto, à medida que os mercados se tornaram mais complexos e competitivos, a lógica da cadeia de suprimentos expandiu-se para além das fronteiras internas das empresas, incorporando fornecedores, distribuidores e clientes em uma rede interconectada (CORREIA *et al.*, 2017; COŞKUN; KUMRU; KAN, 2022). Essa perspectiva ampliada possibilitou não apenas ganhos de escala e agilidade, mas também a criação de valor por meio da cooperação entre os diferentes elos da cadeia, demonstrando que a gestão integrada poderia ser fonte de vantagem competitiva sustentável (SHARABATI, 2021; AFUM *et al.*, 2023).

Com o avanço da globalização e das tecnologias digitais, a gestão da cadeia de suprimentos passou a enfrentar novas demandas relacionadas à resiliência, transparência e capacidade de resposta em tempo real. Fatores externos, como crises financeiras, instabilidades geopolíticas e desastres naturais, expuseram a vulnerabilidade de cadeias frágeis, impulsionando as empresas a adotar soluções inovadoras e tecnologias emergentes (FATORACHIAN; KAZEMI, 2021; TAVANA *et al.*, 2022). Esse movimento deu origem a conceitos como cadeias de suprimentos ágeis, inteligentes e, mais recentemente, verdes, que incorporam a responsabilidade socioambiental como parte integrante da estratégia empresarial (ABED *et al.*, 2024; RAKIB, 2024; RAMAN *et al.*, 2023).

Dessa forma, a evolução do conceito de cadeia de suprimentos reflete um deslocamento de foco: do operacional para o estratégico, do econômico para o sustentável, do local para o global e do físico para o digital. O resultado é um campo de estudo e prática que exige cada vez mais integração entre eficiência, inovação, ética e responsabilidade ambiental. Nesse contexto, analisar a trajetória histórica, os princípios da gestão verde e os impactos da Indústria 4.0 torna-se essencial para compreender os rumos da cadeia de suprimentos no século XXI, em que competitividade e sustentabilidade se tornaram dimensões indissociáveis.

2. Metodologia

Este estudo foi desenvolvido a partir de uma revisão sistemática de literatura com abordagem narrativa, com o objetivo de identificar, analisar e discutir a evolução do conceito

de gestão da cadeia de suprimentos, bem como suas relações com a sustentabilidade e as tecnologias emergentes da Indústria 4.0. A adoção desse método justifica-se pela necessidade de reunir e sintetizar evidências teóricas e empíricas que permitam compreender a trajetória histórica do tema, seus marcos conceituais e as tendências futuras no campo da pesquisa e da prática organizacional.

A busca bibliográfica foi realizada em bases de ampla relevância científica, como Scopus, Web of Science, ScienceDirect e Emerald Insight, utilizando descritores em inglês, tais como “*supply chain management*”, “*green supply chain*”, “*sustainability*”, “*Industry 4.0*”, “*resilience*” e “*supply chain performance indicators*”. Foram incluídos artigos publicados entre 2000 e 2024, em periódicos revisados por pares ou livros acadêmicos relevantes, que abordassem a gestão da cadeia de suprimentos sob dimensões operacional, sustentável e tecnológica. Excluíram-se documentos não científicos, como relatórios corporativos e notícias, além de estudos sem aderência temática ao objeto investigado.

O processo de análise envolveu a triagem inicial de títulos e resumos, seguida da leitura integral das obras selecionadas, com extração de informações-chave sobre objetivos, metodologias, resultados e contribuições. Em seguida, os trabalhos foram organizados em eixos temáticos que estruturam esta revisão: evolução do conceito de cadeia de suprimentos, gestão verde, impacto da Indústria 4.0, indicadores de desempenho e desafios futuros. A integração entre a abordagem sistemática e a narrativa possibilitou contextualizar resultados e evidenciar a transição de uma perspectiva tradicional, centrada em eficiência e custos, para uma visão estratégica orientada à sustentabilidade, digitalização e criação de valor compartilhado. Reconhece-se, contudo, limitações relacionadas à seleção de bases, descritores e recorte temporal, mas entende-se que o conjunto analisado oferece um panorama consistente e representativo para discussões críticas e novas agendas de pesquisa.

