



03 a 05 de dezembro de 2025

As Engenharias na Transformação Digital das PMEs

TRANSFORMAÇÃO DIGITAL E ESG: REVISÃO CONCEITUAL E FRAMEWORK PARA VANTAGEM COMPETITIVA SUSTENTÁVEL NA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Priscilla Maria De Luca Zaupa Costa

PPGEP-UTFPR (Ponta Grossa)

Giane Gonçalves Lenzi

PPGEP-UTFPR (Ponta Grossa)

Franciele Aparecida Cecato

PPGEP-UTFPR (Ponta Grossa)

Resumo: A transformação digital consolidou-se como requisito estratégico para a competitividade empresarial. Em paralelo, os princípios ESG (Environmental, Social and Governance) se firmaram como referência de legitimidade e responsabilidade corporativa. Apesar do crescente destaque de ambos os temas, ainda são escassos os modelos conceituais que os integrem de forma sistemática. Para preencher essa lacuna, este artigo propõe o conceito de ESG Digital, explorado em detalhe na seção 4, como a aplicação sinérgica de tecnologias digitais para amplificar resultados ambientais, sociais e de governança. A partir de uma revisão conceitual e análise de literatura recente, desenvolve-se um framework de cinco dimensões: Monitoramento em Tempo Real, Otimização Preditiva, Transparência Automatizada, Engajamento Digital e Governança Inteligente. O artigo também discute a aplicabilidade do framework em empresas de diferentes portes, com foco especial no papel estratégico da Engenharia de Produção na operacionalização dessa convergência.

Palavras-chave: Digital ESG, Digital Transformation, Competitive Advantage, Production Engineering, Sustainability.

DIGITAL TRANSFORMATION AND ESG: CONCEPTUAL REVIEW AND FRAMEWORK FOR SUSTAINABLE COMPETITIVE ADVANTAGE IN PRODUCTION ENGINEERING

Abstract: Digital transformation has established itself as a strategic requirement for corporate competitiveness. At the same time, ESG (Environmental, Social, and Governance) principles have established themselves as a benchmark for corporate legitimacy and responsibility. Despite the growing prominence of both themes, conceptual models that systematically integrate them are still scarce. To fill this gap, this article proposes the concept of Digital ESG, explored in detail in section 4, as the synergistic application of digital technologies to amplify environmental, social, and governance outcomes. Based on a conceptual review and analysis of recent literature, a five-dimensional framework is developed: Real-Time Monitoring, Predictive Optimization, Automated Transparency, Digital Engagement, and Smart Governance. The article also discusses the framework's applicability to companies of different sizes, with a special focus on the strategic role of Production Engineering in operationalizing this convergence.

Keywords: Article, CONBREPRO, CIGELUBRA.

1. Introdução

A transformação digital é um dos principais motores de mudança no ambiente produtivo contemporâneo. Ela abrange desde inteligência artificial e internet das coisas (IoT) até blockchain e computação em nuvem (Schwab, 2016; Kagermann et al., 2013). Em paralelo, o conceito de ESG consolidou-se como métrica de legitimidade e responsabilidade socioambiental nas organizações (Friede et al., 2015; Eccles & Klimenko, 2019).

Entretanto, apesar do reconhecimento individual de ambos os temas como drivers de competitividade, a literatura ainda carece de um modelo que os integre de forma sistêmica para criar vantagem competitiva sustentável. Enquanto estudos de Indústria 4.0 destacam ganhos de eficiência e inovação, e análises de ESG enfatizam impacto socioambiental e governança corporativa, raramente se explora como tecnologias digitais podem potencializar indicadores ESG de forma sistemática (George et al., 2021).

Nesse contexto, a Engenharia de Produção possui posição privilegiada para liderar essa convergência. Como área responsável por planejar, projetar e gerenciar processos produtivos, ela oferece ferramentas e métodos únicos que permitem integrar objetivos de sustentabilidade digitalmente amplificados aos processos organizacionais. A transformação ocorre quando práticas ESG se convertem em sistemas produtivos inteligentes que geram vantagem competitiva diferenciada.

