



SUSTENTABILIDADE E MANUFATURA ENXUTA: REVISÃO SISTEMÁTICA E MODELO CONCEITUAL

Sustainability and lean manufacturing: systematic literature review and conceptual framework

Sostenibilidad y manufactura esbelta: revisión sistemática de la literatura y modelo conceptual

Rafaela Bomfim Rodrigues¹, Paulo Henrique Amorim Santos^{2*}, & José da Silva Ferreira Junior³

¹³ Universidade do Estado de Minas Gerais ² Universidade Federal do Paraná

¹rafaela.2149732@discente.uemg.br ^{2*}phas@ufpr.br ³jose.junior@uemg.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 19.05.2026

Aprovado: 15.07.2026

Disponibilizado: 16.09.2026

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura enxuta, Sustentabilidade, Revisão Sistemática da Literatura, Melhoria Contínua

KEYWORDS: Lean Manufacturing, Sustainability, Systematic Literature Review, Continuous Improvement

PALABRAS CLAVE: Manufactura esbelta, Sostenibilidad, Revisión Sistemática de la Literatura, Mejora continua

*Autor Correspondente: Santos, P. H. A.

RESUMO

A crescente busca por competitividade, eficiência operacional e responsabilidade socioambiental tem levado as organizações a integrarem práticas de manufatura enxuta e sustentabilidade. Nesse contexto, a manufatura enxuta destaca-se pela eliminação de desperdícios, melhoria contínua e aumento da produtividade. O presente estudo tem como objetivo construir um modelo conceitual que explicita os principais construtos da manufatura enxuta e da sustentabilidade, explorando suas relações. Para isso, realizou-se um mapeamento científico da literatura por meio de bibliometria descritiva e análise de redes sociais, permitindo identificar temas, tendências e produtores de conhecimento no campo. Em sequência, por meio de revisão sistemática, foi desenvolvida uma proposta de modelo conceitual. Os resultados evidenciaram três clusters temáticos principais: mapeamento de processos, manufatura enxuta e Indústria 4.0. A inter-relação entre elementos destes clusters pode potencializar práticas sustentáveis e apoiar a melhoria contínua nas organizações industriais. Assim, o mapeamento de processos contribuiu para a identificação de desperdícios e oportunidades de melhoria: a manufatura enxuta promove eficiência operacional e redução de custos; e a Indústria 4.0 amplia a integração tecnológica e a sustentabilidade das operações.

ABSTRACT

The growing pursuit of competitiveness, operational efficiency, and socio-environmental responsibility has led organizations to integrate lean manufacturing and sustainability practices. In this context, lean manufacturing stands out through waste elimination, continuous improvement, and productivity enhancement. This study aims to develop a conceptual model that clarifies the main

constructs of lean manufacturing and sustainability, exploring their relationships. To achieve this, a scientific mapping of the literature was conducted through descriptive bibliometrics and social network analysis, enabling the identification of themes, trends, and knowledge producers in the field. Subsequently, through a systematic literature review, a conceptual model was proposed. The results revealed three main thematic clusters: process mapping, lean manufacturing, and Industry 4.0. The interrelationship among the elements of these clusters may enhance sustainable practices and support continuous improvement in industrial organizations. Therefore, process mapping contributes to the identification of waste and improvement opportunities: lean manufacturing promotes operational efficiency and cost reduction; and Industry 4.0 expands technological integration and the sustainability of operations.

RESUMEN

La creciente búsqueda de competitividad, eficiencia operativa y responsabilidad socioambiental ha llevado a las organizaciones a integrar prácticas de manufactura esbelta y sostenibilidad. En este contexto, la manufactura esbelta se destaca por la eliminación de desperdicios, la mejora continua y el aumento de la productividad. El presente estudio tiene como objetivo construir un modelo conceptual que explicita los principales construtos de la manufactura esbelta y la sostenibilidad, explorando sus relaciones. Para ello, se realizó un mapeo científico de la literatura mediante bibliometría descriptiva y análisis de redes sociales, permitiendo identificar temas, tendencias y productores de conocimiento en el campo. Posteriormente, a través de una revisión sistemática de la literatura, se presenta el desarrollo del modelo conceptual propuesto. Los resultados evidenciaron tres clusters temáticos principales: mapeo de procesos, manufactura esbelta e Industria 4.0. La interrelación entre los elementos de estos clusters puede potenciar prácticas sostenibles y apoyar la mejora continua en las organizaciones industriales. Así, el mapeo de procesos contribuye a la identificación de desperdicios y oportunidades de mejora: la manufactura esbelta promueve la eficiencia operativa y la reducción de costos; y la Industria 4.0 amplía la integración tecnológica y la sostenibilidad de las operaciones.

INTRODUÇÃO

Após a Segunda Guerra Mundial, o Japão passou por um período de reconstrução e transformação econômica que ficou conhecido como o “milagre econômico japonês”, no qual o país conseguiu se recuperar rapidamente dos estragos da guerra e se tornou uma potência industrial e tecnológica global (Womack & Jones, 2015; Fukuda et al., 2018). Um dos exemplos

dessa recuperação, e que viria a mudar o paradigma de produção, foi o caso da empresa Toyota.

A Toyota, empresa multinacional japonesa de automóveis fundada em 1937, enfrentava o reflexo da competitividade com as grandes empresas automotivas americanas que tinham acesso a mais recursos e uma produção em massa altamente eficiente (Liker, 2021). Para enfrentar esse desafio, a equipe desenvolveu uma abordagem de produção focada na eliminação de desperdícios e na melhoria contínua, popularizada como *Lean Manufacturing*, ou manufatura enxuta. O sistema de produção originado é amplamente adotado por diversas outras empresas e tem como foco eliminar desperdícios, maximizar a produtividade, promover automação e aumentar a entrega de valor aos clientes (Yang et al., 2011).

De acordo com Elkington (2006), o avanço do entendimento sobre a sustentabilidade emerge como fundamento para o sucesso e a relevância de qualquer organização. Trata-se de uma atualização dos modelos de gestão empresarial tradicionais de forma a satisfazer as necessidades humanas e melhorar a qualidade de vida, ao mesmo tempo que reduz progressivamente os impactos ecológicos e a intensidade dos recursos ao longo do seu ciclo de vida, mantendo o equilíbrio do planeta (Savitz & Weber, 2014; Cherrafi et al., 2016). Direcionar esforços para esses três pilares não apenas melhora a eficiência interna, mas também proporciona uma série de vantagens que impactam positivamente a empresa e o meio ambiente. Segundo Yang et al. (2011), a prática convergente desses três temas pode influenciar positivamente a gestão ambiental das empresas, resultando em melhorias no desempenho ambiental e, conseqüentemente, no desempenho de mercado e financeiro.

De acordo com Santos e Lizarelli (2023) e Yang et al. (2011), organizações que adotam a manufatura enxuta podem incorporar tanto o pensamento sustentável quanto a redução de resíduos para que tenham benefícios na avaliação, gestão, coordenação e monitoramento das atividades ambientais, além de melhoria na logística, minimização de impactos sociais e ambientais, entre outros. Ao integrar as práticas da manufatura enxuta com a sustentabilidade, desenvolvem-se estratégias sustentáveis que consideram impactos ao longo de toda a cadeia de valor (Faulkner & Badurdeen, 2014; Womack & Jones, 2015).

A conexão entre manufatura enxuta e sustentabilidade inclui redução de desperdícios, eficiência energética, qualidade e durabilidade, bem como o desenvolvimento dos funcionários e da cadeia de suprimentos sustentável. A aplicação desse método em estudos de caso demonstrou diferentes níveis de sustentabilidade dos processos de manufatura, permitindo o desenvolvimento de cenários aprimorados pela melhoria contínua (Helleno & Moraes, 2017).

Como exemplo dessa convergência, Helleno e Moraes (2017) discutem a necessidade de integrar um novo grupo de indicadores de sustentabilidade às ferramentas e técnicas de manufatura enxuta, e o mapa de fluxo de valor (*Value Stream Mapping* - VSM) se destaca como um dos mais importantes nesse processo de avaliação. Em outro exemplo, Faulkner e Badurdeen (2020) propõem a extensão do mapeamento do fluxo de valor, ferramenta da manufatura enxuta, a fim de incluir impactos ambientais e sociais: o *Sustainable Value Stream Mapping* (Sus-VSM). Essa nova abordagem permite avaliar a sustentabilidade na manufatura, considerando aspectos como eficiência energética, uso de recursos naturais, impactos

ambientais, segurança dos funcionários, responsabilidade social e viabilidade econômica. Taddeo et al. (2019) também relacionam as práticas de manufatura enxuta, que podem ser utilizadas como catalisadoras para tornar as cadeias de suprimentos mais sustentáveis, reduzindo o fluxo de insumos e componentes para gerar a redução na extração, produção, embalagem, manuseio e transporte de materiais. Já Brito et al. (2023) elaboraram um questionário para avaliar as práticas de sustentabilidade em diversas empresas de Pernambuco em conjunto com os benefícios percebidos pelos respondentes.

