

UNIVERSIDADE PAULISTA – UNIP

CLEBER GASPAR CORREA DUARTE

**MANUFATURA SUSTENTÁVEL: DIREÇÕES PARA DESENVOLVIMENTO DE
MODELOS DEDICADOS A MPMEs**

SÃO PAULO

2026

CLEBER GASPAR CORREA DUARTE

**MANUFATURA SUSTENTÁVEL: DIREÇÕES PARA DESENVOLVIMENTO DE
MODELOS DEDICADOS A MPMEs**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Administração da Universidade Paulista – UNIP, para
obtenção do título de Doutor em Administração.

Orientador: Prof. Dr. Renato Telles

SÃO PAULO

2026

Duarte, Cleber Gaspar Correa.

Manufatura sustentável: direções para o desenvolvimento de modelos dedicados a MPMEs / Cleber Gaspar Correa Duarte. -2026.
170 f.: il. color.

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Paulista, São Paulo, 2026.

Área de concentração: Redes Organizacionais.

Orientador: Prof. Dr. Renato Telles.

1. Manufatura sustentável. 2. Sustentabilidade industrial.
3. Microempresas. 4. Pequenas empresas. 5. Médias empresas.
I. Telles, Renato (orientador). II. Título.

CLEBER GASPAR CORREA DUARTE

**MANUFATURA SUSTENTÁVEL: DIREÇÕES PARA DESENVOLVIMENTO DE
MODELOS DEDICADOS A MPMEs**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Paulista - UNIP,
para obtenção do título de Doutor em Administração.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renato Telles
Universidade Paulista – UNIP

Prof. Dr. Mauro Vivaldini
Universidade Paulista - UNIP

Prof. Dr. Roberto Bazanini
Universidade Paulista - UNIP

Prof. Dr. Milton Carlos Farina
Universidade Municipal de São Caetano do Sul - USCS

Prof. Dr. Marcos Antonio Gaspar
Universidade Nove de Julho - UNINOVE

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, pelo apoio incondicional, e a todos que acreditam no conhecimento como instrumento de transformação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha gratidão às forças superiores que regem a vida e o universo, pela oportunidade de trilhar este caminho acadêmico, pela sabedoria, discernimento e equilíbrio concedidos ao longo desta jornada e pela força necessária para superar os momentos de incerteza, desafios e desânimo.

À minha família, base essencial de sustentação em todos os momentos, agradeço pelo apoio incondicional, pela compreensão nas ausências, pelo incentivo constante e pela confiança depositada em minha trajetória. Este trabalho também é fruto do amor, dos valores e da estrutura que recebi ao longo da vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Renato Telles, manifesto minha gratidão pela orientação, disponibilidade, rigor acadêmico e contribuições valiosas, que foram fundamentais para a conclusão deste estudo.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Paulista (PPGA UNIP), agradeço pela troca de conhecimentos, pelas discussões enriquecedoras e pelo ambiente acadêmico que favoreceu o aprendizado e o desenvolvimento científico.

Aos profissionais, gestores e respondentes que contribuíram com a pesquisa, dedicando seu tempo e compartilhando suas experiências, meu sincero agradecimento, pois sua participação foi essencial para a construção dos resultados apresentados.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, seja por meio de apoio, incentivo, inspiração ou colaboração ao longo desta jornada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“A sabedoria é a aplicação correta do conhecimento.”

(Aristóteles)

RESUMO

A crescente demanda por práticas produtivas sustentáveis tem impulsionado a discussão sobre abordagens de manufatura capazes de integrar desempenho econômico, responsabilidade ambiental e aspectos sociais. Nesse contexto, as micro, pequenas e médias empresas assumem papel relevante, embora enfrentem limitações estruturais, financeiras, tecnológicas e gerenciais que podem dificultar a implementação sistemática dessas práticas. Apesar do avanço da literatura, observa-se a predominância de modelos e frameworks fragmentados, conceituais ou pouco aderentes às especificidades das MPMEs, especialmente em economias emergentes. Diante disso, esta tese tem como objetivo propor avanços conceituais e direções analíticas que subsidiem o desenvolvimento futuro de modelos de avaliação e gestão da manufatura sustentável dedicados às MPMEs, a partir de uma análise crítica da literatura e de evidências empíricas exploratórias. A pesquisa adota abordagem quantitativa, de natureza exploratória, operacionalizada por meio de *survey* aplicado a profissionais, gestores e dirigentes de empresas industriais, totalizando 155 respostas válidas. A análise dos dados compreendeu estatística descritiva, avaliação de confiabilidade e validade, análise de correlação e análise fatorial exploratória, com o propósito de identificar padrões de associação e estruturas latentes entre as dimensões analisadas. Os resultados indicam a existência de agrupamentos fatoriais associados a aspectos estratégico-operacionais e organizacionais, sugerindo possibilidades de interpretação mais parcimoniosa da manufatura sustentável no contexto das MPMEs. As evidências, contudo, devem ser compreendidas como subsídios exploratórios, e não como validação conclusiva de um modelo. O estudo contribui ao sistematizar dimensões, variáveis e direções conceituais para a avaliação da manufatura sustentável em MPMEs, oferecendo fundamentos teórico-empíricos para pesquisas futuras e para o desenvolvimento de abordagens mais adaptadas às características, restrições e necessidades desse segmento empresarial.

Palavras-chave: Manufatura Sustentável; Sustentabilidade Industrial; Microempresas; Pequenas Empresas; Médias Empresas; MPMEs.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable production practices has intensified discussions regarding manufacturing approaches capable of integrating economic performance, environmental responsibility, and social aspects. In this context, micro, small, and medium-sized enterprises (SMEs) play a relevant role, although they face structural, financial, technological, and managerial constraints that may hinder the systematic implementation of such practices. Despite advances in the literature, there is still a predominance of fragmented, conceptual, or weakly contextualized models and frameworks, particularly regarding the specificities of SMEs in emerging economies. In light of this scenario, this dissertation aims to propose conceptual advances and analytical directions that may support the future development of evaluation and management models for sustainable manufacturing dedicated to SMEs, based on a critical literature analysis and exploratory empirical evidence. The research adopts a quantitative and exploratory approach, operationalized through a survey conducted with professionals, managers, and executives from industrial firms, resulting in 155 valid responses. Data analysis involved descriptive statistics, reliability and validity assessment, correlation analysis, and exploratory factor analysis, aiming to identify association patterns and latent structures among the analyzed dimensions. The findings indicate the existence of factorial groupings associated with strategic-operational and organizational aspects, suggesting possibilities for a more parsimonious interpretation of sustainable manufacturing in the context of SMEs. However, these findings should be understood as exploratory evidence rather than as conclusive validation of a model. The study contributes by systematizing dimensions, variables, and conceptual directions for the evaluation of sustainable manufacturing in SMEs, offering theoretical-empirical foundations for future research and for the development of approaches better adapted to the characteristics, constraints, and needs of this business segment.