Diante desse cenário, este trabalho busca responder à seguinte pergunta de pesquisa: Como a transformação digital pode ser sistematicamente integrada às práticas ESG para gerar vantagem competitiva sustentável na Engenharia de Produção? Para abordar esta questão, o estudo propõe um framework conceitual que será detalhado na seção 4. O modelo estabelece conexões sistemáticas entre transformação digital, práticas ESG e vantagem competitiva sustentável.

A relevância dessa abordagem integrativa é reforçada pelo contexto atual de riscos globais. Como destaca o World Economic Forum (2023), os desafios contemporâneos incluem mudanças climáticas, crises geopolíticas e transformações tecnológicas aceleradas. Estes fenômenos exigem abordagens integradas e inovadoras, tornando estratégias como o ESG Digital essenciais para mitigar impactos sistêmicos e criar valor sustentável.

2. Metodologia

Este estudo adota uma abordagem teórico-conceitual, estruturada em duas etapas principais: revisão narrativa não sistemática da literatura e desenvolvimento de um framework integrativo para a convergência entre transformação digital, práticas ESG e vantagem competitiva sustentável.

A revisão narrativa privilegiou publicações entre 2010 e 2024 em periódicos de alto impacto (Qualis A1/A2, JCR) e relatórios técnicos de organizações internacionais reconhecidas (e.g., World Economic Forum, McKinsey). A seleção priorizou estudos que abordassem a intersecção entre transformação digital, ESG e vantagem competitiva, considerando tanto contribuições teóricas quanto evidências empíricas relevantes.

O objetivo central desta etapa foi identificar conceitos-chave, lacunas teóricas e oportunidades de convergência que embasam a formulação do framework ESG Digital.

Com base na literatura revisada, o estudo integrou contribuições de autores clássicos --- como Barney (1991) e Porter (1985) --- e de trabalhos recentes sobre digitalização e sustentabilidade (e.g., George et al., 2021; Wang et al., 2023). Esse processo permitiu estruturar um framework composto por cinco dimensões operacionais e indicadores-chave

de desempenho (KPIs), visando oferecer uma abordagem sistemática para a integração ESG Digital.

Este artigo possui caráter teórico-conceitual, com foco na proposição do framework. A validação empírica das dimensões propostas, por meio de estudos de caso e análises quantitativas em contextos organizacionais reais, constitui etapa subsequente da agenda de pesquisa, conforme detalhado na Seção 8.2.

3. Fundamentação teórica

A fundamentação teórica está organizada em três eixos principais que sustentam a proposta de ESG Digital: (i) Transformação Digital e Vantagem Competitiva; (ii) ESG como Driver de Competitividade Sustentável; e (iii) Lacunas de Integração entre ESG e Transformação Digital.

3.1 Transformação Digital e Vantagem Competitiva

A transformação digital extrapola a mera adoção de tecnologias. Ela representa uma mudança estrutural e cultural nas organizações que redefine fundamentalmente como criamos valor econômico e social (Brynjolfsson & McAfee, 2014). Tecnologias como Inteligência Artificial, Big Data, Internet das Coisas (IoT), automação avançada e blockchain redefinem processos e modelos de negócio. Elas criam novas fontes de valor competitivo (Kane et al., 2019; Schwab, 2016).

Carvalho et al. (2021) destacam que a formação do constructo de transformação digital ainda enfrenta desafios conceituais significativos. Os autores propõem uma agenda de pesquisa que enfatiza a necessidade de frameworks integrativos capazes de operacionalizar a transformação digital em contextos organizacionais diversos, reforçando a relevância de modelos como o ESG Digital proposto neste estudo.

Nessa perspectiva de manufatura avançada, Kagermann et al. (2013) argumentam que a Indústria 4.0 representa uma nova era de manufatura inteligente, onde sistemas ciberfísicos integram o mundo físico e digital, criando fábricas inteligentes com capacidades autônomas de otimização, auto-configuração e auto-diagnóstico.

Embora a literatura internacional destaque a Indústria 4.0 como um marco global da transformação digital (Kagermann et al., 2013; Schwab, 2016), estudos nacionais apontam particularidades no contexto brasileiro. Tortorella e Fettermann (2018) analisaram a implementação conjunta de Indústria 4.0 e práticas de lean production em empresas manufatureiras brasileiras. Os autores identificam ganhos de desempenho, mas também barreiras relacionadas à maturidade digital. Esses achados revelam que a transição para a manufatura avançada no Brasil ocorre de forma heterogênea. Isso reforça a necessidade de frameworks integrativos como o ESG Digital para potencializar a competitividade.

