

**Lean 4.0 ESG: framework de convergência estratégica
e revisão sistemática da literatura sobre eficiência,
transformação digital e sustentabilidade**

***Lean 4.0 ESG: a strategic convergence framework and
systematic literature review on operational efficiency, digital
transformation, and sustainability***

***Lean 4.0 ESG: framework de convergencia estratégica
y revisión sistemática de la literatura sobre eficiencia
operacional, transformación digital y sostenibilidad***

Adriano Marinheiro Pompeu¹

¹ Mestre em Desenvolvimento Local pela Universidade Católica Dom Bosco (UCDB). Mestre em Eficiência Energética e Sustentabilidade pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). MBA em Gestão de Projetos pela Universidade Estácio de Sá (Estácio). MBA em Logística Empresarial pela Estácio. Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Anhanguera-Uniderp (Uniderp). Graduado em Engenharia de Produção pela Centro Universitário de Ensino Superior de Campo Grande (UNAES). **E-mail:** adrianoifael@yahoo.com.br, **Orcid:** <https://orcid.org/0000-0003-4424-2493>

Resumo: O cenário empresarial contemporâneo exige que organizações integrem eficiência operacional, tecnologia e práticas ESG para se manterem competitivas. Este artigo propõe o framework Lean 4.0 ESG, uma estrutura integrada que sistematiza a união entre os princípios do Lean Manufacturing, as tecnologias da Indústria 4.0 e parâmetros de Environmental, Social, and Governance (ESG). A metodologia fundamentou-se em revisão sistemática da literatura de caráter exploratório e qualitativo, analisando publicações entre 2016 e 2026. Os resultados apresentam um modelo estruturado, onde a Indústria 4.0 fornece infraestrutura tecnológica, o Lean otimiza a eficiência operacional e o ESG definições de diretrizes de valor compartilhado e sustentabilidade. A discussão aponta que a integração tecnológica mitiga o greenwashing ao fornecer métricas imutáveis e auditáveis, transformando a sustentabilidade em vantagem competitiva. Conclui-se que o framework Lean 4.0 ESG oferece um roteiro estratégico de resiliência empresarial, permitindo que produtividade e impacto socioambiental positivo coexistam de forma sinérgica e transparente.

Palavras-chave: ESG; Eficiência operacional; Indústria 4.0; Lean Manufacturing.

Abstract: The contemporary business landscape demands that organizations integrate operational efficiency, technology, and ESG practices to remain competitive. This article proposes the Lean 4.0 ESG framework, an integrated structure that systematizes the union between Lean Manufacturing principles, Industry 4.0 technologies, and Environmental, Social, and Governance (ESG) parameters. The methodology was based on an exploratory and qualitative systematic literature review, analyzing publications from 2016 to 2026. The results present a structured model in which Industry 4.0 provides the technological infrastructure, Lean optimizes operational efficiency, and ESG defines the guidelines for shared value and sustainability. The discussion indicates that technological integration mitigates greenwashing by providing immutable and auditable metrics, transforming sustainability into a competitive advantage. It is concluded that the Lean 4.0 ESG framework offers a strategic roadmap for business resilience, allowing productivity and positive socio-environmental impact to coexist in a synergistic and transparent manner.

Keywords: ESG; operational efficiency; Industry 4.0; Lean Manufacturing.

Resumen: El panorama empresarial contemporáneo exige que las organizaciones integren eficiencia operativa, tecnología y prácticas ESG para mantenerse competitivas. Este artículo propone el framework Lean 4.0 ESG, una estructura integrada que sistematiza la unión entre los principios de Lean Manufacturing, las tecnologías de la Industria 4.0 y los parámetros Ambientales, Sociales y de Gobernanza (ESG). La metodología se basó en una revisión sistemática de la literatura de carácter exploratorio y cualitativo, analizando publicaciones entre 2016 y 2024. Los resultados presentan un modelo estructurado donde la Industria 4.0 proporciona la infraestructura tecnológica, el Lean optimiza la eficiencia operativa y el ESG define las directrices de valor compartido y sostenibilidad. La discusión señala que la integración tecnológica mitiga el greenwashing al proporcionar métricas inmutables y auditables, transformando la sostenibilidad en una ventaja competitiva. Se concluye que el framework Lean 4.0 ESG ofrece una hoja de ruta estratégica para la resiliencia empresarial, permitiendo que la productividad y el impacto socioambiental positivo coexistan de forma sinérgica y transparente.

Palabras clave: ESG; eficiencia operacional; Industria 4.0; Manufactura Esbelta.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por práticas empresariais sustentáveis tem impulsionado organizações a repensarem seus modelos de gestão, incorporando princípios que vão além da lucratividade. Nesse cenário, o conceito de ESG (*Environmental, Social and Governance*) ganhou destaque como um conjunto de diretrizes que orientam empresas na busca por responsabilidade ambiental, justiça social e governança ética. Paralelamente, a evolução tecnológica e a digitalização dos processos produtivos têm transformado radicalmente os ambientes empresariais, dando origem à chamada Indústria 4.0.

Dentro desse novo paradigma, o *Lean Manufacturing*, tradicionalmente voltado à eliminação de desperdícios e à melhoria contínua, passou por uma reconfiguração, integrando tecnologias digitais como *Internet of Things* (IoT), Inteligência Artificial (IA), *Big Data*, entre outras. Essa convergência resultou no *Lean 4.0*, uma abordagem que alia eficiência operacional à inteligência de dados. Desta forma, uma interseção entre *Lean 4.0* e ESG representa uma oportunidade estratégica para empresas que desejam alinhar produtividade com propósito, inovação com impacto socioambiental.

A importância dessa integração reside na possibilidade de transformar a sustentabilidade em um vetor de competitividade, haja vista que ao aplicar práticas enxutas com suporte tecnológico, as organizações podem reduzir o consumo de recursos naturais, otimizar processos e gerar valor compartilhado para *stakeholders* internos e externos. Além disso, a adoção de parâmetros de ESG integrados aos sistemas de gestão operacional permite maior transparência, rastreabilidade e conformidade regulatória.

Do ponto de vista gerencial, essa abordagem integrada favorece a tomada de decisão baseada em dados, o engajamento de equipes em práticas sustentáveis e a construção de uma cultura organizacional orientada por valores. Em um contexto de crescente pressão por responsabilidade corporativa, unir *Lean 4.0* e ESG pode representar não apenas uma vantagem competitiva, mas uma resposta estratégica às exigências do mercado e da sociedade.