Contudo, apesar de os trabalhos citados abordarem definições fundamentais, ainda é observado na literatura baixa adesão desses conceitos. O estudo sobre o campo de pesquisa que associa a manufatura enxuta à sustentabilidade ainda apresenta limitações, especialmente quanto à compreensão integrada das práticas enxutas e do desempenho sustentável (Faulkner & Badurdeen, 2020). Nesse contexto, o objetivo deste estudo é construir um modelo conceitual que explicita os principais construtos da manufatura enxuta e da sustentabilidade, explorando suas relações. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, utilizando bibliometria descritiva e análise de redes sociais, como técnicas de tratamento dos dados bibliográficos. Esta pesquisa buscou compreender os principais temas, tendências e produtores de conhecimento relacionados ao tema. Para direcionar o estudo, foram propostas três perguntas, seguindo o modelo de Lopes-Robles et al. (2019):

1. Como as pesquisas sobre a relação entre manufatura enxuta e sustentabilidade têm se desenvolvido?
2. Quais são os principais temas e tendências relacionados ao tema?
3. Quem são os principais produtores de conhecimento neste campo de pesquisa?

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

MANUFATURA ENXUTA

A origem da manufatura enxuta remete a 1948. Reichhart e Holweg (2007) relatam que Taiichi Ohno começou a implementar conceitos de produção em lotes pequenos na Toyota com o propósito de reduzir custos e eliminar desperdícios. Essa iniciativa foi inspirada em sua observação do funcionamento de um tear automático, mecanismo que parava quando o fio quebrava, com o objetivo de não desperdiçar material ou tempo da máquina. Desde então, o *Lean Production* tem sido amplamente adotado no mundo inteiro.

Conforme Liker (2021) e Yoshino (2008), a manufatura enxuta pode ser composta por um conjunto de técnicas e ferramentas (Tabela 1). Abdulmalek e Rajgopal (2007) destacaram que essa manufatura é mais comumente aplicada na produção discreta do que no setor contínuo/processo, devido às suas especificidades. Segundo os mesmos autores, essas ferramentas, que compõem a técnica, podem ser adaptadas para o setor de processos, resultando na eliminação de desperdícios e melhoria da eficiência operacional.

Tabela 1. Ferramentas/Técnicas da Manufatura Enxuta

Ferramenta/ Técnica	Descrição
5S	Método de gestão de qualidade que promove a organização e a limpeza no ambiente de trabalho para melhorar a eficiência e a segurança
Kaizen	Melhoria contínua através de pequenas mudanças incrementais com envolvimento de todos os níveis da organização
Kanban	Sistema de cartões que controla o fluxo de produção e estoques, sinalizando a necessidade de reposição de materiais
Just-In-Time (JIT)	Produzir somente o que é necessário, no momento necessário, reduzindo estoques e lead times

<i>Value Stream Mapping (VSM)</i>	Mapear e analisar o fluxo de materiais e informações desde o pedido do cliente até a entrega do produto, identificando áreas de desperdício.
<i>Poka-Yoke</i>	Dispositivos ou técnicas à prova de erros que evitam falhas humanas nos processos de produção
<i>Total Productive Maintenance (TPM)</i>	Manutenção produtiva total, visando maximizar a eficiência dos equipamentos através de manutenção preventiva e melhorias contínuas
<i>Single-Minute Exchange of Die (SMED)</i>	Técnica para reduzir drasticamente o tempo de setup de máquinas e equipamentos, aumentando a flexibilidade e eficiência
<i>Heijunka</i>	Nivelamento da produção para reduzir variação e desperdício, equilibrando a carga de trabalho e o mix de produtos
<i>Gemba Walk</i>	Prática de ir ao local onde o trabalho é realizado para observar e entender o processo, identificar problemas e promover melhorias
<i>Andon</i>	Sistema de sinalização visual ou auditiva que alerta sobre problemas na linha de produção, permitindo uma resposta rápida e eficiente
<i>Jidoka</i>	Automatização com um toque humano, onde máquinas param automaticamente ao detectar um defeito, permitindo a resolução imediata do problema
<i>Takt Time</i>	Ritmo de produção necessário para atender a demanda do cliente, calculado com base no tempo disponível e na demanda

Fonte: Autores (2026).

SUSTENTABILIDADE

Deve-se considerar a sustentabilidade como um elemento essencial na gestão da manufatura, buscando alcançar um equilíbrio entre eficiência operacional, responsabilidade ambiental e impacto social positivo (Cherrafi et al., 2016). A sustentabilidade estabelece um equilíbrio entre a necessidade de suprir as demandas humanas e a preservação do meio ambiente.

O conceito da sustentabilidade vem sendo abraçado por grandes empresas que entendem que a adoção de processos sustentáveis é fundamental e, nesse contexto, o *Triple Bottom Line* (TBL) é o foco, em português, o termo mais usado é “Tripé da Sustentabilidade ou Pilares da Sustentabilidade”, formado pelas dimensões ambiental, social e econômica (Ferrer et al., 2022). Essa tridimensionalidade tem origem em Elkington (2006), que popularizou o TBL, discorrendo que a sustentabilidade se fundamenta em um equilíbrio entre as dimensões econômica, ambiental e social. Ademais, esse conceito refletiu significativamente o modo como as empresas, governos e organizações compreendem e abordam a sustentabilidade. O TBL se tornou uma referência para a avaliação do desempenho empresarial e para a definição de estratégias que buscam um futuro mais sustentável (Drucker, 1984). Cherrafi et al. (2016), Savitz e Weber (2014), Slaper e Hall (2011) e Elkington (2006) citam exemplos de táticas do pensamento sustentável na dimensão ambiental do TBL:

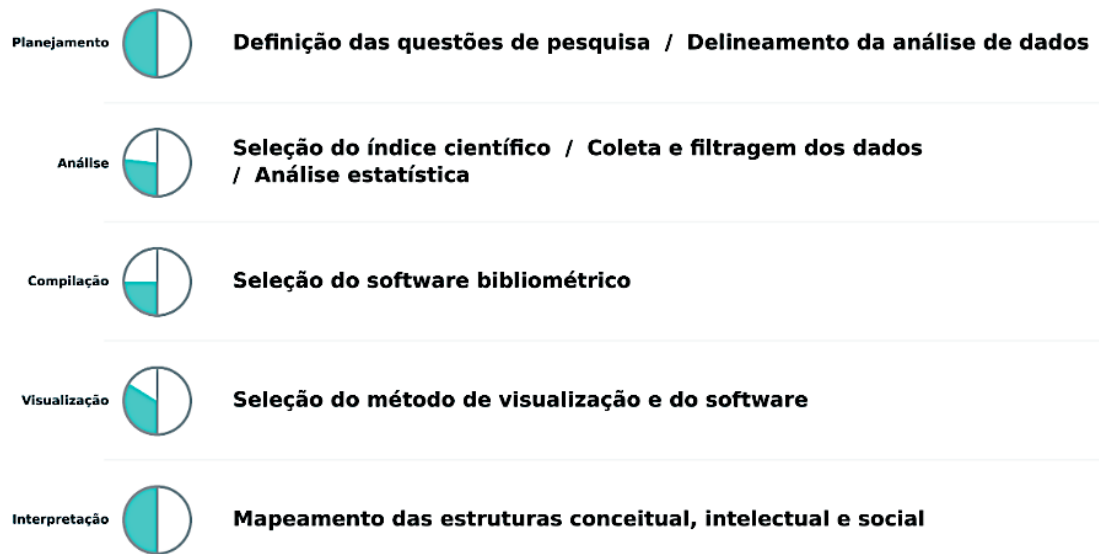
- diminuição da geração de resíduos;
- adoção de práticas de reutilização e reciclagem;
- preservação do meio ambiente natural (flora e fauna);
- restrições nas emissões de gases do efeito estufa;
- proteção dos ecossistemas;
- consumo consciente de energia, materiais, água e recursos naturais;
- utilização de fontes alternativas de energia;
- estímulo à eficiência energética;
- minimização da poluição; e
- criação, manutenção e revitalização de áreas verdes nas cidades, principalmente nos grandes centros urbanos.

MÉTODO DE PESQUISA

A construção do modelo teórico proposto foi conduzida com base em uma abordagem analítica, apoiada por uma triangulação entre literatura empírica, dados bibliométricos e referenciais teóricos. Sendo que a primeira etapa do método foi o mapeamento científico por meio de bibliometria descritiva e análise de redes sociais, que oferece resultados de forma

sistemática, transparente e com possibilidade de replicações, baseada em funções estatísticas que mensuram a ciência, o pesquisador e a atividade científica (Aria & Cuccurullo, 2017; Zupic & Carter, 2015) (Figura 1).

Figura 1. Passos da primeira etapa do método de pesquisa (mapeamento científico)



Fonte: Adaptado de Zupic e Cater (2015).

No primeiro passo, organizaram-se as três perguntas que orientam a investigação sobre a relação entre sustentabilidade e manufatura enxuta. Para explorar essa conexão de maneira abrangente, adotou-se um design baseado na análise das estruturas do conhecimento: intelectual, conceitual e social, conforme formatado por Lopes-Robles et al. (2019).