3. Revisão Narrativa

3.1 Evolução do conceito de cadeias de suprimentos: da eficiência operacional à sustentabilidade

A gestão da cadeia de suprimentos (GCS) exerce papel central na organização moderna, integrando processos desde a aquisição de insumos até a entrega ao consumidor. Sua evolução, construída ao longo de décadas, reflete transformações econômicas, tecnológicas e sociais, passando de uma visão operacional focada na eficiência para um pilar estratégico baseado na sustentabilidade (SIQUEIRA, 2024; SANTOS *et al.*, 2024). Nas décadas de 1950 e 1960, a ênfase recaía sobre a eficiência física e redução de custos, com atuação restrita ao ambiente interno das empresas (BALLOU, 2006). Já nos anos 1970, a complexidade crescente dos mercados levou à integração de fluxos de materiais e informações, com foco em produção, estoques, transporte e distribuição (BALLOU, 2006; ABED *et al.*, 2024).

A década de 1980 marcou a consolidação do termo GCS, agora entendida como rede entre fornecedores, fabricantes, distribuidores e clientes. A globalização e a tecnologia da informação ampliaram sua abrangência, com sistemas como ERP garantindo visibilidade e eficiência em escala global (DURAN; SANTIAGO; FERREIRA, 2013). Inspirado pela lógica da “cadeia de valor” de Porter, o conceito passou a priorizar a cooperação entre os elos para criação de valor agregado (TAVANA *et al.*, 2022). Com a internet e as tecnologias digitais, surgiram maior conectividade, agilidade e flexibilidade (WANG *et al.*, 2022), além da necessidade de resiliência frente a crises, instabilidades e desastres (SIQUEIRA, 2024; WANG *et al.*, 2022).

A partir dos anos 2000, a sustentabilidade tornou-se elemento indispensável, com a consolidação da cadeia de suprimentos verdes e da agenda ESG, que abrange dimensões

ambientais, sociais e de governança (ABED *et al.*, 2024; BALLOU, 2006; SANTOS *et al.*, 2024). Práticas como auditorias socioambientais, certificações, economia circular e relatórios de sustentabilidade passaram a diferenciar empresas competitivas. A inovação tecnológica intensificou esse processo: blockchain garante rastreabilidade, enquanto IA e IoT otimizam operações e monitoram riscos. A pandemia de COVID-19 reforçou a importância de cadeias resilientes, digitais e sustentáveis (TAVANA *et al.*, 2022; WANG *et al.*, 2022). Assim, a GCS evoluiu de uma função operacional para uma atividade estratégica que integra eficiência, inovação, ética e responsabilidade socioambiental, tornando-se crucial para a competitividade e longevidade empresarial no século XXI (SIQUEIRA, 2024; TAVANA *et al.*, 2022).

3.2 Gestão da cadeia de suprimentos verde: princípios, estratégias e benefícios

O conceito de Green Supply Chain Management (GSCM) surgiu diante da crescente conscientização sobre os impactos ambientais das atividades industriais e comerciais, propondo a integração de preocupações ambientais às práticas tradicionais da cadeia de suprimentos (RAMAN *et al.*, 2023). O GSCM é entendido como a gestão sistemática das atividades desde o desenvolvimento de produtos até o descarte, buscando equilibrar desempenho econômico, responsabilidade social e proteção ambiental (SHARABATI, 2021). Seus princípios centrais envolvem prevenção da poluição, uso eficiente de recursos e visão de ciclo de vida do produto (SPREAFICO, 2022).

Para efetivar o GSCM, diversas estratégias são adotadas: ecodesign, que promove produtos sustentáveis e recicláveis (MOAZZEM *et al.*, 2022); seleção criteriosa de fornecedores com certificações ambientais e auditorias regulares (PUŠKA; STOJANOVIĆ, 2022); otimização de processos logísticos, com transporte eficiente, embalagens sustentáveis e uso de tecnologias de roteirização inteligente (AROONSRIMORAKOT; LAIPHRAKPAM; MUNGKUN, 2022); além da economia circular, com logística reversa e reaproveitamento de insumos (ZAHARAN, 2024).

Os benefícios do GSCM abrangem dimensões econômicas, ambientais e sociais: redução de custos e maior competitividade (RAKIB, 2024); diminuição de emissões e preservação de recursos naturais (WANG; FENG, 2023); fortalecimento da reputação corporativa, melhores relações com stakeholders e valorização por investidores e colaboradores (YU; XU; YUAN, 2024). Mais que obrigação ética ou legal, trata-se de uma estratégia de geração de valor e resiliência de longo prazo (RAMAN *et al.*, 2023; SHARABATI, 2021). Nesse sentido, a incorporação de práticas verdes representa um avanço decisivo rumo a cadeias de suprimentos sustentáveis, especialmente quando associadas às tecnologias emergentes como blockchain, IoT e IA (SUN *et al.*, 2024).