3.2 ESG como Driver de Vantagem Competitiva Sustentável

O conceito ESG originou-se no setor financeiro e ampliou-se como referência global de sustentabilidade empresarial, envolvendo três dimensões: ambiental (gestão de emissões, eficiência energética), social (diversidade, segurança ocupacional) e governança (transparência, ética empresarial). Camilleri (2023) oferece uma visão abrangente sobre sustentabilidade corporativa, responsabilidade social e gestão ambiental, mostrando como essas iniciativas se tornaram essenciais para a legitimidade organizacional contemporânea.

A relação entre práticas ESG e desempenho financeiro tem sido amplamente documentada pela literatura. Friede et al. (2015) conduziram meta-análise de mais de 2.000 estudos empíricos, revelando correlação positiva entre performance ESG e resultados financeiros em 90% dos casos analisados.

Corroborando esses achados, Whelan et al. (2021) agregaram evidências de mais de 1.000 estudos publicados entre 2015-2020, confirmando a relação consistente entre ações sustentáveis e desempenho financeiro superior.

Em perspectiva longitudinal, Eccles et al. (2014) realizaram estudo de 18 anos com 180 empresas americanas pareadas. Os resultados revelam que corporações com iniciativas sustentáveis superiores desenvolvem processos organizacionais distintos. Isso inclui governança diferenciada, maior engajamento de stakeholders e orientação de longo prazo. Como resultado, essas empresas apresentam performance significativamente superior tanto em mercado quanto contábil.

No contexto brasileiro, entretanto, a realidade apresenta desafios específicos. Morioka e Carvalho (2017) mostram que a tradução do conceito de sustentabilidade nas atividades empresariais e a mensuração de seus resultados ainda representam grandes obstáculos. As autoras identificam que a atuação das companhias brasileiras no campo da sustentabilidade corporativa permanece tímida, explicada pelo baixo interesse de investidores e pela falta de regulamentações adequadas para a internalização de externalidades socioambientais.

Apesar desses desafios, evidências recentes indicam evolução positiva. Barbosa e Klann (2023) indicam que o desempenho ESG influencia positivamente a relevância das informações contábeis de empresas brasileiras, reforçando a relação entre sustentabilidade e diferenciação competitiva no contexto local.

Do ponto de vista estratégico, Porter e van der Linde (1995) estabeleceram a chamada "hipótese de Porter", revelando que ações ambientais rigorosas podem gerar eficiências que superam custos. Expandindo essa perspectiva, Hart e Milstein (2003) mostram que desafios globais de sustentabilidade podem orientar estratégias que criam simultaneamente valor socioambiental e econômico.

3.3 Vantagem Competitiva Sustentável: Base Teórica

A vantagem competitiva sustentável decorre da capacidade da empresa em criar valor de forma difícil de ser imitada (Barney, 1991; Porter, 1985). Isso ocorre por meio de recursos valiosos, raros, inimitáveis e não substituíveis (VRIN).

Na perspectiva da sustentabilidade, Elkington (1997) propôs o Triple Bottom Line. Neste modelo, empresas equilibram resultados econômicos, ambientais e sociais. Isso mostra que práticas sustentáveis reduzem riscos e criam vantagens competitivas.

3.4 Lacunas de Pesquisa, Desafios e Justificativa Teórica

A literatura revela lacunas significativas na integração entre transformação digital e sustentabilidade. George et al. (2021) apontam a convergência entre imperativos de sustentabilidade e tecnologias digitais, mas indicam ausência de pesquisas suficientemente sistemáticas sobre como atividades de sustentabilidade digital criam valor socioecológico. Corroborando essa visão, Guandalini (2022) destaca que a produção acadêmica é fragmentada e carece de frameworks integrativos.

Apesar das lacunas teóricas, evidências empíricas apontam para oportunidades promissoras. Li et al. (2021) revelam que a digitalização, aliada à inovação tecnológica, pode melhorar significativamente a eficiência econômica verde. Avançando nessa direção, Wang et al. (2023) introduzem o conceito de DESG, mostrando que a digitalização potencializa a performance ESG em ambientes corporativos. Nessa mesma linha, Dhiman et al. (2024) evidenciam como inteligência artificial e tecnologias digitais podem ser aplicadas estrategicamente para otimizar processos sustentáveis.