Keywords: Sustainable Manufacturing; Industrial Sustainability; Microenterprises; Small Enterprises; Medium-Sized Enterprises; SMEs

LISTA DE FIGURAS E ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Integração conceitual da manufatura sustentável	26
Figura 2 - Mapa de Fatores por Escalonamento Multidimensional (MDS)	62
Figura 3 - Evolução das publicações científicas	142
Figura 4 – Inter-relação de termos	148
Figura 5 - Rede de Coautoria (Conexão entre Autores)	150

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Evolução histórica da manufatura verde (Green Manufacturing – GM)	23
Quadro 2 – Síntese dos modelos de manufatura sustentável estudados	31
Quadro 3 - Síntese integradora e transição para MPMEs	38
Quadro 4 - Classificação de empresas no Brasil	44
Quadro 5 – Fundamentos teóricos, evidências empíricas e implicações	69
Quadro 6 – Capacidades organizacionais associadas à manufatura sustentável em MPMEs	71
Quadro 7 – Estratégia de negócio e dimensões da manufatura sustentável em MPMEs	73
Quadro 8 – Resultados empíricos fundamentos e implicações gerenciais	75
Quadro 9 - Resumo dos modelos e estudos manufatura sustentável analisados	90
Quadro 10 - Etapas metodológicas utilizadas	136
Quadro 11 - Chave final de busca	138
Quadro 12 - Modelos por cluster temático e tipo de aplicação	146
Quadro 13- Perspectivas para manufatura sustentável em MPMEs	154
Quadro 14 - Variáveis da dimensão organizacional	155
Quadro 15 - Variáveis da dimensão recursos humanos	156
Quadro 16 - Variáveis da dimensão estratégica	157
Quadro 17 - Variáveis da dimensão econômica	158
Quadro 18 - Variáveis da dimensão operacional	159
Quadro 19 - Variáveis da dimensão inovação tecnológica	160
Quadro 20 - Variáveis da dimensão ambiental	161
Quadro 21 - Níveis de maturidade para análise da manufatura sustentável	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Participação das MPMEs na economia	41
Tabela 2 - Posição competitividade e rankings digitais – Brasil	42
Tabela 3 - Estratégia de envio do questionário e respostas obtidas	50
Tabela 4 - Cargo ou função dos respondentes	51
Tabela 5 - Área de atuação dos respondentes	51
Tabela 6 - Tempo de experiência profissional	52
Tabela 7 - Localização geográfica dos respondentes	52
Tabela 8 - Distribuição de Frequências por Porte	53
Tabela 9 - Estatística descritiva das dimensões analíticas da manufatura sustentável	56
Tabela 10 - Confiabilidade de categorias	57
Tabela 11 - Validade de categorias	58
Tabela 12 - Matriz de correlação entre dimensões	59
Tabela 13 - Análise fatorial para dimensões de avaliação de manufaturas sustentáveis	60
Tabela 14 - Resumo de busca nas bases dados	134
Tabela 15 - Dimensões e variáveis analíticas com autores de referência	135
Tabela 16 - Aplicação do fluxograma do método PRISMA 2020	137
Tabela 17 - Modelos predominantes	141
Tabela 18 - Participação de países, autores e áreas do conhecimento	143
Tabela 19 - Frequência dos Modelos por Tipo Proposto	145
Tabela 20 - Frequência de Dimensões dos modelos de manufatura sustentável	151

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

6R'S	Reduce, Reuse, Recycle, Recover, Redesign, Remanufacture
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ACV	Análise do Ciclo de Vida
AFC	Análise Fatorial Confirmatória
AFE	Análise Fatorial Exploratória
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANN	Artificial Neural Networks
BIG DATA	Análise de grandes volumes de dados
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CNI	Confederação Nacional da Indústria
ESG	Environmental, Social and Governance
FSQCA	Fuzzy-set Qualitative Comparative Analysis
GM	Green Manufacturing
IA	Inteligência Artificial
IIOT	Industrial Internet of Things
IMD	International Institute for Management Development
IOT	Internet of Things
KMO	Kaiser-Meyer-Olkin
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PIB	Produto Interno Bruto
PLS-SEM	Partial Least Squares Structural Equation Modeling
PPGA	Programa de Pós-Graduação em Administração
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
RA	Realidade Aumentada
ROI	Return on Investment
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SEM	Structural Equation Modeling
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
TBL	Triple Bottom Line
UNIP	Universidade Paulista
VOSVIEWER	Software de análise bibliométrica
WOS	Web of Science

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Problema e questão de pesquisa	16
1.2. Objetivos da pesquisa.....	17
1.3. Justificativa	18
1.4. Estrutura do trabalho	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1. Revisão da literatura	20
2.2. Manufatura sustentável.....	21
2.3. Evolução histórica da manufatura sustentável e da manufatura verde	22
2.4. Manufatura Digital 4.0	24
2.5. Manufatura sustentável 4.0.....	26
2.6. Modelos de manufatura sustentável: conceitos e aplicações.....	29
2.7. Modelos, <i>frameworks</i> e estudos de manufatura sustentável.....	30
2.8. Teorias organizacionais de suporte à manufatura sustentável em MPMEs	31
2.8.1. Teoria de stakeholders.....	32
2.8.2. Teoria da contingência	33
2.8.3. Teoria de redes – redes estratégicas.....	35
2.8.4. Integração teórica sob perspectiva das MPMEs	37
2.9. Importância das MPMEs no contexto global e brasileiro	39
2.9.1. Relevância das micro, pequenas e médias empresas no cenário internacional	39
2.9.2. Importância das micro, pequenas e médias empresas no Brasil	40
2.9.3. Participação das MPMEs na economia	40
3. METODOLOGIA DA PESQUISA	45
3.1 Coleta de dados	45
3.2. Considerações metodológicas e limitações.....	47
4. RESULTADOS	49
4.2. Caracterização da Amostra e perfil dos respondentes	50

4.2.1.	Estratégia de coleta de dados e taxa de resposta.....	50
4.2.2.	Perfil e função exercida.....	51
4.2.3.	Área funcional de atuação	51
4.2.4.	Experiência profissional dos respondentes.....	52
4.2.5.	Distribuição geográfica dos respondentes	52
4.2.6.	Síntese analítica da amostra	53
4.3.	Análise de dados	54
4.3.1.	Estatística descritiva.....	55
4.3.2.	Confiabilidade da amostra e subamostras	57
4.3.3.	KMO e esfericidade de Bartlett.....	58
4.3.4.	Correlação entre as dimensões	59
4.3.5.	Análise fatorial.....	60
5.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	64
5.1.	Síntese analítica dos resultados	65
5.2.	Análise crítica dos resultados	69
5.3.	Integração entre dimensões analíticas, variáveis e fundamentos teóricos	70
5.4.	Implicações teóricas	74
5.5.	Implicações gerenciais	76
5.6.	Limitações da pesquisa.....	76
5.7.	Agenda para pesquisas futuras	77
5.8.	Considerações finais.....	78
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICE I - Resumo dos modelos e estudos manufatura sustentável analisados	90
	APÊNDICE II - Análise sistematizada dos modelos e estudos de manufatura sustentável	93
	APÊNDICE III - Instrumento de coleta de dados.....	119
	APÊNDICE IV – Tabela resumo de buscas nas bases de dados	134
	APÊNDICE V - Dimensões e variáveis analíticas com autores de referência	135
	APÊNDICE VI – Revisão da literatura	136