3.3 Indústria 4.0 e a transformação das cadeias de suprimentos

A Indústria 4.0, marcada pela convergência de tecnologias digitais, físicas e biológicas, como IoT, IA, Big Data, Blockchain, computação em nuvem e manufatura aditiva, está promovendo mudanças profundas na gestão das cadeias de suprimentos, criando sistemas conectados, inteligentes e adaptativos (KANNAN *et al.*, 2022; BIRKEL; MÜLLER, 2021). Essas chamadas cadeias de suprimentos 4.0 oferecem visibilidade e transparência sem precedentes, permitindo decisões rápidas e estratégicas, essenciais para a eficiência e a sustentabilidade (MOSHOOO *et al.*, 2021; CHARLES; EMROUZNEJAD; GHERMAN, 2023).

Tecnologias como IoT viabilizam monitoramento contínuo e rastreabilidade (KANNAN *et al.*, 2022), enquanto a IA potencializa previsões de demanda, otimização logística e automação de processos (KANNAN *et al.*, 2022). O Blockchain amplia a segurança e a confiabilidade das transações (HELLANI *et al.*, 2021; MOSHOOD *et al.*, 2021), a

manufatura aditiva reduz estoques e desperdícios (MAISANO *et al.*, 2022) e os gêmeos digitais permitem simulações e análises em tempo real (MOSHOD *et al.*, 2021).

Novos modelos de gestão também emergem, como o Supply Chain-as-a-Service (SCaaS), oferecem flexibilidade e acesso a tecnologias de ponta sem grandes investimentos (KANNAN *et al.*, 2022). Entretanto, a transformação enfrenta desafios relacionados à segurança cibernética, privacidade de dados, integração de sistemas legados, capacitação profissional e resistência cultural (KANNAN *et al.*, 2022; CHARLES; EMROUZNEJAD; GHERMAN, 2023). Além disso, exige uma mudança de paradigma em direção à sustentabilidade, já que o uso das tecnologias inteligentes deve priorizar também a responsabilidade socioambiental (MAISANO *et al.*, 2022).

Assim, a Indústria 4.0 redefine a gestão da cadeia de suprimentos ao integrar inovação digital, eficiência operacional e responsabilidade socioambiental. Empresas que conseguirem incorporar com sucesso essas tecnologias estarão mais preparadas para enfrentar um ambiente global dinâmico e competitivo, transformando a digitalização em um imperativo estratégico para crescimento e sobrevivência (BIRKEL; MÜLLER, 2021; CHARLES; EMROUZNEJAD; GHERMAN, 2023).

3.4 Indicadores de desempenho para avaliação de cadeias de suprimentos verdes

A adoção de práticas sustentáveis nas cadeias de suprimentos exige não apenas novas estratégias e tecnologias, mas também indicadores de desempenho específicos para avaliar e monitorar resultados ambientais, sociais e econômicos (SHARMA; CHANDNA; BHARDWAJ, 2017; NEGRI *et al.*, 2021). Esses KPIs alinham-se ao modelo dos três pilares da sustentabilidade (KHOKHAR *et al.*, 2022): ambientais, como emissões de GEE, pegada de carbono, pegada hídrica e conformidade de fornecedores com ISO 14001 (WALKER *et al.*, 2021; YU *et al.*, 2024); sociais, como respeito às normas trabalhistas, combate ao trabalho infantil, diversidade, auditorias sociais, capacitação ESG e satisfação das comunidades (AFSHARI *et al.*, 2022; AFUM *et al.*, 2023; CORREIA *et al.*, 2017); e econômicos, como redução de custos, eficiência energética, eco inovação, ROI, EVA de iniciativas verdes, receita com produtos sustentáveis e risco financeiro ambiental (SILVA; SANTOS; ALCOFORADO, 2021; GUPTA; KUMAR, 2023).

A escolha dos indicadores deve considerar setor, maturidade em sustentabilidade, exigências regulatórias e expectativas dos consumidores, sendo necessários KPIs mensuráveis, relevantes e alinhados à estratégia (COŞKUN; KUMRU; KAN, 2022). Modelos como o SSCMM orientam essa evolução (CORREIA *et al.*, 2017). Ferramentas internacionais, como GRI, ISO 14001 e Pacto Global da ONU, fornecem diretrizes, enquanto sistemas digitais facilitam a coleta e análise (YENUGULA; SAHOO; GOSWAMI, 2023; VITOLLA *et al.*, 2023). Tecnologias da Indústria 4.0 ampliam esse monitoramento: IoT, Big Data, blockchain, IA e machine learning permitem indicadores em tempo real, rastreáveis e preditivos (FRANCO *et al.*, 2022; RIGÓ *et al.*, 2024; SIAGIAN *et al.*, 2024).