Para a seleção e coleta de dados, foi escolhida a plataforma indexadora Web of Science (WoS), baseando-se no trabalho de Oliveira et al. (2023). Para a seleção e coleta dos dados bibliográficos, utilizou-se a WoS Core Collection. A escolha dessa base considerou a padronização dos metadados bibliográficos e de citação, a disponibilidade de informações necessárias às análises de coautoria, cocitação e coocorrência e sua compatibilidade com os *softwares* utilizados. A estratégia de busca foi construída a partir dos conceitos centrais da pesquisa e de termos recorrentes em revisões anteriores sobre manufatura enxuta e sustentabilidade. A busca foi executada por meio da seguinte expressão de busca: (TS = ("Lean manuf*") AND ("sustain*" OR "green*" OR "environ*" OR "clean*")). Quanto aos resultados, foram considerados apenas artigos em inglês publicados em periódicos indexados na base que adotam o sistema de revisão por pares cega.

O processamento da amostra foi realizado por meio do pacote Bibliometrix do *software* R e do *software* VOS Viewer. A análise bibliométrica (Bibliometrix) descritiva permite identificar os principais autores, periódicos e publicações relevantes, e a análise de redes sociais (VOS Viewer) possibilita construir mapas que relacionam documentos, autores e temas.

Os resultados foram interpretados de acordo com as evidências coletadas nos mapas resultantes, que incluem a coocorrência de palavras-chave (estrutura conceitual), a coautoria (estrutura social) e a rede de citação de documentos (estrutura intelectual) (Zupic & Carter, 2015).

A segunda etapa da pesquisa teve como finalidade selecionar, entre os documentos da amostra bibliométrica, os estudos empíricos que utilizaram modelagem de equações

estruturais (*Structural Equation Modeling* - SEM). O objetivo dessa etapa foi identificar pesquisas que apresentam modelos de equação estrutural e analisar como os autores têm aplicado esse método para estudar as relações entre práticas da manufatura enxuta e os resultados sustentáveis. Os textos completos potencialmente elegíveis foram avaliados. Além disso, foram excluídos estudos conceituais, revisões, trabalhos sem aplicação de SEM, pesquisas sem resultados relacionados à sustentabilidade e documentos cujo contexto não estivesse associado à manufatura.

Para a extração das informações, utilizou-se uma planilha padronizada para mapear: os construtos utilizados; as variáveis observadas associadas a cada construto; as relações causais hipotetizadas; a estrutura lógica; e a profundidade conceitual de cada modelo. Com base nas informações extraídas dos artigos, foi realizada uma análise temática, buscando agrupar elementos semelhantes sob categorias mais amplas. A definição das variáveis de resultado do modelo seguiu a estrutura clássica de sustentabilidade proposta por Elkington (2006), baseada nos três pilares: ambiental, social e econômico. Essa tripla dimensão foi confirmada pela presença recorrente desses termos tanto na literatura especializada quanto nos estudos revisados.

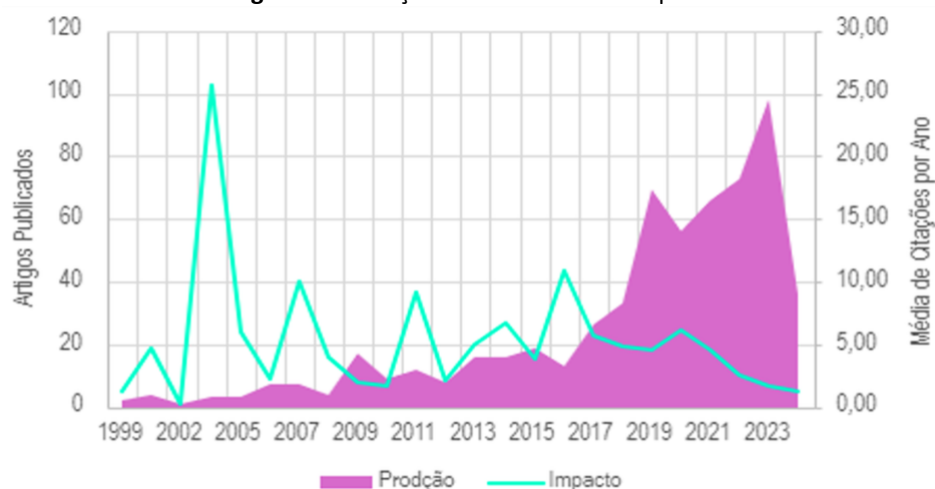
RESULTADOS

MAPEAMENTO CIENTÍFICO

A coleta de dados foi realizada em 09/05/2024 e resultou em um total de 598 conjuntos de metadados extraídos do banco de dados do WoS. A busca utilizou a expressão anteriormente informada, refinada pelo filtro temporal correspondente ao período de 1999 a 2024.

Primeiramente, caracterizou-se a amostra em termos da produção científica do campo e seu impacto (Figura 2). Percebeu-se, assim, que existiu um crescimento na produção científica mais significativa a partir de 2017, acompanhado de um aumento expressivo a partir de 2019, alcançando um máximo de 92 publicações em 2021. O número de artigos obteve um aumento médio de 12,26% anual e percebe-se um principal pico de impacto em 2004 (26 citações/ano), conforme ilustrado na linha verde.

Figura 2. Produção científica anual e impacto

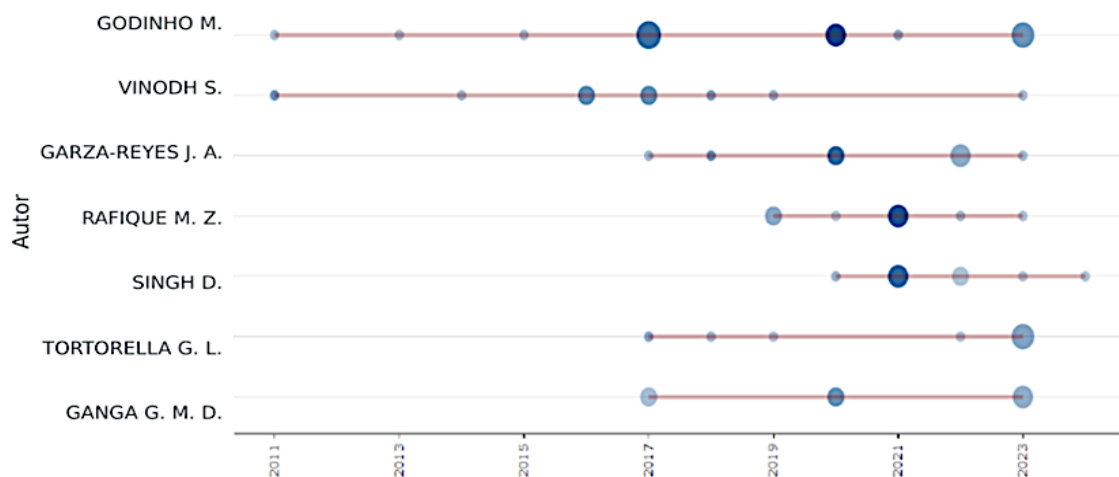


Fonte: Autores (2026).

Os principais autores da amostra são apresentados na Figura 3 de acordo com sua produção e impacto. Desse modo, a interpretação se dá pelo tamanho das bolhas que retratam o número de artigos publicados, e a intensidade da cor representa o número de citações por

ano. É possível analisar que os principais autores publicaram entre 2011 e 2023, tendo um valor mais expressivo de 2017 a 2023.

Figura 3. Produção científica e impacto dos principais autores



Fonte: Autores (2026).

A Tabela 2 apresenta os principais periódicos entre os 250 identificados e seus índices H. *Sustainability* apresenta o maior número de publicações da amostra (43), seguido de *Journal of Cleaner Production* (36), gerando a percepção de que grande parte das publicações são encaminhadas para a área de sustentabilidade com ferramentas do *Lean Production* incorporadas.

Tabela 2. Produção científica e impacto dos principais periódicos

Periódico	Artigos	País	Índice H
Sustainability	43	Suíça	169
J. of Cleaner Production	36	Reino Unido	309
Int. J. of Lean Six Sigma	31	Reino Unido	52
Int. J. of Production Research	27	Reino Unido	186
Production Planning & Control	27	Reino Unido	104
J. of Manuf. Technology Management	22	Reino Unido	93
Int. J. of Advanced Manuf. Technology	19	Reino Unido	161
Int. J. of Production Economics	10	Holanda	231
TQM J.	10	Reino Unido	79

Fonte: Autores (2026).