1. INTRODUÇÃO

A intensificação das exigências econômicas, ambientais e sociais tem impulsionado transformações nos sistemas produtivos industriais, ampliando a adoção de práticas produtivas orientadas à sustentabilidade. Nesse contexto, a manufatura sustentável é definida na literatura como uma abordagem integrada, voltada à articulação entre desempenho econômico, responsabilidade ambiental e aspectos sociais, alinhando-se aos princípios do desenvolvimento sustentável e do Triple Bottom Line (Elkington, 1997; Garza-Reyes et al., 2019). Paralelamente, com a incorporação das tecnologias associadas à Indústria 4.0, como Internet das Coisas, Big Data, Inteligência Artificial e sistemas ciberfísicos, verificaram-se avanços significativos na capacidade de monitoramento, integração e otimização dos processos produtivos. Essa convergência entre sustentabilidade e digitalização tem sido denominada Manufatura Sustentável 4.0, configurando um novo paradigma produtivo baseado em eficiência, adaptabilidade e uso intensivo de dados (Ghobakhloo, 2020; Jamwal et al., 2023; Kamble et al., 2018).

Apesar desses avanços, identifica-se que a adoção de práticas de manufatura sustentável ocorre de forma heterogênea entre organizações, especialmente no contexto das MPMEs (Tanco et al., 2021; Jabbour et al., 2018). Essas organizações apresentam elevada representatividade econômica e social, mas operam sob restrições relacionadas à disponibilidade de recursos, capacidade de investimento, maturidade gerencial, nível de digitalização e formalização de processos, fatores que podem limitar a implementação estruturada de práticas sustentáveis (Kamble et al., 2020; Tanco et al., 2021).

Adicionalmente, a literatura evidencia a predominância de modelos conceituais, parcialmente validados empiricamente ou aplicações setoriais específicas, com limitada integração entre dimensões organizacionais e reduzida validação empírica em contextos de economias emergentes (Ghobakhloo, 2020; Bag et al., 2021; Pieroni et al., 2021). Esse cenário indica a existência de lacunas teóricas e empíricas relacionadas à necessidade de modelos estruturados, capazes de integrar múltiplas dimensões e orientar a aplicação prática da manufatura sustentável no contexto das MPMEs.

1.1. Problema e questão de pesquisa

Diante do contexto apresentado, identifica-se uma lacuna relevante na literatura no que se refere à ausência de modelos estruturados e empiricamente orientados que integrem, de forma sistêmica, as dimensões organizacionais, tecnológicas, operacionais, econômicas, humanas e ambientais da manufatura sustentável, considerando as especificidades das MPMEs

(Ghobakhloo, 2020; Bag et al., 2021; Pieroni et al., 2021; Tanco et al., 2021). Embora existam diferentes modelos e frameworks voltados à sustentabilidade industrial e à Indústria 4.0, observa-se que tais abordagens têm se desenvolvido, predominantemente, sob perspectivas fragmentadas ou com foco em dimensões específicas, como tecnologia, desempenho ambiental ou eficiência operacional, sem a devida integração multidimensional necessária para aplicação prática (Jabbour et al., 2018; Kamble et al., 2018; Centobelli et al., 2020).

Adicionalmente, verifica-se que essas abordagens apresentam limitações quanto à aplicabilidade prática, à integração sistêmica entre dimensões e à adequação ao contexto organizacional das MPMEs, especialmente em economias emergentes, onde restrições de recursos, baixa maturidade digital e limitações estruturais influenciam diretamente a adoção de práticas sustentáveis (Kamble et al., 2020; Tanco et al., 2021; Valdez-Juárez et al., 2022; Bag et al., 2023). Nesse sentido, evidencia-se a necessidade de desenvolvimento de modelos mais integrados, adaptativos e empiricamente fundamentados, capazes de orientar tanto a avaliação quanto a gestão da manufatura sustentável em ambientes organizacionais caracterizados por elevada heterogeneidade e restrições estruturais. Em relação a direção orientadora dessa investigação adotou-se a seguinte questão de pesquisa: Como oferecer direções para o desenvolvimento de modelos de avaliação e gestão de manufatura sustentável para MPMEs?

1.2. Objetivos da pesquisa

A presente pesquisa possui como objetivo geral a proposta de avanços conceituais que colaborem na construção de alternativas de adaptação e/ou subsidiem o desenvolvimento futuro de modelos de avaliação e gestão da manufatura sustentável para MPMEs, utilizáveis por essas empresas, reconhecendo-se suas especificidades organizacionais e contextuais, partindo-se de uma análise crítica da literatura. Como objetivos específicos, entendidos como produtos do estudo que oferecem fulcro para alcance do objetivo geral, foram elencados:

- (1)** Identificação e sistematização de dimensões e abordagens relacionadas à manufatura sustentável presentes na literatura;
- (2)** Avaliação crítica da aplicação dos conceitos de manufatura sustentável no contexto das MPMEs;
- (3)** Investigação das relações entre as dimensões da manufatura sustentável no contexto das MPMEs;
- (4)** Investigação de padrões estruturais e relações subjacentes entre as dimensões analisadas, por meio de técnicas estatísticas exploratórias; e

(5) Apresentação de resultados que sustentem o desenvolvimento de abordagens mais parcimoniosas que orientem o desenvolvimento de modelos de manufatura sustentável adaptados às especificidades das MPMEs.

1.3. Justificativa

A relevância desta pesquisa pode ser compreendida em três perspectivas complementares: teórica, metodológica e prática: no plano teórico, o estudo contribui para a organização e integração dos conceitos associados à manufatura sustentável, propondo uma estrutura analítica multidimensional ou diretrizes conceituais fundamentado na Teoria dos Stakeholders, na Teoria da Contingência e na Teoria de Redes.

No plano metodológico, a pesquisa sistematiza uma estrutura teórico-empírica de análise estruturada e um instrumento de mensuração aplicável ao contexto das MPMEs, contribuindo para o avanço de estudos empíricos na área e para a consolidação de métricas de avaliação da sustentabilidade industrial. No plano prático, o estudo oferece subsídios para a análise e a tomada de decisão gerencial, ao fornecer uma estrutura analítica organizada que pode orientar a implementação de práticas sustentáveis em ambientes organizacionais caracterizados por restrições de recursos, elevada heterogeneidade e necessidade de adaptação.

1.4. Estrutura do trabalho

Esta tese está estruturada em cinco capítulos, organizados de forma a articular os fundamentos conceituais, os procedimentos metodológicos, os resultados empíricos e as discussões analíticas relacionadas à manufatura sustentável no contexto das micro, pequenas e médias empresas (MPMEs).