Apesar das potenciais sinergias entre *Lean 4.0* e ESG, ainda são limitados os estudos que abordam essa integração de forma sistemática. A

literatura tende a tratar essas abordagens separadamente, o que dificulta a construção de modelos gerenciais que unam produtividade e responsabilidade socioambiental. Além disso, muitas empresas enfrentam desafios na operacionalização das diretrizes ESG, especialmente ao que tange à mensuração de resultados e à adaptação de processos operacionais.

Outro ponto crítico é a ausência de uma estrutura estratégica com conceitos aplicáveis (*frameworks*), que orientem a adoção conjunta dessas abordagens em ambientes organizacionais. Sem diretrizes claras, as iniciativas ESG podem se tornar superficiais ou desconectadas da estratégia operacional, enquanto as práticas *Lean* podem ignorar aspectos éticos e ambientais relevantes. Assim, torna-se necessário desenvolver modelos conceituais que promovam essa integração de forma estruturada e funcional.

Este estudo tem como objetivo propor um *framework* conceitual denominado *Lean 4.0 ESG*, que integra os princípios da manufatura enxuta digital com as diretrizes de sustentabilidade corporativa. Adicionalmente, os objetivos específicos buscam identificar sinergias entre *Lean 4.0* e ESG, apresentar as sobreposições e intersecção dos conceitos que viabilizam essa integração e desenvolver um modelo aplicável em ambientes organizacionais.

Para atingir o objetivo proposto, este artigo desenvolve uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), estruturada conforme o protocolo PRISMA, analisando a produção científica do período entre 2016 e 2026. A pesquisa mapeou as interseções entre a otimização de processos, a infraestrutura tecnológica habilitadora e as métricas de sustentabilidade e governança. O trabalho está organizado em cinco seções, incluindo esta introdução, o referencial teórico, a metodologia adotada, a apresentação e validação do *framework Lean 4.0 ESG* e as considerações finais.

A metodologia adotada consiste em um estudo de natureza qualitativa e caráter exploratório, baseada em revisão sistemática da literatura nas principais bases acadêmicas (*Scopus*, *Web of Science*, *SciELO*, entre outras). Foram analisados artigos publicados nos últimos dez anos, com foco em estudos que abordaram *Lean Manufacturing*, Indústria 4.0 e conceitos de ESG, visando a construção de um modelo conceitual integrador. Por fim, espera-se que esta pesquisa contribua para o avanço teórico e prático da gestão estratégica sustentável, oferecendo subsídios para pesquisadores,

gestores e formuladores de estratégias corporativas, à medida que busca ampliar a compreensão sobre como eficiência operacional e responsabilidade socioambiental podem caminhar juntas na construção de organizações mais resilientes, éticas e inovadoras.

2 PILARES TEÓRICOS

2.1 Princípios e Ferramentas *Lean* na Era da Eficiência Sustentável

O *Lean Manufacturing*, ou Manufatura Enxuta, consolidou-se como uma filosofia de gestão centrada na maximização do valor para o cliente por meio da eliminação sistemática de desperdícios. Suas origens no Sistema Toyota de Produção e sua aplicação contemporânea transcende a mera eficiência operacional, estabelecendo sinergias fundamentais com os pilares da sustentabilidade e da digitalização (Indústria 4.0). A filosofia *Lean* oferece base organizacional e a disciplina de processos, necessárias para uma transição digital eficaz, uma vez que processos já otimizados e estáveis constituem um pré-requisito para a implementação bem-sucedida de tecnologias, prevenindo o equívoco da automatização do desperdício (Sanders; Elangeswaran; Wulfsberg, 2016; Buer; Strandhagen; Chan, 2018).

A integração entre *Lean* e sustentabilidade fundamenta-se na mitigação de desperdícios, cuja correlação direta com o pilar ambiental do ESG consolida o conceito de *Green Lean*, sendo fusão entre eficiência operacional e performance ambiental (Cherrafi *et al.*, 2017). Nessa abordagem, a redução de defeitos e a otimização de processos minimizam o consumo de recursos, posicionando o *Lean* como um motor estratégico para a eficiência ambiental corporativa (Ghobakhloo *et al.*, 2022). Essa evolução também se reflete nas ferramentas, como o *Value Stream Mapping* (VSM), que avança para o *Sustainable VSM* ao integrar métricas de emissões de CO₂ e geração de resíduos à análise do fluxo de valor (Djatna; Prasetyo, 2019).

A evolução do pensamento enxuto para o que a literatura denomina *Lean Green* estabelece o elo crítico entre a eficiência operacional e o desempenho ambiental sustentável (Cherrafi *et al.*, 2017). Essa simbiose cria uma estrutura operacional que permite à organização responder com maior agilidade e menor custo a regulamentações ambientais cada vez mais

rigorosas, sem comprometer a rentabilidade e gerando, inclusive, novas fontes de valor (Bai *et al.*, 2020).

Sob a ótica do pilar Social do ESG, a aplicação do *Lean* é reavaliada como mecanismo de bem-estar e segurança, pois a padronização reduz a carga cognitiva e os riscos de acidentes. Dessa forma, o bem-estar deixa de ser um conceito abstrato para se tornar uma métrica social, à medida que o treinamento e a autonomia promovem um ambiente inclusivo, mitigam a rotatividade de funcionários e fortalecem o capital humano (Pierli; Murmura; Bravi, 2026).

Por fim, a dimensão da Governança encontra no *Lean* um suporte para a transparência, tendo em vista que a implementação de conceitos estratégicos alinhados a ações de longo prazo, permite que as metas ESG sejam desdobradas até o chão de fábrica (Digalwar *et al.*, 2017). Neste sentido, Cășăneanu e Pîslaru, (2024) descrevem que a disciplina do *Lean* cria um ambiente de responsabilidade, onde a mensuração rigorosa de indicadores facilita a auditoria de processos e a conformidade regulatória. Assim, o *Lean* atua como a base necessária para que a transparência exigida pelo ESG seja operacionalizada de forma rastreável.

2.2 Fundamentos do ESG e a nova agenda de sustentabilidade corporativa

O conceito de ESG representa uma evolução significativa na forma como as organizações mensuram seu sucesso, transcendendo as métricas financeiras tradicionais para incorporar dimensões extra financeiras na tomada de decisão. Diferente da Responsabilidade Social Corporativa (RSC), que muitas vezes operava de forma periférica à estratégia central, o ESG atua como um sistema de indicadores quantificáveis que permitem a investidores e *stakeholders* avaliarem a resiliência e a ética de uma organização. Segundo Gillan, Koch e Starks, (2021) a integração desses critérios reflete uma mudança de paradigma rumo ao capitalismo de *stakeholders*, onde o valor a longo prazo é gerado pelo equilíbrio entre rentabilidade, preservação ambiental e justiça social.