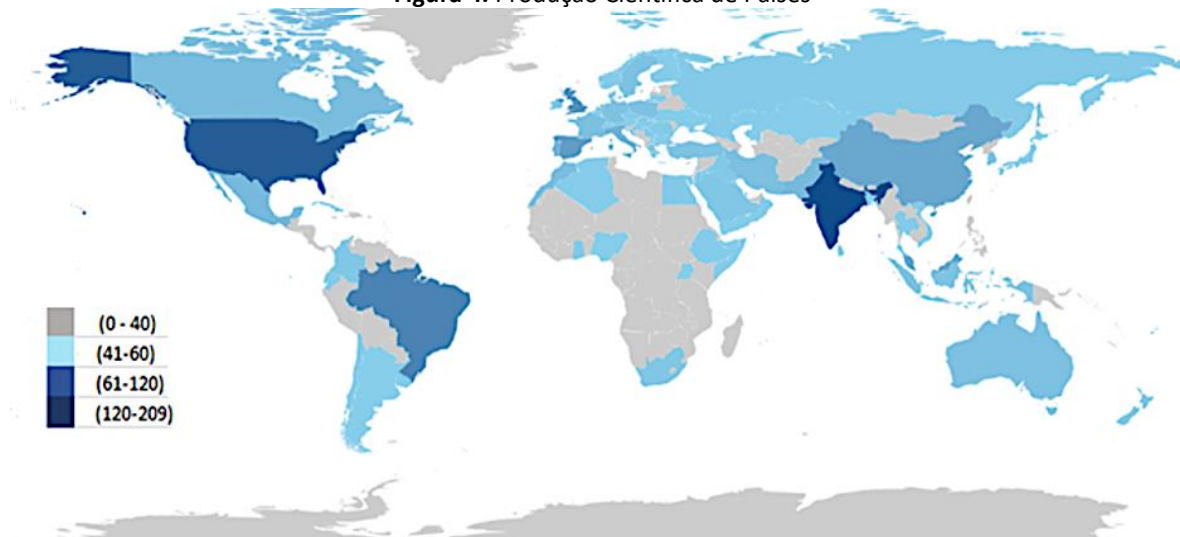
Já a Tabela 3 a seguir apresenta os artigos de maior impacto da amostra em termos de citações locais. Explanando os cinco primeiros, Yang et al. (2011) exploram como a manufatura enxuta pode aprimorar a gestão ambiental, resultando em melhores desempenhos ambiental e financeiro. Faulkner e Badurdeen (2014) destacam a importância de alinhar práticas de produção com a sustentabilidade, propondo a extensão do mapeamento do fluxo de valor para incluir impactos ambientais e sociais. Cherrafi et al. (2016), por sua vez, realizam uma revisão sistemática da literatura, sublinhando os desafios globais e a necessidade de considerar a sustentabilidade como um critério competitivo emergente. Já Abdelmalek e Rajgopal (2007) aplicam princípios da manufatura enxuta em uma usina siderúrgica, mostrando como técnicas do *Lean* podem otimizar processos e reduzir desperdícios. Por fim, Reichhart e Holweg (2007) abordam a evolução do sistema de produção enxuta na indústria, destacando a importância da pesquisa do MIT para entender a eficiência industrial e a conexão entre a produção enxuta e a sustentabilidade. Coletivamente, esses estudos demonstram que alinhar práticas enxutas com princípios da sustentabilidade promove uma abordagem mais eficiente e responsável na manufatura.

Tabela 3. Documentos da amostra com maior impacto

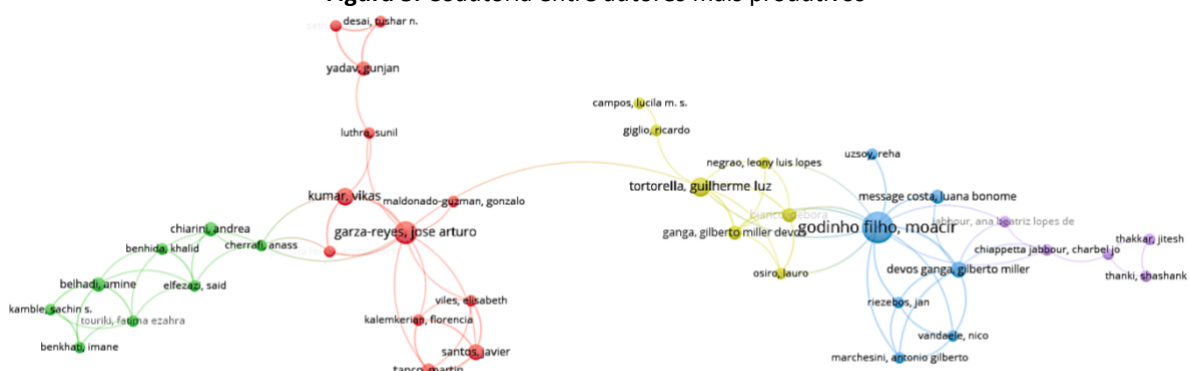
Artigo	Citação Local	Citação Global
Yang et al. (2011), Int J Prod Econ	70	600
Faulkner & Badurdeen (2014), J Clean Prod	53	251
Cherrafi et al. (2016), J Clean Prod	53	282
Abdulmalek & Rajgopal (2007), Int J Prod Econ	46	514
Reichhart & Holweg (2007), J Oper Manag	42	667
Rothenberg (2001), Prod Oper Manag	37	344
Helleno & Moraes (2017), J Clean Prod	37	147
Vinodh (2011), Clean Technol Envir	33	139
Thanki (2016), J Clean Prod	33	227
Sajan (2017), J Manuf Technol Mana	33	118
Henao (2019), J Clean Prod	33	135

Fonte: Autores (2026).

O mapeamento da estrutura social foi feito mapeando países mais produtivos (Figura 4) e pela rede de coautoria entre autores mais produtivos (Figura 5). Foi possível notar maior produtividade dos Estados Unidos, e os autores com maior destaque foram discriminados em 5 clusters de compartilhamento, coautoria e convergência distintos, sendo ilustrados nas cores verde, vermelho, verde, azul e roxo.

Figura 4. Produção Científica de Países

Fonte: Autores (2026).

Figura 5. Coautoria entre autores mais produtivos

Fonte: Autores (2026).

Para o mapeamento da estrutura intelectual, foi realizada uma análise de citações. Assim, percebeu-se que o foco dos artigos mais citados pode ser dividido em três *clusters*: foco na implantação (azul), foco em sustentabilidade (vermelho) e foco em desempenho (verde). Temas auxiliares incluem as tecnologias da Indústria 4.0, outras abordagens de melhoria contínua (como o Seis Sigma) e setores específicos, como o de saúde (Figura 6).

Percebe-se a formação de 3 distintos clusters temáticos: ferramentas da manufatura enxuta e manufatura sustentável (azul); desempenho e sustentabilidade (vermelho); e Indústria 4.0 e melhoria contínua (verde). As palavras mais frequentes apontam para tópicos centrais e recorrentes, como gestão, desempenho, impacto e implementação, enquanto as de menor frequência indicam áreas de interesse mais específicas ou nichos.

REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A aplicação de modelos de equações estruturais tem sido amplamente utilizada para investigar as relações entre práticas da manufatura enxuta e os pilares da sustentabilidade empresarial. A partir dos 14 artigos selecionados, que abordam a temática por meio de modelagem estrutural, predominantemente utilizando PLS-SEM, mas também CB-SEM com AMOS e LISREL, foi possível identificar padrões teóricos e empíricos que sustentam a construção de modelos robustos, como o descrito no Quadro 1. A comparação evidencia a diversidade de métodos, ferramentas e construtos utilizados, bem como a predominância das dimensões ambiental, social e econômico-operacional na avaliação dos resultados.

Quadro 1. Síntese dos estudos que aplicaram SEM às relações entre Lean Manufacturing e sustentabilidade

Artigo	Método/Software	Construtos Lean	Dimensões Sustentáveis
Abidin et al. (2022)	CB-SEM; SPSS/AMOS	CI, TPM e JIT	Econômica, operacional e social
Bianco et al. (2024)	PLS-SEM; SmartPLS	Dez práticas Lean de Shah e Ward	Econômica, operacional e resiliência
Díaz-Reza et al. (2024b)	PLS-SEM/WarpPLS 8 e DS/STELLA	5S, TPM, QCO e OPF	Social
Marquez-Figueroa et al. (2023)	Não confirmado	Equipes, descentralização e gestão de pessoas	Social
García-Alcaraz et al. (2019)	PLS-SEM/WarpPLS 6; SPSS	TQM, compromisso, treinamento e integração	Econômica, operacional e social
Figueroa et al. (2024)	SEM	VSM, KPI, Kaizen e ecodesign	Ambiental e econômica
Inman e Green (2018)	SEM	Práticas Lean e Green SCM	Ambiental e operacional
Gaikwad & Sunnapwar (2021)	CB-SEM/AMOS não confirmado	Lean, Green e Six Sigma	Ambiental, social e econômica
Kale et al. (2022)	SEM/ISM não confirmado	Lean e OHSMS	Social: saúde e segurança
Díaz-Reza et al. (2024a)	PLS-SEM/WarpPLS 8 e DS/STELLA	Kaizen, TPM, JIT e TQM	Social
Nagaraj & Jeyapaul (2021)	EFA, CFA e CB-SEM/AMOS	Fatores físicos, psicossociais, gerenciais, cognitivos e do trabalho	Social e operacional
Shashi et al. (2019)	CFA e CB-SEM; máxima verossimilhança	Produção puxada, JIT, ritmo da demanda e setup	Ambiental e econômica
Singh & Singh (2024)	EFA, CFA e CB-SEM; SPSS/AMOS 23	Green Lean, liderança, cultura, GRH, SST e pressão legal	Ambiental
Panigrahi et al. (2023)	PLS-SEM/SmartPLS 3	Recursos, produção puxada, lotes, setup, qualidade, TPM e fornecedores	Econômica e operacional

Fonte: Autores (2026).

Diversos estudos confirmam que a manufatura enxuta impacta positivamente dimensões da sustentabilidade, ainda que com variações em seus caminhos e mediadores. Por exemplo, Bianco et al. (2024) utilizaram o PLS-SEM para demonstrar que o *Lean* atua como moderador positivo da capacidade de resposta das empresas diante de colapsos logísticos, melhorando tanto o desempenho organizacional quanto o compromisso com práticas sustentáveis.