No entanto, medir não basta: é preciso integrar os resultados a processos de gestão de desempenho, corrigindo desvios e estimulando melhoria contínua (GUPTA *et al.*, 2021). A divulgação transparente dos indicadores fortalece a reputação e a confiança entre stakeholders (ALMAQTARI *et al.*, 2024). Assim, os KPIs em cadeias verdes tornam-se ferramentas indispensáveis para transformar princípios éticos em práticas concretas, promovendo inovação, competitividade e desenvolvimento sustentável (ROSYDAH *et al.*, 2022).

3.5 Desafios e tendências futuras na cadeia de suprimentos verdes sob a ótica da indústria 4.0

À medida que as cadeias de suprimentos incorporam práticas sustentáveis e tecnologias da Indústria 4.0, surgem desafios complexos e, simultaneamente, tendências promissoras

(SHARMA *et al.*, 2023). Entre os principais obstáculos estão a dificuldade de integrar soluções digitais com práticas ambientais, devido a altos investimentos, adaptação de sistemas legados e carência de competências organizacionais, sobretudo em pequenas e médias empresas (FATORACHIAN; KAZEMI, 2021).

Soma-se a isso a resistência cultural à inovação, que limita a efetividade do GSCM (AFUM *et al.*, 2023), e os dilemas éticos da governança digital, relacionados à privacidade e segurança da informação (ALMAQTARI *et al.*, 2024). Outro ponto crítico é a desigualdade tecnológica: enquanto países desenvolvidos avançam rapidamente, muitos mercados emergentes ainda enfrentam barreiras de infraestrutura e acesso, ampliando disparidades socioeconômicas (AROONSRIMORAKOT; LAIPHRAKPAM; MUNGKUN, 2022; FRANCO *et al.*, 2022).

Apesar dessas barreiras, as tendências indicam avanços significativos rumo a cadeias de suprimentos verdes mais inteligentes. Destaca-se a consolidação da economia circular, potencializada pelo uso de IoT e blockchain para rastrear o ciclo de vida dos produtos e fomentar práticas de reutilização e reciclagem (GARCÍA-MUIÑA *et al.*, 2021). A hiperconectividade, impulsionada por 5G e computação em nuvem, permitirá coordenação em tempo real, otimizando processos e reduzindo impactos ambientais (GARRIDO-HIDALGO *et al.*, 2018; GHOLAMI *et al.*, 2022).

Outras tendências incluem a automação inteligente e a robótica verde, com veículos autônomos movidos a energia renovável, análise preditiva e IA para gestão proativa de riscos socioambientais (GHADGE *et al.*, 2022); a customização em massa sustentável via impressão 3D e manufatura aditiva, viabilizando cadeias mais locais e circulares (GHOLAMI *et al.*, 2022); e o crescimento da pressão regulatória e social por transparência, responsabilidade e inovação sustentável (ABED *et al.*, 2024). Nesse contexto, o futuro do Green Supply Chain Management dependerá da superação de obstáculos técnicos, culturais e éticos, mas também abrirá espaço para inovação, competitividade e valor sustentável. Empresas que anteciparem tendências, investirem em capacidades digitais e cultivarem uma cultura de responsabilidade socioambiental estarão mais bem posicionadas para liderar essa nova era de sustentabilidade inteligente (BELTRAMI *et al.*, 2021; BIRKEL; MÜLLER, 2021; AGARWAL; OJHA, 2024).

4. Resultados e discussões

Os resultados da revisão sistemática e narrativa evidenciam que a gestão da cadeia de suprimentos (GCS) passou por uma evolução profunda, tanto no âmbito conceitual quanto prático. Essa trajetória pode ser dividida em quatro grandes fases interdependentes: eficiência operacional, integração estratégica, sustentabilidade e digitalização inteligente. Cada fase não substituiu a anterior, mas ampliou o escopo da gestão, consolidando a GCS como um campo dinâmico e multidisciplinar.

4.1 Resultados

- **Evolução conceitual:** A GCS transitou de um enfoque limitado à logística e à redução de custos para uma abordagem sistêmica, global e estratégica. O fortalecimento da cooperação entre fornecedores, distribuidores e clientes, aliado ao uso de tecnologias digitais, foi identificado como um dos marcos centrais dessa transformação.
- **Gestão verde da cadeia de suprimentos:** A literatura mostra que o Green Supply Chain Management (GSCM) deixou de ser uma prática periférica para se tornar um elemento estruturante da estratégia empresarial. As organizações que implementam práticas verdes reportam benefícios não apenas ambientais, mas também econômicos (redução de custos, novos mercados) e sociais (reputação, conformidade, engajamento de stakeholders).