O pilar ambiental do ESG impõe às indústrias o desafio estratégico de migrar para uma economia de baixo impacto ambiental e modelos de

produção sustentável, indo além da conformidade legal para abranger a gestão eficiente de recursos, a mitigação climática e a economia circular (Geissdoerfer; Vladimirova; Evans, 2018). Nesse cenário, o desempenho ambiental consolida-se como pilar crítico da competitividade e resiliência empresarial. A redução da pegada ecológica por meio da ecoeficiência e da circularidade transforma-se em vantagem operacional e econômica, mitigando riscos regulatórios e reputacionais, ao mesmo tempo que reduz custos com insumos e passivos ambientais (Bocken; Geradts, 2020).

O pilar social foca no capital humano e nas relações da empresa com a comunidade e sua cadeia de suprimentos. Em um contexto industrial, isso envolve desde a saúde e segurança ocupacional até a diversidade e inclusão nas equipes. Para Christensen; Hail; Leuz, (2019), a transparência nos dados sociais é cada vez mais exigida, pois empresas que demonstram compromisso com o bem-estar dos colaboradores e com os direitos humanos tendem a apresentar maior produtividade e menor exposição a crises de reputação, fatores que influenciam diretamente o valor de mercado da organização.

A governança o terceiro pilar, refere-se aos mecanismos, processos e relações pelos quais as empresas são controladas e dirigidas. No âmbito do ESG, a governança eficaz exige ética empresarial, transparência nos relatórios financeiros e a independência dos conselhos de administração. Segundo Billio *et al.*, (2021), uma governança robusta é o que garante que os compromissos ambientais e sociais não sejam meras estratégias enganosas de sustentabilidade conhecidas como *greenwashing*, mas sim políticas estruturais integradas ao modelo de negócio, assegurando que a liderança seja responsabilizada pelo desempenho sustentável.

Implementar o ESG exige traduzir diretrizes estratégicas em indicadores operacionais. O principal desafio é coletar dados precisos e em tempo real para comprovar o impacto das ações sustentáveis. Como destacam Clementino e Perkins (2021), a conformidade com o ESG demanda uma mudança cultural, a sustentabilidade deve deixar de ser uma atribuição apenas do departamento ambiental para se tornar uma responsabilidade compartilhada por todos os setores, do planejamento à logística reversa.

A integração do ESG na estratégia empresarial responde às pressões do mercado global e à maior consciência dos consumidores. Organizações que

não adotam esses princípios enfrentam dificuldades para acessar capital e reter talentos. Como argumentam Pedersen, Fitzgibbons e Pomorski (2021), o ESG não é uma tendência passageira, mas o novo padrão de gestão que define a viabilidade da empresa em um cenário de escassez de recursos e exigência por transparência, reforçando a necessidade de *frameworks* integradores como o proposto nesta pesquisa.

2.3 Indústria 4.0: tecnologias habilitadoras e a digitalização industrial

A Indústria 4.0, ou Quarta Revolução Industrial, baseia-se na integração de sistemas ciber-físicos, Internet das Coisas (IoT) e computação em nuvem. Ela vai além da automação para criar fábricas inteligentes que coletam e processam grandes volumes de dados em tempo real. Conforme Javaid *et al.*, (2022), seu diferencial é a interoperabilidade: a comunicação fluida entre máquinas, produtos e sistemas de gestão que dá às organizações uma agilidade sem precedentes para se adaptar a demandas do mercado e exigências regulatórias.

No centro desta transformação estão o *Big Data Analytics* e a Inteligência Artificial (IA), que convertem dados brutos em inteligência estratégica. No *Lean 4.0*, essas ferramentas eliminam a latência decisória, permitindo que desperdícios ocultos sejam identificados e corrigidos em tempo real. Conforme orientam Bai *et al.*, (2020), os algoritmos preditivos não apenas otimizam a manutenção de ativos, reduzindo paradas não planejadas, como também garantem o uso preciso de energia e insumos, mitigando o impacto ambiental e aprimorando a governança.

A IoT desempenha um papel fundamental na rastreabilidade e na transparência exigidas pelos indicadores ESG. Sensores inteligentes espalhados pelo chão de fábrica podem monitorar, com precisão cirúrgica, o consumo de água, a emissão de gases e o descarte de resíduos químicos. A capacidade de monitoramento contínuo elimina a dependência de relatórios manuais e estimativas, fornecendo dados auditáveis que fortalecem a credibilidade das empresas perante investidores e órgãos fiscalizadores, combatendo práticas de *greenwashing* (Cășăneanu e Pîslaru, 2024).

Outra tecnologia disruptiva é o Gêmeo Digital (*Digital Twin*), que permite a simulação virtual de processos produtivos antes de sua execução

física. Esta ferramenta possibilita testar diferentes cenários de produção para identificar qual deles apresenta o menor consumo de recursos e o menor risco para os operadores. Leng *et al.*, (2022) argumentam que a integração de Gêmeos Digitais com a gestão enxuta facilita o design de fluxos de valor altamente eficientes e sustentáveis, permitindo que a inovação ocorra em um ambiente de baixo risco e alto impacto socioambiental.

Sob a perspectiva social, as tecnologias da Indústria 4.0, como a robótica colaborativa (*Cobots*) e a realidade aumentada, redefinem a interação humano-máquina. Ao invés de substituir o trabalhador, essas tecnologias visam ampliar suas capacidades e garantir sua integridade física. Segundo Neumann *et al.*, (2021), a digitalização do posto de trabalho permite uma melhor adaptação ergonômica e a redução de tarefas perigosas ou repetitivas, alinhando-se diretamente ao pilar Social do ESG ao promover a saúde, a segurança e a valorização do capital humano no ambiente de trabalho.

Assim sendo, a Indústria 4.0 atua como o catalisador que permite a transição de uma economia linear para uma economia circular e digitalizada. A conectividade da cadeia de suprimentos por meio de tecnologias como o *Blockchain*, que garante a proveniência ética da matéria-prima e o ciclo de vida do produto sejam totalmente rastreáveis. Como concluem Kamble, Gunasekaran e Dhone (2020), a maturidade digital é, portanto, o requisito técnico que permite às empresas operacionalizarem conceitos de manufatura enxuta e indústria 4.0 com sustentabilidade, transformando a complexidade tecnológica em vantagem competitiva sustentável e resiliente.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como um estudo de natureza qualitativa e caráter exploratório, utilizando como procedimento técnico a Revisão Sistemática da Literatura (RSL). O objetivo central é a construção de um *framework* conceitual, método que, segundo Snyder (2019), é ideal para áreas onde a integração de diferentes conceitos (como *Lean*, ESG e Indústria 4.0) ainda se encontra em estágio emergente e fragmentado.