O Capítulo 1 apresenta a introdução da pesquisa, contemplando a contextualização do tema, o problema e a questão de pesquisa, os objetivos, a justificativa teórica e prática, bem como a organização geral do estudo. O Capítulo 2 desenvolve a fundamentação teórica e a revisão da literatura, abordando os conceitos de manufatura sustentável, manufatura digital 4.0 e manufatura sustentável 4.0, além da evolução histórica da sustentabilidade industrial. O capítulo também apresenta os principais modelos e frameworks identificados na literatura, bem como as teorias organizacionais que sustentam a análise proposta, com destaque para a Teoria dos Stakeholders, a Teoria da Contingência e a Teoria das Redes. Adicionalmente, discute-se a relevância das MPMEs no contexto econômico e industrial, enfatizando suas especificidades estruturais e organizacionais.

O Capítulo 3 descreve os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, incluindo o delineamento metodológico, a estratégia de coleta de dados, a definição da amostra, o instrumento de pesquisa e as técnicas estatísticas utilizadas na análise dos dados. O Capítulo 4 apresenta os resultados empíricos obtidos a partir da aplicação do survey, incluindo a caracterização da amostra, as análises descritivas, os testes de confiabilidade e validade, bem como as análises fatoriais e estatísticas exploratórias desenvolvidas no estudo.

Na sequência final do estudo, o Capítulo 5 apresenta a discussão dos resultados à luz da literatura e das teorias organizacionais utilizadas como suporte analítico da pesquisa. O capítulo contempla a síntese analítica dos resultados, a análise crítica das evidências empíricas, a integração entre dimensões analíticas e fundamentos teóricos, bem como as implicações teóricas e gerenciais do estudo. Adicionalmente, são discutidas as limitações da pesquisa, as direções para estudos futuros e as considerações finais, enfatizando contribuições voltadas ao desenvolvimento de abordagens e modelos de manufatura sustentável adaptados às especificidades das MPMEs.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica desta tese tem por finalidade estabelecer a base conceitual necessária para compreender a manufatura sustentável como fenômeno multidimensional, sistêmico e contextualizado, especialmente quando analisado no âmbito das micro, pequenas e médias empresas. Considerando o objetivo da pesquisa de oferecer avanços conceituais e direções para o desenvolvimento de modelos de avaliação e gestão de manufatura sustentável voltados para as MPMEs, este capítulo organiza os principais conceitos, abordagens, modelos e teorias que sustentam a investigação.

Inicialmente, são discutidos os fundamentos da manufatura sustentável e sua evolução histórica, incluindo a transição da manufatura verde para abordagens mais integradas de sustentabilidade industrial. Em seguida, são abordadas a manufatura digital 4.0 e a manufatura sustentável 4.0, destacando-se a convergência entre sustentabilidade, digitalização, inovação tecnológica e eficiência operacional. O capítulo também examina modelos e frameworks identificados na literatura, enfatizando suas contribuições, limitações e lacunas de aplicação no contexto das MPMEs.

Por fim, são apresentadas as teorias organizacionais que oferecem suporte analítico à pesquisa, especialmente a Teoria dos Stakeholders, a Teoria da Contingência e a Teoria de Redes. Essas abordagens permitem interpretar a manufatura sustentável sob uma perspectiva relacional, adaptativa e interorganizacional, coerente com as restrições, heterogeneidade e necessidades específicas das MPMEs. Dessa forma, o capítulo fornece a sustentação conceitual necessária para a análise crítica da literatura, para a interpretação dos resultados empíricos e para a proposição de direções voltadas ao desenvolvimento de modelos dedicados a esse segmento empresarial.

2.1. Revisão da literatura

A revisão da literatura desta pesquisa foi estruturada com o propósito de identificar, sistematizar e analisar criticamente os principais estudos, modelos e abordagens relacionados à manufatura sustentável, com especial atenção à sua aplicabilidade no contexto das micro, pequenas e médias empresas. Para isso, o levantamento bibliográfico foi organizado em três etapas principais: (i) definição dos critérios e protocolos de busca; (ii) análise crítica da amostra de artigos selecionados; e (iii) construção de quadros comparativos destinados à síntese dos avanços, convergências, limitações e lacunas identificadas na literatura revisada.

Essa estrutura permitiu compreender como o campo da manufatura sustentável tem evoluído, desde abordagens predominantemente ambientais e operacionais até perspectivas mais integradas, envolvendo sustentabilidade, tecnologias digitais, gestão organizacional, inovação e desempenho. Além disso, a revisão possibilitou identificar que parte significativa dos modelos existentes ainda apresenta limitações quanto à integração multidimensional, à validação empírica e à aderência às condições estruturais das MPMs.

Considerando a amplitude do levantamento bibliográfico realizado e com o objetivo de preservar maior fluidez textual, objetividade analítica e organização do corpo principal da tese, o detalhamento completo da revisão da literatura foi alocado no Apêndice VI. Essa decisão metodológica permite que o capítulo mantenha foco nos fundamentos conceituais essenciais ao desenvolvimento da pesquisa, sem comprometer o rigor, a rastreabilidade e a transparência científica do processo de revisão.

Assim, a seção de fundamentação teórica apresenta os principais conceitos, modelos e teorias necessários à sustentação do estudo, enquanto o Apêndice VI reúne o detalhamento técnico-operacional da revisão, incluindo procedimentos de busca, critérios de seleção, análise bibliométrica, sínteses comparativas e evidências extraídas da literatura.

2.2. Manufatura sustentável

A manufatura sustentável representa uma abordagem integrada e estratégica voltada à transformação dos sistemas produtivos com base nos princípios do desenvolvimento sustentável. Sua definição evoluiu de uma perspectiva predominantemente ambiental para uma abordagem sistêmica que integra dimensões econômicas, ambientais e sociais, alinhando-se ao conceito do Triple Bottom Line proposto por Elkington (1997), que enfatiza o equilíbrio entre planeta, lucro e pessoas. Segundo Gbededo et al. (2018), a manufatura sustentável pode ser compreendida como a concepção, planejamento e gestão de processos industriais que buscam minimizar impactos ambientais, conservar energia e recursos naturais, assegurar condições seguras de trabalho e manter viabilidade econômica ao longo do ciclo de vida do produto. Essa perspectiva ultrapassa a mera conformidade regulatória e posiciona a sustentabilidade como elemento estruturante da estratégia industrial, conforme destacam Garza-Reyes et al. (2019).

A literatura recente reforça essa visão sistêmica ao evidenciar que a manufatura sustentável requer integração entre práticas tecnológicas, operacionais, organizacionais e sociais para alcançar resultados consistentes e duradouros. Kristoffersen et al. (2021) salientam que, sob o prisma ambiental, a ênfase recai sobre eficiência energética, redução de resíduos e emissões; sob o prisma econômico, sobre produtividade e inovação; e sob o prisma social, a

valorização do capital humano e responsabilidade institucional. Para estruturar e monitorar o progresso dessas práticas, autores como Lim et al. (2022) e Ganjavi et al. (2023) destacam a importância de sistemas de indicadores de sustentabilidade industrial. Tais métricas abrangem eficiência no uso de recursos, emissões, consumo energético, governança e práticas sociais, sendo fundamentais para a tomada de decisão baseada em evidências.