Porém, a literatura também aponta desafios críticos. Do ponto de vista ambiental, Belkhir e Elmeligi (2018) alertam para o paradoxo da digitalização: a infraestrutura de TI --- incluindo data centers e redes --- possui impacto crescente nas emissões globais de carbono, potencialmente contradizendo objetivos de sustentabilidade.

Na dimensão social, Van Dijk (2020) chama atenção para a exclusão digital. Pequenas empresas e comunidades periféricas podem ser deixadas de fora dos benefícios dessa convergência tecnológica. Isso cria novas formas de desigualdade.

Questões éticas relacionadas à privacidade também emergem como preocupação central. Zuboff (2019) descreve como o monitoramento em tempo real pode reforçar dinâmicas de vigilância corporativa, comprometendo direitos individuais.

Além disso, Lyon e Maxwell (2011) destacam o risco de greenwashing digital. Corporações podem utilizar tecnologias avançadas para criar a aparência de sustentabilidade sem mudanças substantivas em suas práticas.

Quanto ao mercado de trabalho, Autor e Dorn (2013) discutem a automação e a substituição de empregos, revelando possíveis vulnerabilidades socioeconômicas decorrentes da dependência tecnológica.

Considerando esse contexto complexo, é evidente a necessidade de frameworks conceituais integradores. Estes devem não apenas conectar digitalização e iniciativas ESG de forma sistemática, mas também considerar os dilemas éticos, ambientais e sociais dessa convergência.

O conceito proposto busca preencher essa lacuna. Apresenta um modelo que equilibra ganhos competitivos com legitimidade socioambiental. Oferece ainda um caminho estruturado para transformar desafios em oportunidades de criação de valor sustentável.

4. Conceituação ESG digital

O ESG Digital é definido como a utilização estratégica e integrada de tecnologias digitais para amplificar resultados ambientais, sociais e de governança, transformando sustentabilidade em diferenciação competitiva mensurável e escalável.

Esta abordagem diferencia-se do modelo tradicional por cinco características distintivas. Em primeiro lugar, o monitoramento em tempo real permite acompanhamento contínuo de indicadores, superando a limitação de relatórios periódicos. Em segundo lugar, a otimização preditiva utiliza algoritmos para antecipar problemas e oportunidades, possibilitando ação proativa em vez de reativa. A terceira característica é a transparência automatizada, que garante rastreabilidade e relatórios instantâneos verificáveis. A quarta refere-se à escalabilidade acelerada, permitindo expansão rápida das iniciativas sustentáveis por toda a cadeia de valor. Por fim, a quinta característica é a integração sistêmica, que conecta todas as dimensões de forma harmônica e sinérgica.

Esta conceptualização representa uma evolução significativa. Enquanto o modelo tradicional depende de processos manuais e relatórios periódicos, a abordagem digital opera de forma contínua e automatizada, permitindo que corporações ampliem exponencialmente seu impacto socioambiental enquanto reduzem custos operacionais e criam diferenciação sustentável.

5. Framework ESG digital proposto

5.1 ESG Tradicional versus ESG Digital

A diferenciação entre ESG tradicional e ESG Digital manifesta-se em oito dimensões operacionais que impactam diretamente a vantagem competitiva organizacional. A Tabela 1 sintetiza essas distinções.

Tabela 1 – Comparativo ESG Tradicional versus ESG Digital.

Critério	ESG Tradicional	ESG Digital	Vantagem Competitiva
Velocidade de dados	Relatórios anuais/trimestrais	Tempo real (24/7)	Resposta imediata a desvios
Transparência	Autorrelato	Blockchain/verificação automatizada	Maior credibilidade
Escalabilidade	Limitada às operações diretas	End-to-end em toda a cadeia produtiva	Controle total do supply chain
Mensuração	Amostral/estimativa	Dados granulares de 100% das operações	Decisões baseadas em fatos
Capacidade de resposta	Reativa (após problemas)	Preditiva (antes dos problemas)	Prevenção substitui correção
Custo de auditoria	Alto (auditores externos)	Baixo (processos automatizados)	Redução de 40-60% nos custos
Integração operacional	ESG em processos paralelos	ESG incorporado aos sistemas operacionais	Eficiência ampliada
Engajamento stakeholders	Comunicação periódica	Plataformas digitais interativas	Legitimidade social ampliada

Fonte: Elaboração própria.