A execução da pesquisa seguiu um protocolo estruturado em quatro etapas principais, adaptado das diretrizes de *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) (Page *et al.*, 2021):

Definição do Portfólio Bibliográfico: A busca foi realizada em três bases de dados de relevância global: *Scopus*, *Web of Science*, *SciELO* e *ScienceDirect*. Foram utilizadas combinações de *strings* de busca em inglês, visando maior alcance acadêmico, tais como: "*Lean 4.0*" AND "*ESG*"; "*Smart Manufacturing*" AND "*Sustainability*"; e "*Lean-Green*" AND "*Industry 4.0*".

CrITÉRIOS de Inclusão e Exclusão: Foram selecionados apenas artigos científicos publicados em periódicos com revisão por pares (*peer-reviewed*) no intervalo temporal entre 2016 e 2026. Foram excluídos capítulos de livros, teses e artigos de conferências para garantir a qualidade e a atualidade das discussões teóricas.

Análise de Conteúdo: Os artigos selecionados passaram por uma análise categórica. Buscou-se identificar: (a) ferramentas *Lean* mencionadas; (b) tecnologias 4.0 citadas; e (c) correlação explícita com as dimensões Ambiental, Social e de Governança.

Síntese e Modelagem: A etapa final consistiu na síntese das evidências encontradas para a proposição do Framework *Lean* ESG 4.0. Esta modelagem seguiu a lógica de integração sistêmica, onde as tecnologias 4.0 atuam como infraestrutura, o *Lean* como motor de processo e o ESG como o resultado e diretriz estratégica.

O processo de filtragem e seleção dos estudos ocorreu em quatro etapas, conforme detalhado a seguir:

Identificação: Foram localizados inicialmente 120 registros nas bases de dados selecionadas, distribuídos da seguinte forma: 45 registros na base *Scopus*, 35 na *Web of Science*, 20 na *Science Direct* e 20 na *SciELO*.

Triagem: A gestão das referências e a eliminação de duplicatas foram realizadas utilizando o software *Mendeley*, seguindo as recomendações de automação para o protocolo PRISMA, sendo posteriormente confirmadas por meio de conferência manual. Esse processo resultou em 65 referências para a avaliação de título e resumo.

Elegibilidade: Foram lidos na íntegra os artigos que apresentavam maior aderência ao escopo desta pesquisa. Foram aplicados os seguintes critérios de exclusão: artigos em duplicidade, literatura cinzenta (resumos de eventos, *preprints* não revisados e notas editoriais) e publicações que

tratavam dos temas de forma isolada (como estudos de *Lean* tradicional ou de sustentabilidade sem convergência tecnológica).

Inclusão: Compuseram a amostra final 14 estudos, que foram analisados qualitativamente, sintetizados e divididos nas seguintes categorias: (i) convergência tecnológica e eficiência operacional, e (ii) métricas corporativas de sustentabilidade e valor compartilhado.

Esta abordagem metodológica permite que o *framework* proposto não seja apenas uma construção teórica isolada, mas uma síntese fundamentada nas melhores práticas e evidências científicas publicadas nos últimos dez anos.

4 ESTRUTURA E COMPONENTES DO FRAMEWORK LEAN 4.0 ESG

4.1 Arquitetura Sistêmica: a integração tripartite

O *framework* proposto fundamenta-se em uma estrutura de três camadas interdependentes. A primeira camada, denominada Camada Habilitadora (Tecnológica), utiliza conceitos da Quarta Revolução Industrial para eliminar a subjetividade na coleta de indicadores. A segunda camada, a Camada Operacional (*Lean*), que utiliza ferramentas desta filosofia para otimizar fluxos. Por fim, a Camada de Valor (ESG) traduz a eficiência em resultados socioambientais e transparência de governança. Segundo Ghobakhloo *et al.*, (2022), a integração digital é o que permite que o *Lean* deixe de ser apenas menos desperdício para se tornar impacto positivo.

Esta arquitetura pretende demonstrar que a eficiência isolada em uma camada é insuficiente para a resiliência corporativa, uma vez que a integração crítica revela que a tecnologia atua como sistema nervoso da organização, dando precisão para que os princípios *Lean* se baseiem em dados concretos, não em suposições. Assim, o *framework* supera a visão tradicional ao demonstrar que a competitividade vem não só da redução de custos, mas da capacidade de converter dados em ações sustentáveis e rastreáveis.

Para que essa arquitetura sistêmica funcione plenamente, é necessário observar como cada pilar age nos processos organizacionais. O primeiro impacto direto dessa integração ocorre no monitoramento e na redução

do impacto ecológico, onde a precisão digital da camada tecnológica potencializa as ferramentas de diagnóstico ambiental.

4.2 Otimização ambiental via lean-digitalizado

A integração do pilar ambiental se dá pela simbiose entre o Mapeamento do Fluxo de Valor (VSM) e sensores inteligentes. No *Framework Lean 4.0 ESG*, o VSM é dinâmico, haja vista que o uso de Gêmeos Digitais permite monitorar em tempo real o consumo de energia e a produção de resíduos. Essa abordagem faz com que a eliminação de desperdícios do *Lean* alcance o nível de emissão zero. Conforme Morato e Ferreira (2024), a digitalização do VSM revela ineficiências ocultas que o mapeamento manual não detecta, alinhando a produtividade às metas de sustentabilidade.

Ao analisar os conceitos de *Green VSM* digital, observa-se que a tecnologia não apenas acelera o diagnóstico, mas transforma a intervenção ambiental. Simulações em tempo real permitem antecipar gargalos de recursos hídricos ou picos de consumo energético antes mesmo que ocorram. Dessa forma, a otimização ambiental deixa de ser uma medida reativa para se tornar intrínseca ao design do processo produtivo, assegurando conformidade ambiental de forma preventiva e inteligente.

No entanto, a eficiência ambiental não pode ser dissociada do bem-estar humano dentro da operação. Uma produção ecologicamente correta deve ser, simultaneamente, um ambiente que promova o desenvolvimento e a segurança de seus colaboradores, ponto em que o *framework* integra a dimensão humana através da ergonomia digital.

4.3 O pilar social e a Ergonomia 4.0

No aspecto Social, o *framework* redefine o princípio do respeito às pessoas, tendo em vista que a integração de *Cobots* e sistemas de gestão visual em tempo real reduz a carga física e cognitiva do trabalhador. Desta forma a lógica é didática, já que o *Lean* padroniza tarefas para evitar erros, enquanto a Indústria 4.0 adapta o posto de trabalho às necessidades biomecânicas do operador. Para Neumann *et al.*, (2021), essa Ergonomia 4.0 materializa o pilar Social do ESG nas operações, transformando a segurança

do trabalho em um ativo estratégico para reter talentos e cumprir a responsabilidade corporativa.