Entretanto, a consolidação da manufatura sustentável enfrenta desafios relevantes, sobretudo em economias emergentes. Pequenas e médias empresas frequentemente apresentam restrições tecnológicas, limitações financeiras e carência de qualificação técnica, conforme apontam Tanco et al. (2021). Essa realidade evidencia a necessidade de modelos estruturados que orientem a adoção sistemática da sustentabilidade no ambiente industrial. Nesse contexto, a manufatura sustentável deixa de ser um diferencial competitivo isolado e passa a representar condição essencial para a perenidade das organizações industriais em cenários caracterizados por transições ecológicas, digitais e institucionais.

2.3. Evolução histórica da manufatura sustentável e da manufatura verde

A Manufatura Sustentável, conforme compreendida atualmente, é resultado de um processo evolutivo contínuo, influenciado por mudanças regulatórias, pressões sociais, avanços tecnológicos e transformações nos modelos de gestão industrial. A literatura evidencia que as práticas sustentáveis na manufatura não emergiram de forma integrada, mas evoluíram gradualmente, partindo de abordagens reativas e pontuais para estratégias organizacionais sistêmicas e orientadas ao desempenho (Garza-Reyes *et al.*, 2019).

Assim, a Manufatura Verde (Green Manufacturing – GM) representa um marco conceitual importante na transição da indústria tradicional para modelos produtivos mais responsáveis. Segundo Rehman *et al.* (2016), essa evolução pode ser compreendida por meio de estágios históricos distintos (Quadro 1) que refletem o amadurecimento das práticas ambientais, sua integração com a eficiência produtiva e, mais recentemente, com a estratégia organizacional.

Quadro 1 - Evolução histórica da manufatura verde (Green Manufacturing – GM)

Período	Foco predominante	Características principais	Enfoque organizacional
1960–1970	<i>End-of-pipe</i>	Tratamento de resíduos e emissões ao final do processo	Reativo / Regulatório
1970–1980	<i>Cradle-to-grave</i>	Avaliação do ciclo de vida do produto	Sistêmico inicial
1980–1990	Redução da pegada de carbono	Eficiência energética e redução de emissões	Operacional
1990–2000	Abordagem dos 6R's	Redesenho de produtos, reutilização e remanufatura	Engenharia e processos
2000–2010	Gestão ambiental e benchmarking	Sistemas de gestão ambiental e indicadores	Gerencial
2010–2020	Estratégias verdes integradas	Sustentabilidade integrada à estratégia e ao desempenho	Estratégico

Fonte: Adaptação de Rehman et al. (2016).

Nos anos 1960, predominou a abordagem denominada “*end-of-pipe*”, caracterizada pelo tratamento de resíduos, efluentes e emissões ao final do processo produtivo. Nesse período, a sustentabilidade era percebida majoritariamente como um custo regulatório, voltado ao atendimento de exigências legais emergentes, sem alterações estruturais nos sistemas produtivos (Rehman et al., 2016). A partir da década de 1970, observa-se a introdução da abordagem *cradle-to-grave*, ampliando o escopo de análise para todo o ciclo de vida do produto. Essa mudança representou um avanço conceitual relevante ao considerar impactos ambientais desde a extração de matérias-primas até o descarte final, alinhando-se às bases da Análise do Ciclo de Vida (ACV) (Rehman et al., 2016).

Durante os anos 1980, o foco deslocou-se para a redução da pegada de carbono, impulsionado pelo fortalecimento da agenda climática global e pela crescente preocupação com o consumo energético e as emissões de gases de efeito estufa. Nesse estágio, a sustentabilidade passou a ser associada à eficiência energética e à redução de custos operacionais, ainda que de forma pouco integrada às estratégias corporativas (Veleza et al., 2001). Na década de 1990, consolidou-se a abordagem dos 6R's (reduce, reuse, recycle, recover, redesign e remanufacture), ampliando o tradicional conceito dos 3R's e introduzindo fundamentos da economia circular na manufatura. Esse período marcou a incorporação da sustentabilidade às decisões de engenharia de produto, redesenho de processos e remanufatura, aproximando práticas ambientais da lógica produtiva (Rehman et al., 2016).

Entre 2000 e 2010, a sustentabilidade tornou-se institucionalizada por meio da adoção de sistemas de gestão ambiental, políticas corporativas, indicadores de desempenho e benchmarking ambiental. A Manufatura Verde passou a ser tratada como um sistema gerencial estruturado, com métricas, auditorias e governança formal, ampliando sua integração com a

gestão organizacional (Garza-Reyes et al., 2019; Rehman et al., 2016). A partir de 2010, evidencia-se a consolidação de estratégias verdes integradas, nas quais a sustentabilidade assume papel central na formulação da estratégia corporativa, no desenvolvimento de cadeias de suprimentos sustentáveis e na inovação orientada ao valor. Nesse estágio, as práticas de Manufatura Verde passam a contribuir diretamente para a vantagem competitiva e para o desempenho organizacional, alinhando-se a conceitos como ESG, gestão de stakeholders e criação de valor compartilhado (Elkington, 1997; Rehman et al., 2016). Essa trajetória evolutiva evidencia que a Manufatura Sustentável 4.0 emerge como resultado natural da maturidade conceitual e prática da Manufatura Verde, ao integrar tecnologias digitais da Indústria 4.0 com estratégias sustentáveis sistêmicas.

2.4. Manufatura Digital 4.0

A manufatura digital 4.0 representa uma transformação estrutural dos sistemas produtivos, impulsionada pela incorporação de tecnologias associadas à Indústria 4.0, caracterizadas pela integração de conectividade em tempo real, automação inteligente, sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas (IoT), Big Data, inteligência artificial (IA) e manufatura aditiva (Ghobakhloo, 2020). Esse processo de digitalização viabiliza operações mais flexíveis, preditivas, autônomas e integradas ao longo da cadeia de valor, ampliando a capacidade de monitoramento, controle e adaptação dos sistemas produtivos.

A compreensão da manufatura digital 4.0 demanda a articulação entre seus componentes tecnológicos, suas funções operacionais e seus efeitos organizacionais, evitando abordagens meramente descritivas. Nesse sentido, a digitalização industrial deve ser analisada como um sistema integrado, no qual tecnologias, processos e decisões operacionais se relacionam de forma dinâmica, influenciando diretamente o desempenho produtivo e a capacidade adaptativa das organizações.