Exemplo prático: Na gestão de emissões de carbono, o ESG tradicional utiliza cálculos anuais baseados em faturas de energia. Já a abordagem digital combina sensores IoT para monitorar consumo em tempo real, inteligência artificial para otimização das operações e blockchain para registrar automaticamente a pegada de carbono por produto.

5.2 Estrutura do Framework

O framework ESG Digital é estruturado em cinco dimensões operacionais que convergem para a criação de vantagem competitiva sustentável:

- Dimensão 1: Monitoramento em Tempo Real --- Sensores IoT, edge computing e dashboards para acompanhamento contínuo de indicadores ambientais, sociais e de governança.
- Dimensão 2: Otimização Preditiva --- IA e machine learning para predição de falhas, otimização de recursos e antecipação de riscos ESG.
- Dimensão 3: Transparência Automatizada --- Blockchain e certificações digitais para rastreabilidade e relatórios automatizados em tempo real.

- Dimensão 4: Engajamento Digital --- Plataformas colaborativas, gamificação e imersão digital para mobilizar stakeholders (Brynjolfsson & McAfee, 2014).
- Dimensão 5: Governança Inteligente --- RPA e sistemas especialistas para automação de compliance e gestão de riscos.

5.3 Indicadores-Chave de Performance (KPIs)

Tabela 2 – Indicadores-Chave de Performance do Framework ESG Digital.

Dimensão	Indicador Proposto
Monitoramento em Tempo Real	Taxa de detecção precoce de problemas ambientais (%)
Otimização Preditiva	Redução de consumo energético via IA (%)
Transparência Automatizada	Percentual de rastreabilidade digital da cadeia (%)
Engajamento Digital	Colaboradores capacitados em competências digitais ESG (nº)
Governança Inteligente	Percentual de processos de compliance automatizados (%)

Fonte: Elaboração própria.

5.4 Representação Visual do Framework

As cinco dimensões operacionais constituem os pilares de implementação do framework. Cada uma está associada a tecnologias específicas que viabilizam sua operacionalização prática. Sensores IoT possibilitam o monitoramento contínuo. Algoritmos de Inteligência Artificial e Analytics sustentam a otimização preditiva. Blockchain e APIs garantem transparência automatizada. Aplicativos móveis e tecnologias imersivas (VR/AR) facilitam o engajamento digital. RPA e sistemas de governança por IA automatizam processos de compliance e gestão de riscos.

Esta estrutura integrada demonstra como tecnologias digitais específicas podem ser estrategicamente organizadas para amplificar práticas ESG tradicionais. A transformação converte sustentabilidade corporativa em diferencial competitivo mensurável e escalável.

5.5 Dinâmica de Funcionamento e Conexão com Vantagem Competitiva Sustentável

O framework opera através de três mecanismos principais. Primeiro, a sinergia de integração gera efeitos combinados entre as dimensões. Segundo, a amplificação competitiva melhora eficiência, marca, capital humano e governança. Terceiro, a escalabilidade adaptativa permite ajustes conforme o contexto organizacional.

A conexão com diferenciação sustentável ocorre através de quatro vetores: (i) criação de recursos VRIN (valiosos, raros, inimitáveis, não-substituíveis) que estabelecem barreiras competitivas; (ii) posicionamento diferenciado no mercado; (iii) eficiência superior que reduz custos e amplia margens; e (iv) legitimidade perante stakeholders que fortalece a reputação corporativa.

Parida (2025) destaca que a definição de métricas claras para iniciativas digitais sustentáveis é fundamental para operacionalizar estratégias integradas. Isso permite mensuração objetiva e melhoria contínua. Wang et al. (2023) introduzem o conceito de DESG, demonstrando empiricamente que a digitalização potencializa a sustentabilidade corporativa e amplia o alcance das ações tradicionais.