Analisando brevemente, a tecnologia surge como um nivelador de competências e um vetor de inclusão, à medida que reduz a penosidade do trabalho e oferece interfaces assistivas, o *Lean 4.0 ESG* permite que uma força de trabalho diversa e multigerencial opere com alta performance. Isso fortalece o pilar social não apenas pela segurança, mas pelo engajamento e pela redução da rotatividade, criando uma cultura de pertencimento que valoriza a inteligência humana potencializada pela tecnologia.

Todavia, para que o impacto social e ambiental seja legitimado perante o mercado e os reguladores, é imperativo que existam mecanismos que comprovem a veracidade das ações. É neste ponto que a transparência de dados se torna o alicerce para uma governança corporativa moderna e inquestionável.

4.4 Governança de dados e responsabilidade operacional

A Governança (G) é fortalecida pela imutabilidade e transparência dos dados. No modelo proposto, o uso de tecnologia de registros seguros (*Blockchain*), integrada aos sistemas de gestão empresarial e de execução da produção, garante que os indicadores de sustentabilidade sejam rastreáveis e resistentes a manipulações. Isso soluciona um dos principais obstáculos da dificuldade de medir e reportar resultados. Segundo Rosin *et al.*, (2020), uma governança robusta em ambientes empresariais modernos depende da capacidade de auditar processos em tempo real, transformando a disciplina *Lean* em um mecanismo de conformidade regulatória automática.

A análise descritiva desse pilar indica que a governança digitalizada atua como o escudo reputacional da empresa. Ao automatizar o fluxo de informações das operações para os relatórios de sustentabilidade, o *framework* elimina o risco de erros de preenchimento e distorções intencionais. Essa automação ética, fortalece a confiança entre a organização e seus investidores, transformando a conformidade em um processo contínuo e não mais em um evento anual de auditoria, garantindo a integridade estratégica da operação.

Essa estrutura de governança fornece a base de dados confiável que alimenta o cérebro do sistema. Com dados íntegros e auditáveis, a organização atinge o estágio de sinergia estratégica, onde a inteligência artificial pode atuar de forma autônoma para equilibrar os objetivos de lucro e propósito.

4.5 Sinergia estratégica e tomada de decisão

A lógica do *Framework Lean 4.0 ESG* culmina em um ciclo de melhoria contínua sustentável, uma vez que a inteligência artificial analisa os dados coletados (4.0) para sugerir melhorias no fluxo (*Lean*) que maximizem o retorno social e ambiental (ESG). Este modelo favorece uma tomada de decisão orientada por evidências, permitindo que gestores avaliem o equilíbrio entre rapidez na produção e uso de recursos. Como argumentam Duarte e Cruz-Machado (2017), visão holística que integra diferentes conceitos é o que diferencia empresas resilientes de empresas meramente eficientes no cenário competitivo atual.

Esta sinergia teórica representa uma transformação no papel do gestor, que deixa de atuar apenas como solucionador de questões operacionais para assumir a função de estrategista voltado ao valor compartilhado. A lógica pedagógica do modelo evidencia que o êxito de uma decisão não se limita mais ao seu efeito sobre o resultado financeiro, mas passa a ser avaliado também pela sua contribuição aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A inteligência analítica permite que a complexidade das variáveis ESG seja traduzida em decisões simples e executáveis, democratizando o acesso à sustentabilidade em todos os níveis da hierarquia.

Apesar dos benefícios evidentes dessa harmonia estratégica, a transição do modelo tradicional para o *Lean 4.0 ESG* exige o enfrentamento de desafios práticos significativos, haja vista que a compreensão dessas barreiras é vital para que a proposta não permaneça apenas no campo teórico, mas encontre viabilidade empírica.

4.6 Aplicabilidade e barreiras à implementação

Para que o *framework* seja aplicável, é necessária uma mudança na cultura organizacional, migrando de silos departamentais para uma gestão

integrada. A descrição do modelo prevê que a implementação comece pela infraestrutura de dados (Tecnologia), seguida pelo redesenho de processos (*Lean*) e, finalmente, pela certificação e reporte (ESG). Barreiras, como o alto custo inicial e a necessidade de requalificação da mão de obra, devem ser tratadas como investimentos em ativos intangíveis que garantem a perenidade da organização frente às exigências do mercado global (Gillan; Koch; Starks, 2021).

O aprofundamento sobre estas barreiras revela que o principal obstáculo não é a tecnologia em si, mas a resistência à mudança e a lacuna de competências digitais. O *framework* sugere que a educação corporativa deve ser o eixo central da implementação, preparando os colaboradores para interagir com sistemas ciber-físicos enquanto mantêm o foco na redução de desperdícios sustentáveis. Portanto, a aplicabilidade do modelo depende de uma liderança comprometida com a visão de longo prazo, que reconheça a sustentabilidade como um vetor de inovação e não como um custo acessório.

Portanto, a jornada rumo ao *Lean 4.0 ESG* representa uma reconfiguração profunda da identidade empresarial, definindo parâmetros primordiais para o desenvolvimento da identidade visual do *framework* proposto por este estudo. Ao consolidar as lições aprendidas e as perspectivas futuras, podemos vislumbrar o real impacto transformador dessa integração para a sociedade e o mercado.

4.7 Framework Lean ESG 4.0

A força do *Framework Lean 4.0 ESG*, está em sua interdependência sistêmica, uma vez que a fragilidade de um componente compromete todo o modelo. Não se trata de uma simples soma de metodologias, mas de uma simbiose operacional. Se a base tecnológica da Indústria 4.0 falha, a Governança (G) perde seus dados confiáveis, tornando transparência e auditoria vulneráveis. Sem dados precisos em tempo real, os mecanismos de conformidade perdem eficácia, reduzindo a governança a uma estrutura burocrática e sem inteligência analítica.

Da mesma forma, o sucesso do modelo é indissociável do capital humano, motor central da filosofia *Lean*. Se o pilar humano falha, seja por

falta de engajamento, treinamento deficiente ou ausência de autonomia, o Pilar Social (S) desmorona, pois a sustentabilidade social depende da valorização e do respeito aos colaboradores no cotidiano. Esta visão holística e integrada do *Framework Lean ESG 4.0*, proposto na Figura 1, estabelece uma abordagem robusta aos desafios de operacionalizar a sustentabilidade em ambientes corporativos complexos e digitalizados.