Díaz-Reza et al. (2024a) também combinaram a modelagem de equações estruturais com a dinâmica de sistemas para avaliar os efeitos de *Kaizen*, *Total Productive Maintenance* (TPM), *Just-In-Time* (JIT) e *Total Quality Management* (TQM) sobre a sustentabilidade social. Com base em 411 questionários e utilizando o WarpPLS, os autores identificaram a melhoria contínua como elemento habilitador das demais práticas. As simulações indicaram, ainda, que a implementação integral das práticas demandaria aproximadamente sete anos, enquanto o alcance pleno da sustentabilidade social ocorreria em cerca de 10,25 anos, demonstrando a utilidade do modelo para analisar não apenas as relações causais, mas também sua evolução temporal. Já Díaz-Reza et al. (2024b), ao aplicarem um modelo SEM em conjunto com simulações de dinâmica de sistemas, comprovaram que a ferramenta 5S é a base estruturante para que outras práticas *Lean* (como TPM e OPF) impactem a sustentabilidade social, evidenciando a importância da lógica de encadeamento entre os construtos.

Em outro recorte da sustentabilidade, Marquez-Figueroa et al. (2023) mostraram que práticas de gestão de pessoas, como grupos multifuncionais e descentralização, influenciam diretamente os resultados sociais das empresas. Esse modelo, validado com PLS-SEM, revelou caminhos diretos e indiretos fortes entre gestão de recursos humanos e sustentabilidade social, sustentando a inclusão de variáveis desse tipo em modelos teóricos integrados. Da mesma forma, García-Alcaraz et al. (2019) confirmaram, em seu estudo com maquiladoras mexicanas, que comprometimento gerencial e treinamento são fatores preditivos relevantes para a obtenção de benefícios operacionais, compondo uma lógica de mediação com forte impacto.

Complementando essa perspectiva sociotécnica, Nagaraj e Jeyapaul (2021) utilizaram SEM com AMOS e dados de 168 especialistas para investigar a influência dos fatores humanos e da ergonomia sobre o desempenho *Lean*. O modelo explicou a variância desse desempenho e mostrou que os fatores psicossociais e físicos exercem as influências mais fortes, seguidos dos fatores gerenciais e de projeto do trabalho, enquanto os fatores cognitivos apresentam menor influência. Esses resultados demonstram que a sustentabilidade da manufatura enxuta depende também da qualidade de vida no trabalho e da integração entre práticas técnicas e fatores humanos.

No campo do desempenho econômico e ambiental, Figueroa et al. (2024) e Inman e Green (2018) reforçam que ferramentas *Lean* como VSM, KPI, *Kaizen* e práticas de *ecodesign* influenciam diretamente os ganhos financeiros e a *performance* ambiental. Os autores defendem que a manufatura enxuta só é efetiva na sustentabilidade quando incorporada em uma estratégia de longo prazo, conectando cultura organizacional e ferramentas operacionais, como também indicam Faulkner e Badurdeen (2020) na literatura teórica. Shashi et al. (2019) testaram, por meio de SEM, um modelo composto pelos construtos *leanness*, inovação de processo, inovação de produto, desempenho ambiental e desempenho financeiro, utilizando dados de 374 pequenas e médias empresas indianas. Os resultados confirmaram efeitos positivos diretos e indiretos da manufatura enxuta sobre os desempenhos ambiental e financeiro, sendo parte desses efeitos mediada pela inovação.

Singh e Singh (2024), por sua vez, utilizaram SEM com AMOS em uma amostra de 124 empresas industriais indianas para avaliar os efeitos das práticas *Green Lean* sobre o

desempenho ambiental. Os resultados mostraram influências significativas do comprometimento da alta administração, da gestão de recursos humanos, da saúde e segurança dos trabalhadores e das pressões públicas e legais. A cultura organizacional, entretanto, não apresentou efeito estatisticamente significativo, indicando que sua simples existência não garante resultados ambientais quando não acompanhada de mecanismos gerenciais, institucionais e operacionais concretos.

Modelos mais complexos, como o de Gaikwad e Sunnapwar (2021), integram *Lean*, *Green* e *Six Sigma* (LGSS) em um *framework* validado por CB-SEM com AMOS. O estudo mostra que a sinergia entre essas abordagens resulta em melhor desempenho ambiental, financeiro e social, e que práticas *Lean* fortalecem as práticas *Green* por meio da padronização e gestão de qualidade. Já Kale et al. (2022) propõem um modelo validado com SEM focado em saúde e segurança no trabalho e demonstram que o sucesso da integração entre LM e OHSMS depende diretamente de comprometimento da liderança e gestão de processos, recomendando o uso de ISM combinado com SEM.

Figuerola et al. (2024) e Díaz-Reza et al. (2024b) concentraram-se fortemente em ferramentas específicas (como TPM, 5S, VSM), com ótimos resultados preditivos. Marquez-Figuerola et al. (2023) abordaram bem a gestão de pessoas, mostrando relações significativas com sustentabilidade social. Inman e Green (2018) demonstraram mediações ambientais. Nenhum modelo incorporou explicitamente a dimensão filosófica e cultural como construto mediador ou causal.

Resultados distintos foram encontrados por Panigrahi et al. (2023), que aplicaram PLS-SEM com SmartPLS a dados de 107 respondentes de empresas industriais de Omã. As práticas *Lean* apresentaram efeito positivo e significativo sobre o desempenho, mas não produziram efeito direto significativo sobre o desempenho geral do negócio. Além disso, sistema puxado, relacionamento com fornecedores e flexibilidade de recursos não contribuíram significativamente para a composição do construto *Lean*, reforçando que os efeitos das práticas dependem do contexto industrial e da dimensão de desempenho considerada.

Por fim, Abidin et al. (2022) identificam que a melhoria contínua (CI) e o JIT são os principais preditores da *performance* sustentável, enquanto o TPM mostrou-se estatisticamente não significativo, revelando a importância de revisar a efetividade de certas ferramentas tradicionais.

DESENVOLVIMENTO DO MODELO

A elaboração do modelo proposto neste estudo resulta da convergência entre os achados da análise bibliométrica, a revisão da literatura especializada e uma análise crítica dos modelos anteriores que aplicaram SEM para investigar a relação entre manufatura enxuta e sustentabilidade. Essa triangulação de fontes levou à construção de um modelo construtivo e integrador, que considera a manufatura enxuta não apenas como um conjunto de práticas operacionais isoladas, mas como um sistema organizacional multifacetado, com impactos amplos sobre os pilares ambiental, social e econômico da sustentabilidade.

Com base nas informações extraídas dos artigos que utilizaram modelagem de equações estruturais, foi realizada uma análise temática, buscando agrupar elementos semelhantes sob categorias mais amplas. Essa etapa revelou que os diferentes autores abordavam dimensões

do *Lean* sob três perspectivas recorrentes, ainda que não necessariamente nomeadas dessa forma. Essa organização dos dados levou à formulação de três agrupamentos conceituais robustos, que evoluíram para os três construtos principais do modelo: ferramentas técnicas e operacionais, como VSM, JIT, TPM, SMED; práticas relacionadas à gestão e engajamento de pessoas, como capacitação, descentralização e trabalho em equipe; e referências à Cultura *Lean*, muitas vezes implícitas, por meio de conceitos como melhoria contínua, filosofia organizacional, respeito pelas pessoas e foco no cliente.