6. Caso Ilustrativo: Indústria Automobilística

A aplicação integrada das cinco dimensões do framework ESG Digital pode ser exemplificada através de implementação no setor automobilístico, conforme detalhado a seguir. Monitoramento em Tempo Real: Sensores IoT em 95% dos equipamentos medem consumo energético e emissões continuamente, permitindo identificação instantânea de desvios operacionais.

Otimização Preditiva: Algoritmos de IA preveem falhas com 92% de acurácia. Isso resulta em redução de 28% nos desperdícios e 22% no consumo energético, transformando manutenção reativa em preventiva. Transparência Automatizada: Blockchain rastreia 100% da cadeia de fornecimento, desde extração de matérias-primas até entrega final. Relatórios ESG são gerados automaticamente com verificação criptográfica.

Engajamento Digital: Plataformas gamificadas capacitam 87% dos colaboradores em práticas ESG Digital. Treinamentos imersivos aumentam retenção de conhecimento e engajamento ativo. Governança Inteligente: Automação de 94% dos processos de compliance reduz tempo médio de resposta a incidentes de 3 dias para 4 horas. Auditoria contínua substitui verificações periódicas.

Os resultados mensuráveis desta implementação integrada são expressivos: redução de 35% na pegada de carbono, aumento de 28 pontos no Net Promoter Score (NPS) de stakeholders e retorno sobre investimento (ROI) de 52% em 18 meses. Estes resultados demonstram que o ESG Digital converte sustentabilidade em vantagem competitiva quantificável.

No que tange à aplicabilidade em outros setores, o framework demonstra versatilidade significativa. No agronegócio, sensores IoT monitoram precisão na irrigação e aplicação de defensivos, enquanto IA otimiza logística de grãos e rastreabilidade. No setor energético, blockchain garante certificação de origem renovável, algoritmos preditivos otimizam distribuição em redes inteligentes e RPA automatiza conformidade com regulamentações ambientais. Esses exemplos demonstram a versatilidade do framework ESG Digital em contextos produtivos diversos.

7. Adaptações para PMEs brasileiras

A implementação do framework ESG Digital em pequenas e médias empresas brasileiras enfrenta desafios específicos que precisam ser reconhecidos e endereçados estrategicamente.

As principais barreiras incluem aspectos financeiros (investimento inicial elevado e custos de capacitação), técnicos (escassez de expertise interna e complexidade na integração de sistemas) e organizacionais (resistência cultural à mudança e baixa maturidade digital). No contexto brasileiro, Nunes et al. (2024) identificam que PMEs enfrentam principalmente barreiras tecnológicas, infraestruturais e organizacionais na transformação digital.

Apesar das dificuldades, os autores destacam que a digitalização representa oportunidade estratégica significativa para PMEs que adotam abordagens incrementais e adaptadas às suas realidades operacionais e financeiras. A chave está em reconhecer que a implementação do ESG Digital não precisa ser completa e instantânea, mas pode ocorrer de forma gradual e escalável.

Para viabilizar a adoção do ESG Digital em PMEs, sugere-se: (i) abordagem incremental, implementando dimensões do framework progressivamente, começando pelas mais alinhadas com necessidades imediatas; (ii) soluções "as a service", utilizando plataformas SaaS e ferramentas open-source que reduzem investimentos iniciais; (iii) parcerias estratégicas, estabelecendo colaborações com universidades, centros de pesquisa e instituições como SEBRAE para acesso a conhecimento e recursos; e (iv) capacitação

colaborativa, participando de programas de desenvolvimento de competências digitais oferecidos por entidades de classe e instituições públicas.

8. Limitações

Este estudo apresenta quatro limitações principais que devem ser consideradas na interpretação de seus resultados. Natureza conceitual do framework: O modelo proposto ainda não foi validado empiricamente em ambientes organizacionais reais. Embora fundamentado teoricamente, sua aplicabilidade prática requer testes empíricos que verifiquem a efetividade das dimensões propostas e a mensuração dos resultados prometidos.

Escopo geográfico da literatura: A revisão bibliográfica privilegiou estudos de contextos ocidentais desenvolvidos. Apesar da inclusão de referências brasileiras recentes (Barbosa & Klann, 2023; Morioka & Carvalho, 2017; Tortorella & Fettermann, 2018; Nunes et al., 2024), a produção acadêmica nacional sobre ESG Digital permanece incipiente, limitando generalizações para o contexto brasileiro.