Entre as principais tecnologias associadas a esse paradigma, destaca-se a Internet das Coisas (IoT) e sua vertente industrial (IIoT), que possibilitam a coleta de dados em tempo real a partir de objetos físicos, máquinas e linhas de produção, contribuindo para o monitoramento contínuo, a otimização dos processos produtivos e a identificação de falhas operacionais (Jabbour et al., 2018; Kamble et al., 2018; Centobelli et al., 2020; Reis et al., 2020). De forma complementar, a análise de Big Data permite o processamento de grandes volumes de dados gerados por sistemas interconectados, viabilizando a extração de padrões, o suporte à manutenção preditiva e a melhoria da eficiência produtiva (Müller et al., 2018).

No mesmo sentido, o uso de aprendizado de máquina e inteligência artificial amplia a capacidade analítica dos sistemas produtivos ao permitir a tomada de decisão baseada em dados, a automação de processos e o desenvolvimento de capacidades preditivas (Jabbour et al., 2018; Kamble et al., 2018). Os sistemas ciberfísicos, por sua vez, promovem a integração entre ativos físicos e sistemas digitais, assegurando comunicação contínua e controle em tempo real das operações (Kamble et al., 2018;).

Adicionalmente, tecnologias como realidade aumentada e realidade virtual contribuem para a melhoria da interação homem-máquina, sendo aplicadas em atividades de treinamento, manutenção e design industrial. O uso de blockchain tem sido associado ao aumento da segurança da informação, da transparência e da rastreabilidade ao longo das cadeias produtivas, embora sua adoção ainda apresente níveis diferenciados de maturidade (Joung et al., 2013). A manufatura aditiva, ou impressão 3D, amplia a flexibilidade produtiva ao possibilitar prototipagem rápida, customização e descentralização da produção, com potencial para redução de desperdícios e maior eficiência no uso de materiais (Joung et al., 2013).

Por fim, a computação em nuvem fornece infraestrutura escalável para armazenamento e processamento de dados, ampliando a integração e a colaboração entre agentes da cadeia produtiva (Xu et al.; 2021), enquanto a robótica colaborativa permite a automação de tarefas com maior precisão e segurança, operando de forma integrada com trabalhadores humanos (Xu et al.; 2021). Em conjunto, essas tecnologias configuram a base operacional da manufatura digital 4.0, cuja implementação depende do nível de maturidade tecnológica e das condições organizacionais das empresas.

Segundo Müller et al. (2018), a manufatura digital 4.0 diferencia-se por permitir decisões descentralizadas baseadas em dados em tempo real, elevando a agilidade organizacional e viabilizando a personalização em massa. Além disso, o uso de tecnologias digitais possibilita o desenvolvimento de gêmeos digitais, simulações avançadas, rastreabilidade ampliada e manutenção preditiva, contribuindo para ganhos significativos de eficiência operacional (Xu et al., 2018).

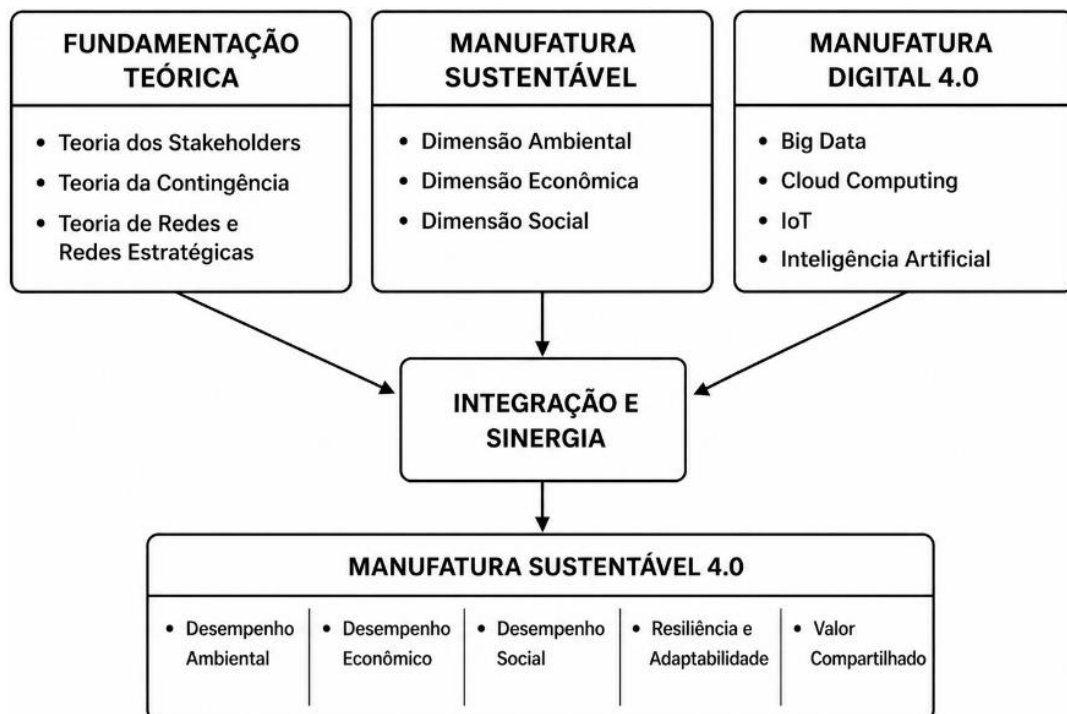
Desse modo, o conceito está diretamente associado à transformação digital da indústria, ao incorporar novos modelos de negócios, estruturas organizacionais e competências digitais (Kamble et al., 2020). Entretanto, a adoção dessas tecnologias ocorre de forma assimétrica, especialmente em economias emergentes. No contexto das MPMEs, fatores como limitações de infraestrutura, restrições financeiras e escassez de mão de obra qualificada tendem a restringir a implementação e a integração dessas tecnologias (Kamble et al., 2020). Nesse contexto, a manufatura digital 4.0 deve ser compreendida como um elemento estruturante sob

uma perspectiva sistêmica e contingencial para o desenvolvimento de modelos de manufatura sustentável, uma vez que influencia diretamente dimensões organizacionais, operacionais e estratégicas. Assim, sua incorporação na presente tese contribui para a formulação de direções analíticas integradas, no qual a digitalização atua como mecanismo viabilizador da eficiência produtiva, da adaptação organizacional e da sustentabilidade em ambientes caracterizados por restrições de recursos, como no caso das MPMEs.

2.5. Manufatura sustentável 4.0

A Manufatura Sustentável 4.0 (Figura 1) consolida-se como um conceito integrador que conecta os princípios da sustentabilidade ambiental, econômica e social às tecnologias digitais emergentes, próprias da Indústria 4.0. Esta abordagem produtiva propõe uma transformação estrutural nas organizações industriais, onde a digitalização não é apenas uma ferramenta operacional, mas um catalisador de práticas produtivas responsáveis, resilientes e inclusivas (Ghobakhloo, 2020; Jamwal et al., 2023).

Figura 1 - Integração conceitual da manufatura sustentável



Fonte: Autor (2025).