- **Indústria 4.0 e digitalização:** Tecnologias como IoT, IA, blockchain e manufatura aditiva estão remodelando a lógica das cadeias de suprimentos. Elas permitem maior rastreabilidade, tomada de decisão em tempo real e cadeias mais resilientes. Entretanto, o acesso desigual a essas tecnologias e os riscos de segurança digital ainda representam barreiras importantes.
- **Indicadores de desempenho:** A literatura aponta para a necessidade de KPIs robustos e alinhados às dimensões ESG. Observa-se um avanço significativo na definição de métricas ambientais e econômicas, mas indicadores sociais ainda carecem de padronização e aplicação mais consistente.
- **Desafios e tendências futuras:** A integração entre sustentabilidade e Indústria 4.0 surge como uma tendência irreversível, porém desafiadora. Custos elevados, resistência cultural, lacunas de infraestrutura tecnológica e questões éticas relacionadas à governança digital foram identificadas como pontos críticos a serem enfrentados.

4.2 Discussão

Os resultados indicam que a GCS deve ser compreendida hoje como um sistema adaptativo complexo, no qual eficiência, inovação e responsabilidade socioambiental são dimensões inseparáveis. A análise confirma que organizações que não incorporam práticas sustentáveis e digitais correm risco de perder competitividade e legitimidade perante consumidores, investidores e órgãos reguladores.

Um aspecto recorrente identificado é que a sustentabilidade não é apenas uma exigência ética ou legal, mas um fator de vantagem competitiva. Empresas que implementam práticas verdes e transparentes conseguem fortalecer sua reputação e atrair investidores que seguem critérios ESG. Contudo, a revisão também revela um descompasso entre grandes corporações e pequenas e médias empresas (PMEs), estas últimas enfrentando barreiras significativas de acesso a tecnologias e certificações ambientais.

A digitalização, por sua vez, apresenta uma ambivalência: ao mesmo tempo em que potencializa eficiência e resiliência, ela introduz novos riscos associados à cibersegurança, à dependência tecnológica e ao uso ético dos dados. Portanto, a transformação digital da cadeia de suprimentos deve estar acompanhada de políticas robustas de governança digital e capacitação de profissionais.

Outro ponto de destaque é o papel da economia circular e dos modelos colaborativos. A literatura sugere que cadeias de suprimentos do futuro tenderão a ser mais locais, circulares e conectadas, reduzindo impactos ambientais e aumentando a flexibilidade operacional. Esse movimento, potencializado pela Indústria 4.0, tende a transformar radicalmente a lógica linear de “extrair-produzir-descartar”. Por fim, os resultados apontam que a construção de indicadores confiáveis e transparentes é fundamental para monitorar o desempenho sustentável e dar credibilidade às práticas adotadas. A padronização internacional, impulsionada por frameworks como GRI e ISO 14001, contribui para a comparabilidade e accountability das empresas.

5. Conclusões

A evolução da gestão da cadeia de suprimentos demonstra um deslocamento significativo de uma função meramente operacional para um campo estratégico que integra eficiência, inovação, sustentabilidade e digitalização. Os resultados da revisão evidenciam que práticas verdes e tecnologias emergentes da Indústria 4.0 não apenas reforçam a competitividade empresarial, mas também ampliam a responsabilidade socioambiental das organizações, consolidando a GCS como elemento central para enfrentar os desafios globais do século XXI. Nesse contexto, as empresas que souberem alinhar seus processos

à lógica da economia circular, à resiliência e à governança digital estarão mais preparadas para garantir legitimidade, vantagem competitiva e longevidade.

Para pesquisas futuras, destaca-se a necessidade de estudos empíricos que avaliem de forma quantitativa os impactos da digitalização sobre a sustentabilidade nas cadeias de suprimentos, especialmente em pequenas e médias empresas. Além disso, a exploração de novos indicadores de desempenho social, a análise da viabilidade econômica de cadeias circulares em diferentes setores e a investigação sobre segurança e ética no uso de dados logísticos digitais constituem campos promissores. Trabalhos que articulem a convergência entre GSCM, Indústria 4.0 e políticas públicas também se mostram relevantes, uma vez que poderão oferecer subsídios para modelos de governança global capazes de promover cadeias de suprimentos mais justas, transparentes e sustentáveis.

Referências

ABED, Rasha; HACHICHA, Wafa; MZID, Imed; AFFI, Zouhour. Developing green supply chain management in the industry: environmental concerns. **Procedia Environmental Science, Engineering and Management**, v. 11, n. 2, p. 243–248, 2024. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.procedia-esem.eu/pdf/issues/2024/no2/24_Abed_24.pdf. Acesso em: 3 maio 2025.