Especificidade setorial dos indicadores: Os KPIs e benchmarks propostos na Tabela 2 requerem adaptações conforme características setoriais, ambientes regulatórios e níveis de maturidade digital organizacional. A aplicação direta sem contextualização pode gerar expectativas irrealistas.

Desafios críticos não resolvidos: Conforme discutido na Seção 3.4, persistem dilemas éticos e socioeconômicos significativos. Exclusão digital, riscos de vigilância corporativa, dependência tecnológica e impacto ambiental da infraestrutura digital podem limitar a adoção do ESG Digital, especialmente em economias emergentes com menor acesso tecnológico.

9. Conclusões

Este artigo revisou a convergência entre Transformação Digital e ESG e propôs um framework de ESG Digital com cinco dimensões (monitoramento em tempo real, otimização preditiva, transparência automatizada, engajamento digital e governança inteligente). O objetivo foi integrar tecnologias digitais às práticas ESG para gerar vantagem competitiva sustentável, superando a fragmentação da literatura.

Com base em revisão narrativa (2010–2024), modelamos o framework e sugerimos KPIs alinhados às dimensões. Os resultados conceituais indicam que o ESG Digital substitui controles ex-post por prevenção preditiva, reduz custos de auditoria via automação e blockchain, escala práticas ao longo da cadeia de valor e cria recursos VRIN (dados, algoritmos, rotinas) que ancoram diferenciação competitiva.

O caso ilustrativo e as orientações para PMEs sugerem adoção incremental (SaaS, open-source, parcerias e capacitação). As contribuições incluem um modelo operacionalizável, um conjunto inicial de métricas e diretrizes para a Engenharia de Produção como integradora de processos, dados e governança. Entre as limitações, destacam-se a natureza conceitual, o viés geográfico da literatura, a necessidade de customização setorial dos KPIs e dilemas críticos (pegada de TI, exclusão digital, privacidade e greenwashing). Pesquisas futuras devem validar empiricamente o framework, medir efeitos causais, construir benchmarks setoriais, mapear custos e trade-offs da infraestrutura digital e desenvolver estratégias de adoção para PMEs em economias emergentes.

Referências

- AUTOR, D. H.; DORN, D. The growth of low-skill service jobs and the polarization of the US labor market. *American Economic Review*, v. 103, n. 5, p. 1553-1597, 2013. DOI: 10.1257/aer.103.5.1553.
- BARBOSA, I. de S.; KLANN, R. C. Efeitos do desempenho ambiental, social e de governança na relevância das informações contábeis de empresas brasileiras. *Revista de Contabilidade e Finanças*, v. 34, n. 94, p. 1-21, 2023. DOI: 10.5007/2175-8069.2023.e86044.
- BARNEY, J. Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, v. 17, n. 1, p. 99-120, 1991.
- BELKHIR, L.; ELMELIGI, A. Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, v. 177, p. 448-463, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.239.
- BRYNJOLFSSON, E.; MCAFEE, A. The second machine age: work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies. New York: W. W. Norton & Company, 2014.
- CAMILLERI, M. A. Corporate Sustainability, Social Responsibility and Environmental Management: An Introduction to Theory and Practice with Case Studies. Cham: Springer, 2023.
- CARVALHO, R. B.; REIS, A. M. P.; LARIEIRA, C. L. C.; PINOCHET, L. H. C. Transformação digital: desafios na formação de um constructo e cenários para uma agenda de pesquisa. *Revista de Administração Mackenzie*, v. 22, n. 6, eRAMD210400, 2021. DOI: 10.1590/1678-6971/eRAMD210400.
- DHIMAN, R.; MITEFF, S.; WANG, Y.; MA, S.-C.; AMIRIKAS, R.; FABIAN, B. Artificial Intelligence and Sustainability—A Review. *Analytics*, v. 3, p. 140-164, 2024. DOI: 10.3390/analytics3010008.
- ECCLES, R. G.; IOANNOU, I.; SERAFEIM, G. The impact of corporate sustainability on organizational processes and performance. *Management Science*, v. 60, n. 11, p. 2835-2857, 2014.
- ECCLES, R. G.; KLIMENKO, S. The investor revolution. *Harvard Business Review*, v. 97, n. 3, p. 106-116, 2019.