Diferentemente dos modelos tradicionais, a Manufatura Sustentável 4.0 combina tecnologias habilitadoras, como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Big Data Analytics, Computação em Nuvem e Manufatura Aditiva, com estratégias sustentáveis

baseadas em ecodesign, economia circular e gestão inteligente de recursos (Kristoffersen et al., 2023). Essa convergência possibilita, por exemplo, otimizar o consumo de energia por meio de algoritmos preditivos, monitorar em tempo real a pegada ambiental dos processos e adaptar linhas de produção com base em análises dinâmicas de dados.

A literatura contemporânea tem destacado que esse modelo surge como resposta a uma combinação de fatores: crescente pressão regulatória, expectativas socioambientais e a busca por diferenciação competitiva em mercados cada vez mais sensíveis às práticas ESG (Bag et al., 2023). Pesquisas recentes apresentam modelos que exploram o uso de machine learning e análise de dados preditiva para direcionar decisões sustentáveis (Acquah et al., 2023), bem como frameworks que integram práticas de Lean Manufacturing, Economia Circular e Indústria 4.0, especialmente voltados para MPMEs (Khan et al., 2023).

Contudo, apesar de seu reconhecido potencial transformador, a adoção da Manufatura Sustentável 4.0 apresenta um conjunto de desafios estruturais que ainda limitam sua difusão, especialmente no contexto das MPMEs em economias emergentes. Entre esses desafios, destacam-se a insuficiência de políticas públicas específicas, as assimetrias no acesso às tecnologias digitais e a ainda reduzida maturidade digital organizacional, fatores que restringem a capacidade de internalização e escalabilidade dessas práticas (Tanco et al., 2021; Valdez-Juárez et al., 2022).

Nesse contexto, a literatura aponta, de forma convergente, um conjunto de benefícios e barreiras que, quando analisados de maneira integrada, permitem compreender tanto o potencial quanto as limitações da Manufatura Sustentável 4.0. No que se refere às contribuições associadas à integração entre sustentabilidade e tecnologias da Indústria 4.0, observa-se um conjunto de benefícios, como:

(Benefício 1) Aumento da eficiência e produtividade operacional, decorrente da automação, da análise de dados em tempo real e da otimização de processos, permitindo a redução de desperdícios e o uso mais racional de recursos produtivos (Jabbour et al., 2018; Bag et al., 2021).

(Benefício 2) Desenvolvimento de modelos de negócio inovadores, com destaque para a servitização, na qual produtos passam a ser ofertados conjuntamente com serviços, como manutenção preditiva e soluções baseadas em desempenho, ampliando a geração de valor e promovendo relações de longo prazo com clientes (Jabbour et al., 2018; Pieroni et al., 2021).

(Benefício 3) Redução de emissões e impactos ambientais, viabilizada pela otimização do consumo energético, pela incorporação de práticas de economia circular e pelo aprimoramento da gestão de resíduos (Jabbour et al., 2021).

(Benefício 4) Melhoria do bem-estar social e do desenvolvimento de competências, uma vez que a digitalização tende a impulsionar a qualificação da força de trabalho e a promover melhores condições laborais, ainda que existam debates quanto aos seus efeitos sobre o nível de emprego (Jabbour et al., 2018; Stock e Seliger, 2016; Pieroni et al., 2021).

(Benefício 5) Aprimoramento do controle dos processos produtivos, possibilitado pelo monitoramento contínuo e pela coleta de dados em tempo real, que permitem a identificação e correção imediata de falhas, reduzindo erros e desperdícios de materiais e energia (Moktadir et al., 2018; Stock e Seliger, 2016).

Por outro lado, a implementação da Manufatura Sustentável 4.0 é condicionada por um conjunto de barreiras que afetam sua efetividade, particularmente nas MPMEs, como:

(Barreira 1) Restrições econômicas e financeiras, frequentemente apontadas como o principal entrave, envolvendo a limitação de recursos, a incerteza quanto aos retornos financeiros e a percepção de elevados custos de implementação, associados à ausência de resultados imediatos e claramente mensuráveis (Singh et al., 2022; Jabbour et al., 2018; Govindan et al., 2020; Garza-Reyes et al., 2018; Moktadir et al., 2018; Khan et al., 2022).

(Barreira 2) Lacunas de conhecimento e competências, evidenciadas pela dificuldade das organizações em compreender e aplicar os habilitadores da manufatura sustentável, bem como pela ausência de capacitação adequada e de formação em sistemas de gestão ambiental (Tiwari et al., 2018; Govindan et al., 2020; Garza-Reyes et al., 2018; Moktadir et al., 2018; Jabbour et al., 2018).

(Barreira 3) Baixo comprometimento gerencial e limitações de liderança, que se manifestam na ausência de engajamento estratégico da alta gestão, bem como em comportamentos organizacionais marcados por inércia e conservadorismo frente à mudança (Govindan et al., 2020; Jabbour et al., 2018; Kamble et al., 2018).

(Barreira 4) Fragilidade institucional e regulatória, caracterizada por políticas públicas, regulamentações e mecanismos de apoio governamental ainda incipientes, especialmente em contextos de economias em desenvolvimento (Govindan et al., 2020; Dubey et al., 2019; Jabbour et al., 2018).

(Barreira 5) Complexidade sistêmica, decorrente da integração de tecnologias, processos e modelos de gestão, que exige a coordenação de múltiplas interdependências organizacionais e pode ser ampliada pela própria incorporação de tecnologias digitais avançadas (Govindan et al., 2020; Jabbour et al., 2018; Sharma et al., 2022).

(Barreira 6) Pressões de mercado e dos stakeholders, que apresentam caráter ambivalente, podendo atuar tanto como indutores quanto como limitadores, especialmente em cenários de baixa conscientização e demanda por produtos sustentáveis (Jabbour et al., 2018).

(Barreira 7) Resistência à mudança organizacional, associada a fatores culturais, estruturais e comportamentais que dificultam a adoção de novas tecnologias e modelos de negócio (Jabbour et al., 2018).

(Barreira 8) Desafios relacionados à segurança e governança de dados, que se intensificam com o aumento da digitalização e da conectividade, exigindo capacidades adicionais de gestão da informação (Jabbour et al., 2018).

Dessa forma, a análise conjunta dos benefícios e das barreiras evidencia que a Manufatura Sustentável deve ser compreendida como um fenômeno multifacetado, cuja implementação depende não apenas da disponibilidade tecnológica, mas também de fatores organizacionais, institucionais e contextuais, reforçando a necessidade de abordagens integradas e contingenciais para sua efetiva adoção nas MPMEs.

Diante desse cenário, a literatura sugere que a adoção de modelos adaptativos, que incorporem não apenas os aspectos tecnológicos, mas também fatores institucionais, culturais e estratégicos, pode constituir uma abordagem potencialmente adequada para compreender e orientar a implementação da Manufatura Sustentável, especialmente em contextos organizacionais caracterizados por elevada heterogeneidade, como o das micro, pequenas e médias empresas.