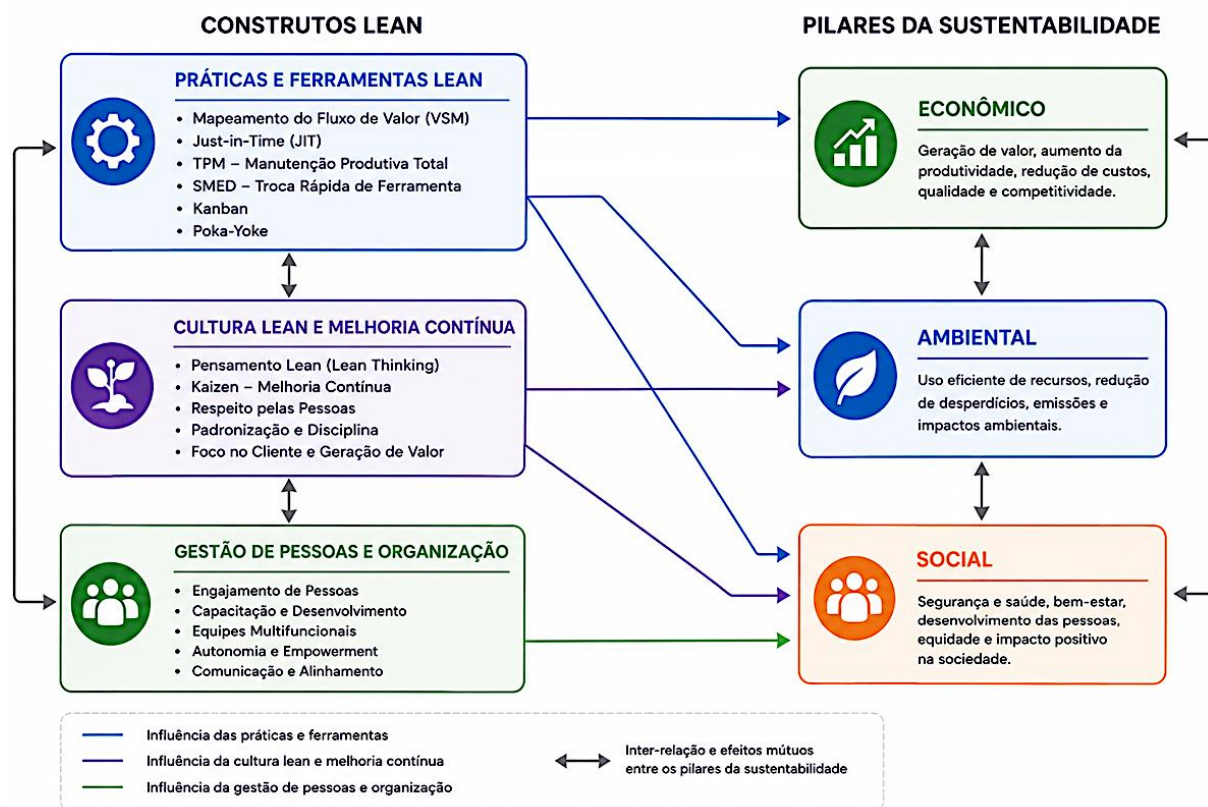
- I. Ferramentas Técnicas: representam o nível visível e operacional do *Lean*. São técnicas aplicadas diretamente sobre processos produtivos para otimização de tempo, fluxo e redução de desperdícios. Apesar de essenciais, as ferramentas não produzem resultados sustentáveis por si só, sem o devido suporte humano e cultural;
- II. Gestão de Pessoas: é o elo entre o sistema técnico e a realidade humana. Envolve práticas como capacitação contínua, trabalho em equipe, autonomia na tomada de decisão e reconhecimento. Estudos como os de Marquez-Figueroa et al. (2023) e García-Alcaraz et al. (2019) comprovam a eficácia dessa dimensão na geração de impacto social e até mesmo ambiental, ao promover maior conscientização nas operações;
- III. Filosofia *Lean*: constitui a base invisível, mas essencial, do sistema. Engloba os princípios e valores que orientam as decisões e o comportamento organizacional. Sem essa dimensão, o *Lean* corre o risco de ser superficial e insustentável. Essa filosofia permeia todas as práticas, sendo a verdadeira alavanca para a geração de resultados consistentes (Womack & Jones, 2015; Liker, 2021).

A definição das variáveis de resultado do modelo seguiu a estrutura clássica de sustentabilidade proposta por Elkington (2006), baseada em três pilares: ambiental, social e econômico. Essa tripla dimensão foi confirmada pela presença recorrente desses termos tanto na literatura especializada quanto nos estudos revisados. Dessa forma, os construtos da sustentabilidade foram definidos como: desempenho ambiental - sendo uso eficiente de recursos e redução de resíduos e emissões; desempenho social - relacionado a segurança, bem-estar, inclusão e responsabilidade social; e desempenho econômico - como a produtividade, a lucratividade e a redução de custos.

Essa análise permitiu observar que, embora os estudos trabalhem com diferentes ferramentas e enfoques, prevalece a tendência de tratar a manufatura enxuta como um conjunto de práticas isoladas, predominantemente técnicas, com foco direto em *performance* ou sustentabilidade. Além disso, os estudos sugerem que construtos como melhoria contínua, descentralização, integração dos funcionários, Cultura *Lean* e uso de indicadores aparecem como componentes centrais nos modelos validados.

Os três pilares propostos nesse modelo (Figura 8) representam níveis interligados de um mesmo sistema organizacional: operacional (ferramentas), humano (gestão de pessoas) e filosófico (cultura). Essa organização permite capturar a complexidade do *Lean* e seus impactos nos resultados sustentáveis, oferecendo uma estrutura robusta para testes empíricos com modelagem de equações estruturais.

Figura 8. Modelo Conceitual



Fonte: Autores (2026).

O modelo conceitual, proposto para explicar a relação entre os construtos da manufatura enxuta e os pilares da sustentabilidade, foi estruturado a partir de três grandes dimensões *Lean*: Práticas e Ferramentas *Lean*; Cultura *Lean* e Melhoria Contínua; e Gestão de Pessoas e Organização, integradas aos três pilares da sustentabilidade (econômico, ambiental e social). Além dos impactos diretos entre construtos e pilares, o modelo proposto considera a existência de inter-relações entre os próprios construtos *Lean* e entre os pilares da sustentabilidade, formando um sistema dinâmico e integrado.

Inicialmente, o modelo assume que os pilares econômico, ambiental e social não atuam de forma independente, mas apresentam relações mútuas semelhantes a “placas tectônicas”, em que alterações em um elemento geram deslocamentos e efeitos nos demais. O pilar ambiental foi adotado como um componente central dessas interações, considerando que melhorias ambientais frequentemente produzem consequências econômicas indiretas por meio da redução do consumo de energia, matéria-prima, água e desperdícios, resultando em menores custos operacionais e maior competitividade. Da mesma forma, práticas ambientalmente responsáveis tendem a influenciar positivamente o pilar social ao reduzir riscos ocupacionais, exposição a agentes nocivos e impactos à comunidade. Em sentido complementar, melhorias sociais, como desenvolvimento humano, capacitação e aumento da satisfação no trabalho, contribuem para ganhos econômicos associados à produtividade, à qualidade e à inovação.

No que se refere aos construtos *Lean*, o modelo considera que Práticas e Ferramentas *Lean* apresentam impacto direto sobre os três pilares da sustentabilidade. Essas ferramentas têm como propósito principal a eliminação de desperdícios e o aumento da eficiência operacional. Sendo assim, no âmbito econômico, elas contribuem para a redução de custos, a melhoria da

produtividade, a redução de defeitos, a diminuição de estoques e o aumento da geração de valor. Em relação ao pilar ambiental, a eliminação de desperdícios implica menor consumo de recursos, redução de resíduos e menor impacto ambiental decorrente dos processos produtivos. Adicionalmente, essas ferramentas podem produzir impactos sociais diretos por meio da redução de retrabalhos, da melhoria das condições ergonômicas, da diminuição da sobrecarga física e cognitiva e do aumento da segurança operacional.

A Cultura *Lean* e melhoria contínua constitui a dimensão filosófica do modelo, incorporando elementos como *Lean Thinking*, *Kaizen*, respeito pelas pessoas, foco em valor e aprendizagem contínua. Diferentemente das ferramentas operacionais, a cultura atua principalmente sobre comportamentos, valores e tomada de decisão organizacional. Os resultados sugeriram influência direta da Cultura *Lean* sobre os pilares ambiental e social. No aspecto ambiental, uma cultura voltada à melhoria contínua pode favorecer a busca sistemática pela eliminação de desperdícios e pela utilização racional dos recursos disponíveis. No aspecto social, a valorização das pessoas, o estímulo à participação, ao aprendizado e à colaboração contribuem para ambientes de trabalho mais seguros, motivadores e favoráveis ao desenvolvimento humano. Já as dimensões associadas à Gestão de Pessoas e Organização foram modeladas como um construto associado a elementos como engajamento, treinamento, equipes multifuncionais, autonomia, comunicação e empoderamento. Os resultados indicaram influência direta predominantemente sobre o pilar social, considerando que investimentos em pessoas tendem a refletir inicialmente em melhorias relacionadas ao desenvolvimento profissional, satisfação, comprometimento, clima organizacional e segurança no trabalho. Embora efeitos econômicos e ambientais possam ocorrer posteriormente, eles tendem a manifestar-se de forma indireta por meio das relações entre os demais pilares.

O modelo proposto também considera relações de reforço mútuo entre os próprios construtos *Lean*. As Práticas e Ferramentas *Lean* e a Cultura *Lean* e melhoria contínua apresentam dependência recíproca, uma vez que ferramentas isoladas raramente sustentam resultados no longo prazo sem uma cultura que forneça suporte organizacional. Em sentido inverso, resultados obtidos com a aplicação das ferramentas fortalecem a disseminação dos princípios culturais *Lean*. Relação semelhante ocorre entre Cultura *Lean* e Gestão de Pessoas, visto que a cultura estabelece comportamentos e valores desejados, enquanto a gestão de pessoas operacionaliza esses princípios por meio de práticas organizacionais.

De forma geral, o modelo evidencia que os resultados associados à sustentabilidade não surgem como consequência exclusiva da aplicação de ferramentas *Lean* específicas, mas emergem de um sistema integrado de interações entre práticas operacionais, cultura organizacional, gestão das pessoas e relações dinâmicas entre os pilares da sustentabilidade. Essa abordagem reforça a necessidade de compreender a manufatura enxuta não apenas como um conjunto de ferramentas, mas como uma estrutura organizacional capaz de produzir impactos sistêmicos sobre o desempenho sustentável.