Figura 1: *Framework Integrado Lean 4.0 ESG*



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Teto (Valor e Propósito ESG): O cume do templo representa o objetivo final: a geração de Valor Compartilhado. Aqui, as diretrizes de Meio Ambiente (E), Social (S) e Governança (G) definem a missão da empresa. O teto protege a organização contra riscos reputacionais e regulatórios, garantindo a sua longevidade no mercado global.

O Pilar Esquerdo (Eficiência Operacional *Lean 4.0*): Este pilar foca no fluxo e na eliminação de desperdícios. Ele utiliza ferramentas como o VSM Digital para visualização de gargalos em tempo real e metodologias como o *Just in Time* para sincronizar a produção com o consumo real de recursos,

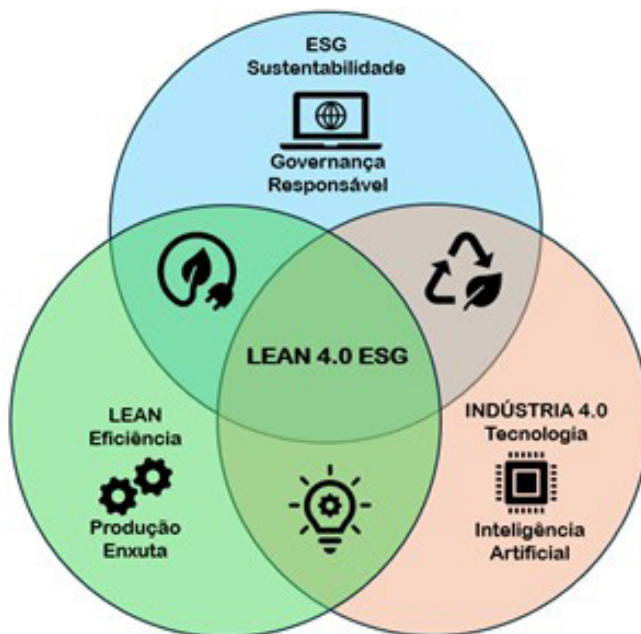
garantindo que a eficiência operacional contribua diretamente para a redução do impacto ambiental.

O Pilar Direito (Desenvolvimento Humano Social): Representa o pilar Social do ESG, focado no Respeito às Pessoas e na Ergonomia Digital. Ele utiliza tecnologias como a Robótica Colaborativa e Realidade Aumentada para garantir a segurança do colaborador e aumentar seu engajamento, transformando as operações em um ambiente de aprendizado e bem-estar.

O Núcleo Central (Melhoria Contínua Inteligente): No centro do templo, ferramentas de melhoria contínua são potencializadas pela Inteligência Artificial. A IA analisa os dados dos pilares para sugerir ciclos de melhorias contínuas, garantindo que o sistema aprenda com as falhas e evolua constantemente rumo à máxima sustentabilidade.

A Fundação (Infraestrutura Tecnológica – Indústria 4.0): A base que sustenta todo o templo é composta por IoT, *Big Data* e Conectividade. Sem esta fundação, os pilares seriam frágeis e o teto (ESG) seria apenas *greenwashing*, desta forma, a fundação garante a integridade dos dados e a transparência necessária para a Governança.

Com base nestes conceitos é possível traçar um diagrama que ilustra a intersecção e nos benefícios híbridos, demonstrando que o *Lean 4.0 ESG* não é apenas a soma das partes, mas o resultado de suas convergências, haja vista que o modelo representado na Figura 2, ilustra como as três esferas de conhecimento se sobrepõem, criando zonas de valor específicas que culminam no *framework* central.

Figura 2 – Diagrama de Convergência *Lean 4.0 ESG*

Fonte: Elaborado pelo autor.

A esfera ESG (Sustentabilidade), representa a incorporação sistemática das dimensões ambiental, social e de governança, orientando as decisões organizacionais para a geração de impacto positivo, responsabilidade corporativa e conduta ética. A esfera *Lean* (Eficiência), enfatiza a eliminação de desperdícios, a otimização do fluxo de valor e a maximização do desempenho operacional. Já a esfera da Indústria 4.0 (Tecnologia), está centrada na conectividade, no uso intensivo de dados e na automação avançada, viabilizando sistemas produtivos inteligentes e integrados.

As intersecções entre esses conceitos revelam zonas estratégicas de convergência, como: *Lean* + Indústria 4.0 (Manufatura Inteligente), que representa a digitalização da eficiência, na qual práticas consagradas de melhoria contínua, são potencializadas por tecnologias como inteligência artificial e análise avançada de dados, permitindo ciclos decisórios mais rápidos, precisos e adaptativos. No caso do *Lean* + ESG (*Green Lean*), expressa o conceito de produção limpa, no qual a eliminação de desperdícios

se traduz diretamente em menor consumo de recursos naturais, redução de emissões e maior eficiência ambiental, conciliando desempenho econômico e sustentabilidade. E Indústria 4.0 + ESG (Transparência Digital) configura o espaço da responsabilidade organizacional, onde tecnologias como Internet das Coisas e *Blockchain* possibilitam rastreabilidade, verificação e confiabilidade dos indicadores de sustentabilidade, mitigando práticas de *greenwashing* por meio de dados objetivos e auditáveis.

Notadamente, o centro do modelo *Lean* 4.0 ESG representa a sinergia total entre eficiência operacional, inteligência digital e responsabilidade socioambiental. É o estado de maturidade em que a tecnologia serve ao propósito da organização, a eficiência gera valor compartilhado e a governança é orientada por dados confiáveis. A ausência de qualquer pilar fragiliza a estrutura: sem o *Lean*, a Indústria 4.0 pode automatizar ineficiências; sem o ESG, os ganhos de produtividade podem se tornar predatórios; e sem a Indústria 4.0, as práticas de ESG perdem métricas robustas e escaláveis para garantir transparência e impacto real.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 A quebra do paradigma entre produtividade e sustentabilidade

A análise do *Framework Lean* ESG 4.0 demonstra que a aparente contradição entre eficiência e sustentabilidade é superada pela integração tecnológica. Embora estudos tradicionais sugiram que práticas ambientais elevem custos a curto prazo, os resultados desta proposta confirmam a visão de Tan Ching *et al.*, (2022), demonstrando que a inteligência de dados da Indústria 4.0 transforma a sustentabilidade em uma fonte de economia. Identificar o desperdício invisível como energia de máquinas em espera ou perdas em processos por meio de sensores IoT, converte o pilar Ambiental (E) em um vetor de redução de custos, validando que a produção enxuta digital é, por natureza, uma produção verde.