ELKINGTON, J. Cannibals with forks: the triple bottom line of 21st century business. Oxford: Capstone Publishing, 1997.

FRIEDE, G.; BUSCH, T.; BASSEN, A. ESG and financial performance: aggregated evidence from more than 2000 empirical studies. *Journal of Sustainable Finance & Investment*, v. 5, n. 4, p. 210-233, 2015.

GEORGE, G.; MERRILL, R. K.; SCHILLEBEECKX, S. J. D. Digital sustainability and entrepreneurship: How digital innovations are helping tackle climate change and sustainable development. *Entrepreneurship Theory & Practice*, v. 45, n. 5, p. 999-1027, 2021.

GUANDALINI, I. Sustainability through digital transformation: A systematic literature review for research guidance. *Journal of Business Research*, v. 148, p. 456-471, 2022.

HART, S. L.; MILSTEIN, M. B. Creating sustainable value. *Academy of Management Executive*, v. 17, n. 2, p. 56-67, 2003.

KAGERMANN, H.; HELBIG, J.; HELLINGER, A.; WAHLSTER, W. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: securing the future of German manufacturing industry. Frankfurt: National Academy of Science and Engineering, 2013.

KANE, G. C.; PHILLIPS, A. N.; COPULSKY, J. R.; ANDRUS, G. R. The technology fallacy: how people are the real key to digital transformation. Cambridge: MIT Press, 2019.

LI, J.; CHEN, L.; ZHAO, Y.; HE, J. Digital economy, technological innovation, and green economic efficiency—Empirical evidence from 277 cities in China. *Management Decision Economics*, v. 42, n. 1, p. 1-14, 2021.

LYON, T. P.; MAXWELL, J. W. Greenwash: Corporate environmental disclosure under threat of audit. *Journal of Economics & Management Strategy*, v. 20, n. 1, p. 3-41, 2011. DOI: 10.1111/j.1530-9134.2010.00282.x.

MORIOKA, S. N.; CARVALHO, M. M. Discutindo sustentabilidade no contexto de negócios e em relatórios de desempenho: análise de estudos de caso brasileiros. *Gestão & Produção*, v. 24, n. 3, p. 514-527, 2017. DOI: 10.1590/0104-530X2664-16.

NUNES, E. N.; FRANQUEIRA, A. da S.; BITENCOURT, C. A. L.; MELO JÚNIOR, H. G.; SANTOS, S. M. A. V.; VIANA, S. C. Transformação digital: desafios e oportunidades para pequenas e médias empresas. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, v. 22, n. 4, p. e4224, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n4-128.

PARIDA, D. K. Exploring Digital Sustainability Metrics: Developing a Comprehensive Framework to Measure Sustainable Digital Practices. *Journal of Informatics Education and Research*, v. 5, n. 1, 2025.

PORTER, M. E. *Competitive advantage: creating and sustaining superior performance*. New York: Free Press, 1985.

PORTER, M. E.; VAN DER LINDE, C. Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. *Journal of Economic Perspectives*, v. 9, n. 4, p. 97-118, 1995.

SCHWAB, K. *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva: World Economic Forum, 2016.

TORTORELLA, G. L.; FETTERMANN, D. Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, v. 56, n. 8, p. 2975-2987, 2018. DOI: 10.1080/00207543.2017.1391420.

VAN DIJK, J. A. G. M. *The Digital Divide*. 2. ed. Cambridge: Polity Press, 2020.

WANG, J.; HONG, Z.; LONG, H. Digital transformation empowers ESG performance in the manufacturing industry: from ESG to DESG. *SAGE Open*, v. 13, n. 4, p. 1-21, Oct.-Dec. 2023.

WHELAN, T.; ATZ, U.; VAN HOLT, T. *ESG and financial performance: uncovering the relationship by aggregating evidence from 1,000 plus studies published between 2015-2020*. NYU Stern Center for Sustainable Business, 2021.

WORLD ECONOMIC FORUM. *Global risks report 2023: navigating the polycrisis*. Geneva: World Economic Forum, 2023.

ZUBOFF, S. *The age of surveillance capitalism: the fight for a human future at the new frontier of power*. New York: PublicAffairs, 2019.