APLICAÇÃO PRÁTICA DO MODELO PROPOSTO

O modelo proposto pode ser utilizado como um roteiro de diagnóstico e planejamento da integração entre manufatura enxuta e sustentabilidade. Inicialmente, a organização deve selecionar uma unidade produtiva, família de produtos ou fluxo de valor e avaliar os três

construtos *Lean*: Práticas e Ferramentas *Lean*, Cultura *Lean* e Melhoria Contínua e Gestão de Pessoas e Organização. Essa avaliação pode combinar questionários aplicados a gestores e trabalhadores, auditorias de processos e indicadores extraídos dos sistemas de produção, qualidade, meio ambiente e recursos humanos.

Para o construto Práticas e Ferramentas *Lean*, podem ser avaliados o grau de utilização do mapeamento do fluxo de valor, JIT, Manutenção Produtiva Total, SMED, *Kanban* e *Poka-Yoke*. A Cultura *Lean* pode ser mensurada por indicadores relacionados à realização de eventos *Kaizen*, participação em programas de sugestões, respeito às rotinas padronizadas, aprendizagem e foco na geração de valor. A Gestão de Pessoas pode ser examinada por meio de horas de capacitação, autonomia, comunicação, participação em equipes multifuncionais e envolvimento dos trabalhadores nas decisões de melhoria.

Os resultados desses construtos devem ser relacionados a indicadores econômicos, como produtividade, custo unitário, estoques e defeitos; ambientais, como consumo de energia, água e matérias-primas, geração de resíduos e emissões; e sociais, como acidentes, absenteísmo, rotatividade, satisfação e desenvolvimento profissional. A comparação entre os indicadores permite identificar desequilíbrios. Uma empresa com elevada adoção de ferramentas, mas baixa Cultura *Lean*, por exemplo, pode obter ganhos pontuais que não se sustentam no longo prazo. Da mesma forma, bons resultados econômicos acompanhados de baixo desempenho ambiental ou social indicam a necessidade de ampliar o sistema de medição e os objetivos dos projetos de melhoria.

A partir do diagnóstico, os gestores podem priorizar ações, definir responsáveis, estabelecer metas e acompanhar a evolução dos indicadores. Baixo desempenho técnico e ambiental pode orientar a aplicação do mapeamento sustentável do fluxo de valor; fragilidades sociais podem direcionar programas de capacitação, ergonomia, segurança e autonomia; e limitações culturais podem justificar rotinas de gestão diária, programas *Kaizen* e maior participação da liderança. Após a implementação das ações, recomenda-se repetir a avaliação periodicamente para verificar a evolução dos construtos e dos resultados sustentáveis. Enquanto não for empiricamente validado, o modelo deve ser utilizado como estrutura analítica e gerencial, e não como instrumento preditivo definitivo.

DISCUSSÃO

As perguntas de pesquisa propostas neste trabalho puderam ser claramente respondidas a partir das evidências levantadas no mapeamento científico, que revela um campo em expansão, com crescente relevância teórica e prática.

Em relação à estrutura intelectual, observou-se um desenvolvimento consistente da pesquisa, com aumento significativo da produção científica desde 2017, atingindo um pico em 2021 e apresentando um notável crescimento no impacto das citações em 2024. A análise de redes de citação evidenciou três grandes frentes temáticas, implantação, sustentabilidade e desempenho, que estruturam o campo de maneira robusta e integrada.

Quanto à estrutura conceitual, os principais temas e tendências giraram em torno de ferramentas da manufatura enxuta, sustentabilidade, desempenho, Indústria 4.0 e melhoria contínua. A análise de coocorrência de palavras-chave confirma uma evolução do campo em direção à integração de práticas enxutas com princípios de gestão sustentável, o que

demonstra uma preocupação crescente com o alinhamento entre eficiência produtiva e responsabilidade ambiental e social. Ressalta-se também uma lacuna teórica e prática, referente à necessidade de expandir a aplicação de indicadores de sustentabilidade para além do uso do VSM, conforme sugerido por Helleno e Moraes (2017).

No que se refere à estrutura social, países como Estados Unidos, Índia e Reino Unido se destacam como os principais polos produtores de conhecimento, tanto em volume de publicações quanto em participação em redes de coautoria. Revistas como *Sustainability* e *Journal of Cleaner Production* se consolidam como canais relevantes de difusão científica no tema. Além disso, os trabalhos de Ferrer et al. (2022) e Brito et al. (2023) reforçam a importância de aprofundar a articulação entre *Lean* e sustentabilidade, especialmente em contextos produtivos com baixa maturidade ambiental.

Diversos estudos analisados corroboraram a ideia de que ferramentas *Lean* têm impacto direto sobre o desempenho ambiental, econômico e social. Por exemplo, Figueroa et al. (2024), Faulkner e Badurdeen (2020) e Inman e Green (2018) demonstram que o uso de práticas como VSM, JIT e TPM está associado à redução de desperdícios, à eficiência de processos e à geração de valor econômico. O modelo aqui proposto incorpora esse entendimento ao estabelecer vínculos causais entre o construto Ferramentas Técnicas e os resultados nas três dimensões.

De forma semelhante, o impacto da gestão de pessoas na sustentabilidade social é destacado por Marquez-Figueroa et al. (2023) e García-Alcaraz et al. (2019), que reforçam a importância de práticas como capacitação, descentralização e trabalho colaborativo para gerar melhorias no bem-estar, na segurança e no engajamento dos colaboradores. Esse entendimento justifica a inclusão do construto Gestão de Pessoas.

Uma das principais inovações do modelo proposto é a inclusão da variável Cultura *Lean* como construto latente. Embora a literatura reconheça amplamente a importância da cultura organizacional para o sucesso das práticas enxutas, poucos modelos anteriores trataram essa dimensão de forma explícita. Womack e Jones (2015) e Yang et al. (2011) destacam que valores como melhoria contínua, respeito pelas pessoas e foco no cliente são fundamentais para sustentar as transformações promovidas pelo *Lean*. Assim, o modelo assume que uma Cultura *Lean* madura pode influenciar diretamente todas as dimensões da sustentabilidade ambiental e social, funcionando como uma força transversal. Por fim, o modelo construído reflete uma estrutura coerente com os achados da literatura, mas também se apresenta como uma proposta original e integradora, apta a ser operacionalizada e testada empiricamente em estudos futuros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste estudo foi construir um modelo conceitual que explicitasse os principais construtos da manufatura enxuta e da sustentabilidade, explorando suas relações por meio de mapeamento científico e revisão sistemática da literatura. A análise realizada possibilitou compreender o panorama atual das pesquisas sobre a integração entre manufatura enxuta e sustentabilidade, identificando tendências, estruturas teóricas e os principais avanços relacionados ao tema.

Os resultados demonstraram que o campo de estudo apresentou um crescimento contínuo nos últimos anos, especialmente a partir de 2017, evidenciando o fortalecimento das

discussões sobre eficiência operacional, sustentabilidade e inovação nos sistemas produtivos. Observou-se que a literatura se organiza predominantemente em torno de três frentes principais: manufatura enxuta, mapeamento de processos e Indústria 4.0, indicando uma crescente integração entre dimensões econômicas, ambientais e sociais. A convergência entre esses elementos evidencia o potencial da integração de práticas *Lean*, tecnologias digitais e abordagens voltadas à melhoria contínua para promover operações mais eficientes e sustentáveis. Com base nos achados obtidos, foi desenvolvido o modelo conceitual, que representa um avanço ao consolidar, em uma única estrutura, elementos frequentemente discutidos de maneira fragmentada na literatura. Diferentemente de estudos anteriores, o modelo proposto parte da premissa de que a manufatura enxuta pode ser compreendida a partir de três dimensões fundamentais: Ferramentas Técnicas, Gestão de Pessoas e Cultura Organizacional. Essa estrutura permite uma análise mais detalhada das formas pelas quais cada componente influencia os pilares econômico, ambiental e social da sustentabilidade.

Outro diferencial relevante refere-se à incorporação de relações mediadas entre os pilares sustentáveis, especialmente a relação entre desempenho ambiental e impactos econômicos e sociais. Essa lógica reforça a compreensão da sustentabilidade como um sistema integrado e interdependente, no qual melhorias em uma dimensão podem produzir efeitos indiretos em outras. Dessa forma, o modelo apresentado neste trabalho amplia as abordagens anteriores ao assumir a manufatura enxuta não apenas como um conjunto de ferramentas ou como uma variável contextual, mas como uma força estruturante contínua capaz de gerar efeitos diretos e indiretos sobre o desempenho sustentável. Como contribuição teórica, este estudo propôs uma visão mais ampla e sistêmica da relação entre manufatura enxuta e sustentabilidade, demonstrando que os resultados sustentáveis emergem da interação entre as práticas operacionais, os aspectos culturais e os fatores humanos, e não, exclusivamente, da aplicação isolada de ferramentas *Lean*. Além disso, o modelo contribui para a organização conceitual do campo ao integrar relações frequentemente tratadas separadamente em estudos anteriores.

Esta pesquisa apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A utilização exclusiva da WoS pode ter deixado de contemplar documentos indexados apenas em outras bases. A restrição a artigos publicados em inglês e a estratégia de busca adotada também podem ter produzido vieses de cobertura e seleção. Além disso, a construção do modelo baseou-se em uma síntese teórica de nove estudos que utilizaram modelagem de equações estruturais, não tendo sido ainda submetida à validação empírica. Consequentemente, as relações apresentadas devem ser interpretadas como proposições teóricas a serem testadas em diferentes setores e contextos organizacionais.