Além disso, a discussão em torno do *Green* VSM digital sugere que a transparência em tempo real altera o comportamento gerencial. Ao contrário dos relatórios de sustentabilidade anuais, que são reativos, o *framework* proposto permite uma gestão proativa. Quando o gestor visualiza nos

indicadores que o fluxo de valor está excedendo o planejado para aquele lote, a intervenção é imediata.

A capacidade de atender e superar exigências ambientais de forma ágil e integrada às operações centrais torna-se uma fonte distinta de criação de valor, atraindo mercados, investidores e talentos, e consolidando uma vantagem competitiva de difícil replicação (Yadav *et al.*, 2020; Bocken *et al.*, 2020).

5.2 O fator humano e a responsabilidade social em processos inteligentes

No que tange o pilar Social (S), a Indústria 4.0 surge não como substituta da mão de obra, mas como potencializadora do trabalho humano. A implementação da Ergonomia 4.0 e dos *Cobots*, aliada ao princípio *Lean* de respeito às pessoas, responde diretamente à demanda por melhores condições de trabalho. Conforme Neumann *et al.*, (2021), a tecnologia reduz a penosidade, liberando os trabalhadores para focarem em solução de problemas e melhoria contínua. Isso cria um ciclo virtuoso, onde o colaborador sente-se mais seguro e valorizado, o que reduz a rotatividade e eleva o capital intelectual da empresa, fortalecendo sua sustentabilidade social interna.

Essa dimensão social se amplia para a transparência ética, tendo em vista que o *framework* propõe que a automação de métricas sociais, como horas de treinamento, diversidade e índices de acidentes, impede a manipulação de dados. Em um mercado que penaliza crises éticas, a governança operacional do *Lean 4.0 ESG* atua como um seguro reputacional. A discussão aqui ressalta que o S do ESG garante a licença social para operar, e sua integração com a Indústria 4.0 fornece as evidências quantitativas que comprovam esse compromisso perante a sociedade.

5.3 Governança digital e a mitigação do *Greenwashing*

Um dos pontos mais críticos discutidos na literatura recente é o risco de *greenwashing*, que é a prática de divulgar informações ambientais enganosas. O *framework* descrito ataca este problema na raiz, ao integrar a

Governança (G) diretamente aos sistemas ciber-físicos, ao utilizar tecnologias como *Blockchain* para registrar emissões e descartes, criando uma trilha de auditoria imutável. Assim, a governança corporativa efetiva no contexto ESG deixa de ser uma atividade restrita ao escritório executivo, agindo como um sistema verificável e gerado em tempo real. A análise dos resultados indica que o futuro da conformidade e da construção de confiança reside no conceito de Responsabilidade Digital ou Prestação de Contas Digital.

Este paradigma é caracterizado pela rastreabilidade automática, imutabilidade dos registros e transparência radical de dados operacionais e ambientais, possibilitada pela convergência de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), *Blockchain* e *Big Data Analytics* (Kouhizadeh *et al.*, 2020). Neste modelo, a confiança do mercado, dos investidores e dos *stakeholders* não é apenas declarada, mas conquistada e comprovada pela impossibilidade técnica de falsificação ou manipulação dos indicadores críticos de desempenho ESG. A governança, portanto, torna-se um resultado auditável do sistema operacional, e não uma mera declaração de intenções (Kshetri, 2021).

Resumidamente, a discussão enfatiza que o sucesso do *Lean 4.0 ESG* depende de uma visão sistêmica e que barreiras à implementação, são predominantemente culturais e não tecnológicas. A transição para este modelo exige que a governança corporativa promova desdobramento de estratégias de forma que todos os envolvidos entendam como sua eficiência individual impacta as metas gerais integradas deste *framework*. Assim, a integração proposta não apenas otimiza as operações, mas reconfigura a cultura organizacional para uma era de transparência radical e propósito inegociável.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa propôs o *Framework Lean 4.0 ESG*, articulando de forma sistêmica os princípios da manufatura enxuta, as capacidades digitais da Indústria 4.0 e as diretrizes da sustentabilidade corporativa. Os resultados demonstram que a convergência dessas dimensões transcende a otimização operacional, transformando a sustentabilidade em uma variável mensurável, rastreável e auditável, consolidando-a como um fator estratégico decisivo para a competitividade contemporânea.

Por meio do Diagrama de Convergência apresentado, evidenciou-se que a tecnologia digital atua como o elo que integra a disciplina operacional do *Lean* às demandas amplas do ESG. Essa integração permite que a sustentabilidade deixe de ser um relatório estático e se torne uma dinâmica organizacional contínua e embasada em dados. Gerencialmente, o *framework* oferece um roteiro para investimentos em digitalização com foco em valor compartilhado, reduzindo riscos de governança e ampliando o engajamento social e ambiental.

Reconhece-se, contudo, que o estudo possui limitações inerentes à sua natureza exploratória e qualitativa, baseada em revisão sistemática, haja vista que o *framework* proposto carece de validação empírica em contextos organizacionais reais, e barreiras como custos tecnológicos e resistência cultural variam conforme o porte e a maturidade digital de cada empresa e sobretudo que esses fatores devem ser considerados em futuras aplicações.

Para pesquisas subsequentes, recomenda-se a aplicação prática do modelo em setores diversos, a fim de mensurar variações reais em indicadores de sustentabilidade antes e após a implementação. Adicionalmente, é pertinente investigar seu impacto em cadeias de suprimentos globais, explorando como a transparência digital pode fortalecer a governança entre elos da cadeia e elevar a confiança de investidores e consumidores.

Além da eficiência operacional, inovação tecnológica e respeito a sustentabilidade, o *Lean 4.0* ESG revela-se um mecanismo de resiliência organizacional, uma vez que ao combinar agilidade enxuta com inteligência de dados em ações de ESG, as empresas podem antecipar rupturas na cadeia de suprimentos e oscilações regulatórias, mantendo viabilidade financeira sem renunciar a compromissos socioambientais, mesmo sob pressão de mercado.

Por fim, conclui-se que a efetividade do *framework* depende menos da sofisticação tecnológica e mais da integridade ética e da liderança comprometida com seu propósito. A tecnologia deve ser um meio para potencializar valores humanos e sustentáveis, não um fim em si mesma. A jornada rumo a organizações do futuro exige, portanto, que a sustentabilidade seja encarada não como mera conformidade, mas como base indispensável para a inovação perene e para uma sociedade industrial mais justa, limpa e inclusiva.