AFUM, Ebenezer; SUN, Zhaohui; AGYABENG-MENSAH, Yaw; BAAH, Courage. Lean production systems, social sustainability performance and green competitiveness: The mediating roles of green technology adoption and green product innovation. **Journal of Engineering, Design and Technology**, v. 21, n. 1, p. 206–227, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1108/JEDT-02-2021-0099>.

AFSHARI, Hamid; AGNIHOTRI, Saurabh; SEARCY, Cory; JABER, Mohamad Y. Social sustainability indicators: A comprehensive review with application in the energy sector. **Sustainable Production and Consumption**, v. 31, p. 263–286, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.02.018>.

AGARWAL, Ankit; OJHA, Rakesh. Prioritizing implications of Industry-4.0 on the sustainable development goals: A perspective from the analytic hierarchy process in manufacturing operations. **Journal of Cleaner Production**, v. 444, 141189, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141189>.

ALMAQTARI, Faozi A.; ELSHEIKH, Tamer; HUSSAINEY, Khaled; AL-BUKHRANI, Mohammed A. Country-level governance and sustainable development goals: implications for firms' sustainability performance. **Studies in Economics and Finance**, v. 41, n. 3, p. 684–723, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/SEF-05-2023-0272>.

AROONSRIMORAKOT, Sayam; LAIPHRAKPAM, Meena; MUNGKUN, Suthep. Green logistics (GL) for environmental sustainability: a review in search of strategies for Thailand's GL management. **ABAC Journal**, v. 42, n. 2, p. 293–319, 2022. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/361788296>. Acesso em: 03 jul. 2025

BALLOU, Ronald H. A evolução e o futuro da logística e do gerenciamento da cadeia de suprimentos. **Produção**, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 375–386, set./dez. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-65132006000300002>.

BELTRAMI, Marco; ORZES, Guido; SARKIS, Joseph; SARTOR, Marco. Industry 4.0 and sustainability: Towards conceptualization and theory. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, 127733, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127733>.

BIRKEL, Hendrik; MÜLLER, Julian M. Potentials of industry 4.0 for supply chain management within the triple bottom line of sustainability: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 289, p. 125612, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125612>.

CHARLES, Vincent; EMROUZNEJAD, Ali; GHERMAN, Tatiana. A critical analysis of the integration of blockchain and artificial intelligence for supply chain. **Annals of Operations Research**, v. 327, n. 1, p. 7-47, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05169-w>.

CORREIA, Elisabete; CARVALHO, Helena; AZEVEDO, Susana G.; GOVINDAN, Kannan. Maturity models in supply chain sustainability: a systematic literature review. **Sustainability**, Basel, v. 9, n. 1, p. 64, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9010064>.

COŞKUN, Serdar Semih; KUMRU, Mesut; KAN, Natali Maya. An integrated framework for sustainable supplier development through supplier evaluation based on sustainability indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 335, p. 130287, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130287>.

DURAN, Márcio Fernandes; SANTIAGO, Sandra Valéria; FERREIRA, Ana Augusta. Aplicação de sistemas ERP na gestão da cadeia de suprimentos: estudo de caso. **Revista Organização Sistêmica**, v. 3, n. 2, p. 34–45, 2013. Disponível em: <https://www.revistasuninter.com/revistaorganizacao sistemica/index.php/organizacaoSistmica/article/view/346/177>. Acesso em: 2 maio 2025.

FATORACHIAN, Hamed; KAZEMI, Hamid. Impact of Industry 4.0 on supply chain performance. **Production Planning & Control**, v. 32, n. 1, p. 63–81, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1712487>.

FRANCO, Jacqueline de Almeida Barbosa; DOMINGUES, Ana Mariele; AFRICANO, Nelson de Almeida; DEUS, Rafael Mattos; BATTISTELLE, Rosane Aparecida Gomes. Sustainability in the civil construction sector supported by industry 4.0 technologies: Challenges and opportunities. **Infrastructures**, v. 7, n. 3, p. 43, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures7030043>.

GHADGE, Abhijeet; MOGALE, Deepak G.; BOURLAKIS, Michael; MAIYAR, Laxman M.; MORADLOU, Hamid. Link between Industry 4.0 and green supply chain management: Evidence from the automotive industry. **Computers & Industrial Engineering**, v. 169, 108303, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108303>.

GARCÍA-MUIÑA, Fernando E.; GONZÁLEZ-SÁNCHEZ, Roberto; FERRARI, Anna M.; SETTEMBRE-BLUNDO, Daniela. Industry 4.0-based dynamic Social Organizational Life Cycle Assessment to target the social circular economy in manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 327, 129439, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129439>.