Como agenda de pesquisa futura, recomenda-se a validação empírica do modelo em diferentes contextos organizacionais e setores industriais, buscando verificar a intensidade e a direção das relações propostas. Sugere-se ainda aprofundar investigações sobre a interação entre manufatura enxuta, sustentabilidade e tecnologias associadas à Indústria 4.0, bem como desenvolver indicadores capazes de mensurar de forma integrada os impactos econômicos, ambientais e sociais decorrentes dessas relações.

REFERÊNCIAS

Abdulmalek, F. A. & Rajgopal, J. (2007). Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: a process sector case study. *International Journal of Production Economics*, 107(1), 223-36. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.09.009>

Abidin, M. H. Z., Leman, Z., Mohd Yusof, Z. A., & Ismail, M. Y. (2022). Scrutinizing the impact of essential lean methods on sustainable performance

in Malaysian manufacturing firms. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 84(5), 11-25. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v84.18413>

Aria, M. & Cuccurullo, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959-75. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>

Bianco, D., Godinho Filho, M., Negrão, L. L. L., Ganga, G. M. D., Tortorella, G. L., da Silva, J. M. N., Costa, L. B. M., & Barata, M. P. C. (2024). Companies'

responsiveness in facing supply chain breakdowns: the role of lean manufacturing. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 6712-24. <https://doi.org/10.1109/TEM.2023.3286352>

Brito, J. G. L., et al. (2023). Analysis of the application of sustainability practices in companies in Pernambuco. *Anais do XXXI Simpósio de Engenharia de Produção*.

Brito, M. C. R., et al. (2023). Application of Sustainability Model 4.0: A study in manufacturing companies. *Anais do XXX Simpósio de Engenharia de Produção*, Bauru, SP, Brasil.

Cherrafi, A., et al. (2016). Lean, green and Six Sigma: A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 136, 118-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.015>

Cherrafi, A., et al. (2016). 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*, 139, 828-46. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.101/>

Díaz-Reza, J. R., García-Alcaraz, J. L., Sánchez-Ramírez, C., & Realyvásquez Vargas, A. (2024a). Assessing the impact of lean manufacturing on the social sustainability through structural equation modeling and system dynamics. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 18(1), 113-30. <https://doi.org/10.59038/jimie/180109/>

Díaz-Reza, J. R., Mousavi, S. H., Sánchez-Ramírez, C., & García-Alcaraz, J. L. (2024b). Achieving social sustainability through lean manufacturing practices: insights from structural equation model and system dynamics. *Journal of Cleaner Production*, 448, 141453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141453/>

Drucker, P. F. & Maciariello, J. A. (2004). The Daily Drucker: 366 days of insight and motivation for getting the right things done. *HarperBusiness*.

Elkington, J. (2006). Governance for sustainability. *Corporate Governance: An International Review*, 14(6), 522-9. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8683.2006.00527.x>

Faulkner, W. & Badurdeen, F. (2014). Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. *Journal of Cleaner Production*, 85, 8-18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.042>

Faulkner, W. & Badurdeen, F. (2020). The use of a sustainable value stream mapping tool to improve manufacturing processes. *Proceedings of the 24th CIRP Conference on Manufacturing Systems*.

Ferrer, J. A. G., Obilcnik, H., Paschoalinoto, N. W., & Bruno, D. O. T. (2022). Lean manufacturing sostenible - metodología de aplicación del mapeo de flujo de

valor sostenible (Sus-VSM). *Revista Brasileira de Mecatrônica*, 4(3), 1-18.

Ferrer, J. A. G., et al. (2022). Sustainable lean manufacturing: Methodology for applying sustainable value stream mapping (SUS-VSM). *Revista Brasileira de Mecatrônica*, 4(3), 1-18.

Figueroa, A. D., et al. (2024). The mediating role of lean management in the relationship between sustainable manufacturing and firm performance. *Journal of Cleaner Production*, 441, 140640.

Fukuda, K., et al. (2018). The Japanese economic miracle: The role of manufacturing. In *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (2nd ed.). Elsevier.

Fukuda, S. de O., et al. (2018). The importance of innovation and the export-oriented model in the Japanese development project: an analysis based on the Toyota case.

Gaikwad, V. S. & Sunnapwar, V. K. (2021). A hybrid lean-green-six sigma model for sustainable performance improvement. *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, 13(3), 250-75. <https://doi.org/10.1504/IJSSCA.2021.120612>

García-Alcaraz, J. L., Flor-Montalvo, F. J., Avelar-Sosa, L., Sánchez-Ramírez, C., & Jiménez-Macías, E. (2019). Human resource abilities and skills in TQM for sustainable enterprises. *Sustainability*, 11(22), 6488. <https://doi.org/10.3390/su11226488>

Helleno, A. L., Moraes, A. J. I., & Simon, A. T. (2017). Integrating sustainability indicators and Lean Manufacturing to assess manufacturing processes: application case studies in Brazilian industry. *Journal of Cleaner Production*, 153, 405-16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.072>

Henao, R., Sarache, W., & Gómez, I. (2019). Lean manufacturing and sustainable performance: Trends and future challenges. *Journal of Cleaner Production*, 208, 99-116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.116>

Inman, R. A. & Green, K. W. (2018). Lean and green combine to impact environmental and operational performance. *International Journal of Production Research*, 56(14), 4802-18. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1447705>

Kale, P., et al. (2022). A structural equation modeling approach to lean manufacturing and occupational health and safety management system integration. *Journal of Cleaner Production*, 333, 129888. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129888>

Liker, J. K. (2021). The Toyota Way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

López-Robles, J.-R., Guallar, J., Gamboa-Rosales, N.-K., Otegi-Olaso, J.-R., & Cobo, M. J. (2019). Mapa de la estructura intelectual de El profesional de la

información de 2014 a 2018. *Hipertext.net*, 19, 115-25. <https://doi.org/10.31009/hipertext.net.2019.i19.09>

Lopes-Robles, R., et al. (2019). Bibliometric and network analysis of research on sustainability and lean manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 238, 118047. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117847>

Marquez-Figueroa, F., et al. (2023). People management practices and social sustainability in manufacturing firms. *Sustainability*, 15(21), 15422. <https://doi.org/10.3390/su152115422>

Nagaraj, T. S. & Jeyapaul, R. (2021). An empirical investigation on association between human factors, ergonomics and lean manufacturing. *Production Planning & Control*, 32(16), 1337-51. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1810815/>

Oliveira, D. C. S., et al. (2023). A bibliometric review of lean manufacturing and sustainability in the context of Industry 4.0. *Sustainability*, 15(12), 9587. <https://doi.org/10.3390/su15129587>

Panigrahi, S., Al Ghafri, K. K., Al Alyani, W. R., Ali Khan, M. W., Al Madhagy, T., & Khan, A. (2023). Lean manufacturing practices for operational and business performance: a PLS-SEM modeling analysis. *International Journal of Engineering Business Management*, 15, 18479790221147864. <https://doi.org/10.1177/18479790221147864/>

Reichhart, A. & Holweg, M. (2007). Lean distribution: concepts, contributions, conflicts. *International Journal of Production Research*, 45(16), 3699-722. <https://doi.org/10.1080/00207540701449939>

Santos, P. H. A. & Lizarelli, F. L. (2023). Práticas da gestão da cadeia de suprimentos sustentável: revisão terciária da literatura. In *Anais do XLIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Fortaleza, CE, Brasil, 1-14.

Savitz, A. W. & Weber, K. (2014). The triple bottom line: How today's best-run companies are achieving economic, social and environmental success, and how you can too. *Jossey-Bass*.

Singh, C. & Singh, D. (2024). How does green lean practices effect environmental performance? Evidence from manufacturing industries in India. *Measuring Business Excellence*, 28(1), 151-73. <https://doi.org/10.1108/MBE-04-2023-0067/>

Shashi, Centobelli, P., Cerchione, R., & Singh, R. (2019). The impact of leanness and innovativeness on environmental and financial performance: Insights from Indian SMEs. *International Journal of Production Economics*, 212, 111-24. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.02.011/>

Slaper, T. F., & Hall, T. J. (2011). The triple bottom line: what is it and how does it work? *Indiana Business Review*, 86(1), 4-8.

Taddeo, R., Simboli, A., Di Vincenzo, F., & Ioppolo, G. (2019). A bibliometric and network analysis of Lean and Clean(er) production research (1990-2017). *Science of the Total Environment*, 653, 765-75. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.412>

Womack, J. P. & Jones, D. T. (2003). Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation (2nd ed.). *Free Press*.

Womack, J. P. & Jones, D. T. (2005). Lean solutions: How companies and customers can create value and wealth together. *Free Press*.

Yang, M. G., Hong, P., & Modi, S. B. (2011). Impact of lean manufacturing and environmental management on business performance: An empirical study of manufacturing firms. *International Journal of Production Economics*, 129, 251-61. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.017>

Yoshino, R. T. (2008). Proposal for the integration of tools in production in medium-sized companies (Tese de doutorado). *University of São Paulo*, São Carlos, SP, Brasil.

Zupic, I. & Čater, T. (2015). Bibliometric methods in management and organization. *Organizational Research Methods*, 18(3), 429-72. <https://doi.org/10.1177/1094428114562629>