REFERÊNCIAS

- BAI, C.; DALLASEGA, P.; ORZES, G.; SARKIS, J. Industry 4.0 technologies assessment: a sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, Amsterdam, v. 229, p. 107776, 2020.
- BILLIO, M.; COSTOLA, M.; HRISTOVA, I.; LATINO, C.; PELIZZON L. Inside the ESG ratings: (Dis)agreement and performance. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, London, v. 28, n. 5, p. 1426–45, 2021.
- BOCKEN, N. M. P.; GERADTS, T. H. J. Barriers and drivers to sustainable business model innovation: organization design and dynamic capabilities. *Long Range Planning*, Amsterdam, v. 53, n. 4, p. 101950, 2020.
- BUER, S.; STRANDHAGEN, J. O.; CHAN, F. T. S. The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda. *International Journal of Production Research*, Oxfordshire, v. 56, n. 8, p. 2924–40, 2018.
- CĂȘĂNEANU (DASCĂLU), N.-M.; PÎSLARU, M. A sustainable framework manufacturing in a digital era based on Lean Six Sigma and Industry 4.0. *Annals of the Academy of Romanian Scientists: Series on Engineering Sciences*, București, v. 16, n. 2, p. 31–40, 2024.
- CHERRAFI, A.; ELFEZAZI, S.; CHIARINI, A.; MOKHLIS, A.; BENHIDA, K. The integration of lean manufacturing, Six Sigma and sustainability: a literature review and future research directions for developing a specific model. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 139, p. 828–46, 2017.
- CHRISTENSEN, H. B.; HAIL, L.; LEUZ, Christian. *Adoption of CSR and sustainability reporting standards: economic analysis and review*. Cambridge, MA, USA: National Bureau of Economic Research, 2019.
- CLEMENTINO, E.; PERKINS, R. How Do Companies Respond to Environmental, Social and Governance (ESG) ratings? Evidence from Italy. *Journal of Business Ethics*, Amsterdam, v. 171, n. 2, p. 379–97, 2021.
- DIGALWAR, A.; MUNDRA, N.; TAGALPALLEWAR, A.; SUNNAPWAR, V. Road map for the implementation of green manufacturing practices in Indian manufacturing industries: an ISM approach. *Benchmarking: An International Journal*, Leeds, v. 24, n. 5, p. 1386–99, 2017.

DJATNA, T.; PRASETYO, D. Integration of sustainable value stream mapping (Sus. VSM) and life-cycle assessment (LCA) to improve sustainability performance. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, Yogyakarta, v. 9, n. 4, p. 1337–43, 2019.

DUARTE, S.; CRUZ-MACHADO, V. An investigation of lean and green supply chain in the Industry 4.0. In: © IEOM Society International. *Proceedings of the 2017 International Symposium on Industrial Engineering and Operations Management* (IEOM), p. 24–25, 2017.

GEISSDOERFER, M.; VLADIMIROVA, D.; EVANS, S. Sustainable business model innovation: a review. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam, v. 198, p. 401–16, 2018.

GHOBAKHLOO, M.; IRANMANESH, M.; MUBARAK, M. F.; MUBARIK, M.; REJEB, A.; NIKDIN, A. Identifying industry 5.0 contributions to sustainable development: A strategy roadmap for delivering sustainability values. *Sustainable Production and Consumption*, Amsterdam, v. 33, p. 716–37, 2022.

GILLAN, S. L.; KOCH, A.; STARKS, L. T. Firms and social responsibility: a review of ESG and CSR research in corporate finance. *Journal of Corporate Finance*, Amsterdam, v. 66, p. 101889, 2021.

JAVOID, M.; HALEEM, A.; Singh, R. P.; SUMAN, R.; GONZÁLEZ, E. S. Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. *Sustainable operations and computers*, Beijing, v. 3, p. 203–17, 2022.

KAMBLE, S.; GUNASEKARAN, A.; DHONE, N. C. Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organizational performance in Indian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, Oxfordshire, v. 58, n. 5, p. 1319–37, 2020.

KOUHIZADEH, M.; ZHU, Q.; SARKIS, J. Blockchain and the circular economy: potential tensions and critical reflections from practice. *Production Planning & Control*, London, v. 31, n. 11–12, p. 950–66, 2020.

KSHETRI, N. Blockchain and sustainable supply chain management in developing countries. *International Journal of Information Management*, London, v. 60, p. 102376, 2021.

LENG, J.; CHEN, Z.; SHA, W.; LIN, Z.; LIN, J.; LIU, Q. Digital twins-based flexible

operating of open architecture production line for individualized manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*, Oxfordshire, v. 53, p. 101676, 2022.

MORATO, M. L. S.; FERREIRA, K. A. Value stream mapping application for construction industry loss and waste reduction: a systematic literature review. *International Journal of Lean Six Sigma*, Leeds, v. 15, n. 4, p. 817–37, 2024.

NEUMANN, W. P.; WINKELHAUS, S.; GROSSE, E. H.; GLOCK, C. H. Industry 4.0 and the human factor – a systems framework and analysis methodology for successful development. *International Journal of Production Economics*, Amsterdam, v. 233, p. 107992, 2021.

PAGE, M. J. MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D.; SHAMSEER, L.; TETZLAFF, J. M.; MOHER, D. Updating guidance for reporting systematic reviews: development of the PRISMA 2020 statement. *Journal of clinical epidemiology*, London, v. 134, p. 103–12, 2021.

PEDERSEN, L. H.; FITZGIBBONS, S.; POMORSKI, L. Responsible investing: The ESG-efficient frontier. *Journal of Financial Economics*, Amsterdam, v. 142, n. 2, p. 572–97, 2021.

PIERLI, G.; MURMURA, F.; BRAVI, L. The impact of lean tools on sustainability dimensions: a systematic literature review. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Bingley, v. 43, n. 2, p. 373–405, 2026.

ROSIN, F.; ESQUECE, P.; LAMOURI, S.; PELLERIN R. Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. *International Journal of Production Research*, Oxfordshire, v. 58, n. 6, p. 1644–61, 2020.

SANDERS, A.; ELANGESWARAN, C.; WULFSBERG, J. Industry 4.0 implies lean manufacturing: research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management*, Barcelona, v. 9, p. 811–33, 2016.

SNYDER, H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, Amsterdam, v. 104, p. 333–9, 2019.

TAN CHING, N. G.; LAU, S. Y.; GHOBAKHLOO, M.; FATHI, M.; LIANG, M. S. The application of industry 4.0 technological constituents for sustainable manufacturing: a content-centric review. *Sustainability*, Basel, v. 14, n. 7, p. 4327, 2022.

YADAV, G. KUMAR, A.; LUTHRA, S.; GARZA-REYES, J. A.; KUMAR, V.; BATISTA L. A framework to achieve sustainability in manufacturing organisations of developing economies using industry 4.0 technologies' enablers. *Computers in Industry*, Amsterdam, v. 122, p. 103280, 2020.