GARRIDO-HIDALGO, Carmen; RAMOS, Carlos; FERNÁNDEZ-CABALLERO, Antonio; SECO, Francisco; CARRIÓN, Pablo; CASTILLO, Juan Carlos. IoT Heterogeneous Mesh Network Deployment for Human-in-the-Loop Challenges Towards a Social and

Sustainable Industry 4.0. **IEEE Access**, v. 6, p. 28417–28430, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2836677>.

GHOLAMI, Hossein; HASHEMI, Amin; LEE, Jonathan K. Y.; ABDUL-NOUR, Georges; SALAMEH, Antoine A. Scrutinizing state-of-the-art I4.0 technologies toward sustainable products development under fuzzy environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 377, 134327, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134327>.

GUPTA, Vinay; SHARMA, Madhu; PACHAURI, Rupendra Kumar; BABU, K. N. Dinesh. A low-cost real-time IoT enabled data acquisition system for monitoring of PV system. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 43, n. 20, p. 2529–2543, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1844351>.

HELLANI, Houssein; SLIMAN, Layth; SAMHAT, Abed Ellatif; EXPOSITO, Ernesto. On blockchain integration with supply chain: overview on data transparency. **Logistics**, v. 5, n. 3, p. 46, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/logistics5030046>.

KANNAN, Govindan; KANNAN, Devika; JØRGENSEN, Thomas Ballegård; STRAARUP, Tim. Supply Chain 4.0 performance measurement: a systematic literature review, framework development, and empirical evidence. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 164, p. 102725, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102725>.

KHOKHAR, Maryam; ZIA, Sayma; ISLAM, Tahir; SHARMA, Anshuman; IQBAL, Wasim; IRSHAD, Muhammad. Going green supply chain management during COVID-19, assessing the best supplier selection criteria: a triple bottom line (TBL) approach. **Problemy Ekorozwoju**, v. 17, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.35784/pe.2022.1.04>.

MAISANO, Domenico A.; VERNA, Elisa; MINETOLA, Paolo; LUNETTO, Vincenzo; CATALANO, Angioletta R.; PRIARONE, Paolo C. A structured comparison of decentralized additive manufacturing centers based on quality and sustainability. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 121, n. 1, p. 993–1014, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09288-9>.

MOAZZEM, Shadia; CROSSIN, Enda; DAVER, Fugen; WANG, Lijing. Environmental impact of apparel supply chain and textile products. **Environmental Development and Sustainability**, v. 24, p. 9757–9775, ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01873-4>.

MOSHOOD, Taofeeq D.; NAWANIR, Gusman; SOROOSHIAN, Shahryar; OKFALISA, Okfalisa. Digital twins driven supply chain visibility within logistics: a new paradigm for future logistics. **Applied System Innovation**, v. 4, n. 2, p. 29, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi4020029>.

NEGRI, Marta; CAGNO, Enrico; COLICCHIA, Claudia; SARKIS, Joseph. Integrating sustainability and resilience in the supply chain: A systematic literature review and a research agenda. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 7, p. 2858–2886, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.2776>.

PUSKA, Adis; STOJANOVIC, Ilija. Fuzzy multi-criteria analyses on green supplier selection in an agri-food company. **Journal of Intelligent Management Decision**, v. 1, n. 1, p. 2–16, 2022. DOI: <https://doi.org/10.56578/jimd010102>.

RAMAN, Raghu; SREENIVASAN, Aswathy; MA, Suresh; PATWARDHAN, Anand; NEDUNGADI, Prema. Green supply chain management research trends and linkages to UN Sustainable Development Goals. **Sustainability**, v. 15, n. 22, p. 15848, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152215848>.

RAKIB, Abdullah Al. Strategies for green supply chain management: a comprehensive review for environmental sustainability. **Journal of Optimization and Supply Chain Management**, v. 1, n. 1, p. 40–49, 2024. DOI: <https://doi.org/10.22034/iss.2024.2479>.

RIGÓ, Ladislav; FABIANOVÁ, Jana; LOKŠÍK, Milan; MIKUŠOVÁ, Nikoleta. Utilising digital twins to bolster the sustainability of logistics processes in Industry 4.0. **Sustainability**, v. 16, n. 6, p. 2575, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16062575>.

ROSYIDAH, Masayu; KHOIRUNNISA, Ninin; ROFIATIN, Umi; ASNAH, Asnah; ANDIYAN, Andiyan; SARI, Dyana. Measurement of key performance indicator Green Supply Chain Management (GSCM) in palm industry with green SCOR model. **Materials Today: Proceedings**, v. 63, p. S326–S332, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.158>.

SANTOS, Paulo Henrique dos; FERREIRA, Carlos Henrique da Silva; COELHO, Isabela Almeida. Blockchain aplicada à sustentabilidade em cadeia de suprimentos: proposição de agendas de pesquisa. **RISUS – Journal on Innovation and Sustainability**, São Paulo, v. 15, n. 1, p. 91–106, fev./mar. 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.23925/2179-3565.2023v15i1p91-106>.

SHARABATI, Abdel-Aziz Ahmad. Green supply chain management and competitive advantage of Jordanian pharmaceutical industry. **Sustainability**, v. 13, n. 23, p. 13315, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132313315>.

SHARMA, Mohit; LUTHRA, Sunil; JOSHI, Satish; KUMAR, Amit; JAIN, Ankur. Green logistics driven circular practices adoption in Industry 4.0 Era: A moderating effect of institution pressure and supply chain flexibility. **Journal of Cleaner Production**, v. 383, p. 135284, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135284>.

SHARMA, Vijay Kumar; CHANDNA, Pankaj; BHARDWAJ, Arvind. Green supply chain management related performance indicators in agro industry: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 1194–1208, 2017. ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.103>.

SIAGIAN, Ulysses Wendi Rumapea; WENTEN, I Gede; KHOIRUDDIN, Khoiruddin. Circular economy approaches in the palm oil industry: Enhancing profitability through waste reduction and product diversification. **Journal of Engineering and Technological Sciences**, v. 56, n. 1, p. 25–49, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2023.56.1.3>.

SILVA, Andressa Cristine Ferreira da; SANTOS, Geovane Camilo; ALCOFORADO, Eduardo Alvim Guedes. Análise comparativa dos resultados dos indicadores econômico-financeiros das empresas do setor bancário participantes e não participantes do Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE). **Revista de Contabilidade do Mestrado em Ciências Contábeis da UERJ**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 98–120, 2021. DOI: <https://doi.org/10.12979/rcmccuerj.v25i2.59532>

SIQUEIRA, Rayanna da Silva. Gestão da cadeia de suprimentos: desafios e benefícios. **Revista Tópicos**, 18 fev. 2024. DOI: <https://10.5281/zenodo.10676581>.

SPREAFICO, Christian. An analysis of design strategies for circular economy through life cycle assessment. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 3, p. 180, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09803-1>.

SUN, Xuting; KUO, Yong-Hong; XUE, Weili; LI, Yanzhi. Technology-driven logistics and supply chain management for societal impacts. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 185, p. 103523, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103523>. Acesso em: 3 maio 2025.

TAVANA, Madjid; REZAEI, Somayeh; ZAREI, Mojtaba; SANTOS-ARTURO, Arnaldo; PETRINI, Marcelo. Digital supply chain transformation: A decision framework for data-driven supply chain collaboration. **Computers & Industrial Engineering**, v. 172, 108569, 2022. DOI: <https://10.1016/j.cie.2022.108569>.

VITOLLA, Filippo; L'ABATE, Vitiana; PETRUZZELLA, Felice; RAIMO, Nicola; SALVI, Antonio. Circular economy disclosure in sustainability reporting: The effect of firm characteristics. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 2200, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15032200>.

WALKER, Anna M.; VERMEULEN, Walter J. V.; SIMBOLI, Alberto; RAGGI, Andrea. Sustainability assessment in circular inter-firm networks: An integrated framework of industrial ecology and circular supply chain management approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 125457, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125457>.

WANG, Yimin; ZHAO, Ziqiang; CHEN, Lixuan; LI, Yichen; YANG, Lin. Digital transformation in supply chain management: A review and bibliometric analysis. **Journal of Business Research**, v. 145, p. 55–67, 2022. DOI: <https://10.1016/j.jbusres.2022.02.010>.

WANG, Jieyu; FENG, Taiwen. Supply chain ethical leadership and green supply chain integration: a moderated mediation analysis. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 26, n. 9, p. 1145–1171, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/13675567.2021.2022640>.

YENUGULA, Manideep; SAHOO, S.; GOSWAMI, S. Cloud computing in supply chain management: Exploring the relationship. **Management Science Letters**, v. 13, n. 3, p. 193–210, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5267/j.msl.2023.4.003>.

YU, Linxuan; XU, Jing; YUAN, Xiang. Sustainable digital shifts in Chinese transport and logistics: exploring green innovations and their ESG implications. **Sustainability**, v. 16, n. 5, p. 1877, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16051877>.

ZAHRAN, Siraj. Investigating the nexus between green supply chain practices and sustainable waste management in advancing circular economy. **Sustainability**, v. 16, n. 9, p. 3566, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16093566>.