2.6. Modelos de manufatura sustentável: conceitos e aplicações

Os modelos constituem instrumentos centrais tanto na ciência quanto na prática organizacional, uma vez que permitem representar a realidade, estruturar conceitos, explicar fenômenos e apoiar a tomada de decisão. No campo científico, sua relevância decorre da capacidade de simplificar sistemas complexos, mantendo relações essenciais entre variáveis. Kerlinger (1979) define modelos como representações simplificadas da realidade voltadas à descrição, explicação ou previsão de fenômenos. Kaplan (1964) complementa ao caracterizá-los como instrumentos heurísticos, úteis para organizar ideias e orientar hipóteses de pesquisa, enquanto Bunge (1974) enfatiza que sua validade depende da capacidade explicativa e preditiva. Ackoff e Sasieni (1971) acrescentam que a incorporação de métricas quantitativas amplia sua aplicabilidade ao permitir análises comparativas e projeções.

No campo da administração, a construção de modelos assume papel estruturante na consolidação do conhecimento científico. Dubin (1978) distingue modelos conceituais,

voltados à descrição de categorias e variáveis, de modelos teóricos, orientados à explicação de relações causais. Bacharach (1989) reforça que modelos científicos devem explicitar variáveis, relações e limites, enquanto Whetten (1989) destaca que sua consistência depende da capacidade de responder às questões fundamentais: o quê (variáveis), como (relações), por que (lógica explicativa) e em que contexto (condições de validade). Complementarmente, Colquitt e Zapata-Phelan (2007) ressaltam que a relevância de um modelo está associada simultaneamente à sua originalidade teórica e à sua utilidade empírica.

Sob a perspectiva da manufatura sustentável, identifica-se uma evolução dos modelos ao longo do tempo, partindo de abordagens predominantemente conceituais para estruturas teórico-empíricas orientadas à mensuração e validação. Essa evolução reflete a crescente necessidade de integrar sustentabilidade, tecnologias digitais e desempenho organizacional em modelos capazes de apoiar tanto a análise quanto a implementação prática. Estudos como os de Ghobakhloo (2020) e Bag (2022) ampliam esse escopo ao incorporar elementos da Indústria 4.0 e da economia circular, propondo frameworks que dialogam com a realidade das MPMEs.

Nesse contexto, emergem diferentes perspectivas de modelagem, como (a) Modelos conceituais integradores dedicados à estruturação do fenômeno a partir da articulação entre dimensões ambientais, econômicas e tecnológicas; (b) Modelos quantitativos e híbridos avançam, incorporando técnicas estatísticas e multicritério, como PLS-SEM, fsQCA e AHP, permitindo testar relações entre práticas e desempenho sustentável (Acquah, 2022; Bai, 2020); e (c) Modelos setoriais, evidenciando a necessidade de adaptação às especificidades contextuais, como demonstrado em estudos aplicados aos setores têxtil e automotivo (Chourasiya, 2021; Nascimento et al., 2022).

Além disso, modelos baseados em tecnologias digitais reforçam o papel da inovação como elemento estruturante da sustentabilidade, especialmente a partir do uso de inteligência artificial, Big Data e integração Lean–circular–Indústria 4.0 (Jamwal, 2023; Skalli, 2022). Essas diferentes abordagens sugerem que os modelos de manufatura sustentável desempenham funções complementares ao longo do desenvolvimento científico.

2.7. Modelos, *frameworks* e estudos de manufatura sustentável

A síntese das abordagens sobre manufatura sustentável identificados na literatura está apresentada no Quadro 3, que organiza os modelos segundo categorias analíticas, destacando autores, perspectivas, focos centrais, contribuições e limitações. As informações presentes no Quadro 3 desempenha função central na análise, ao permitir uma visão comparativa estruturada dos diferentes modelos, enquanto o detalhamento completo encontra-se nos Apêndices I e II.

A análise do Quadro 3 evidencia a recorrência de dimensões organizacionais, tecnológicas, operacionais e ambientais nos modelos estudados, bem como limitações associadas à validação empírica, à generalização dos resultados e à complexidade de implementação. Essas lacunas reforçam a necessidade de desenvolvimento de modelos teórico-empíricos integrados, capazes de articular múltiplas dimensões e orientar sua aplicação em contextos organizacionais específicos.

Nesse sentido, a sistematização apresentada no (Quadro 2) não apenas sintetiza o estado da arte da literatura, mas também fundamenta a proposição de direções para modelos adaptativos, ao evidenciar a necessidade de abordagens voltadas ao contexto das MPMEs.

Quadro 2 – Síntese dos modelos de manufatura sustentável estudados

Categoria de Modelo	Principais Autores	Abordagem	Foco Central	Contribuição Principal	Limitação Recorrente
Modelos Conceituais Integradores	Bag (2022); Ghobakhloo (2020); Sartal (2020)	Teórico	Integração I4.0, sustentabilidade e economia circular	Estruturação conceitual sistêmica	Baixa validação empírica
Modelos Quantitativos e Híbridos	Acquah (2022); Bai (2020); Rahman (2022); Xu (2022)	Empírico (SEM, AHP, ANN)	Relações entre práticas e desempenho sustentável	Validação estatística e análise multivariada	Alta complexidade metodológica
Modelos Setoriais Aplicados	Chourasiya (2021); Nascimento et al. (2022); Moktadir (2020)	Empírico setorial	Aplicação em contextos específicos	Adaptação a realidades industriais	Baixa generalização
Modelos Baseados em Tecnologias Digitais	Jamwal (2023); Huang (2022); Luu (2023)	Empírico tecnológico	Uso de IA, IoT e Big Data	Eficiência operacional e previsão	Dependência tecnológica elevada
Modelos de Barreiras e Facilitadores	Bhanot (2020); Tanco (2021); Prause (2021)	Qualitativo estrutural	Identificação de entraves à adoção	Priorização de fatores críticos	Ausência de mensuração integrada
Modelos de Integração Lean, Circular e I4.0	Ciliberto (2022); Khanzode (2021); Skalli (2022)	Conceitual empírico	Integração de abordagens produtivas	Visão sistêmica de eficiência sustentável	Complexidade de implementação

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

2.8. Teorias organizacionais de suporte à manufatura sustentável em MPMEs

A fundamentação teórica constitui elemento essencial para conferir estrutura, coerência e orientação ao desenvolvimento da pesquisa científica. Nesse sentido, a teoria fornece o arcabouço conceitual necessário para compreender, interpretar e analisar os dados obtidos, além de contribuir para a validação e credibilidade dos resultados da investigação. Conforme destaca Neuman (2014), uma fundamentação teórica consistente auxilia na organização lógica da

pesquisa, oferecendo suporte à formulação do problema, à definição das variáveis e à interpretação das evidências empíricas. Dessa forma, a teoria atua como base estruturante do processo científico, fornecendo contexto analítico e sustentação para as conclusões do estudo

2.8.1. Teoria de stakeholders

A Teoria dos Stakeholders, proposta por R. Edward Freeman em sua obra clássica *Strategic Management: A Stakeholder Approach* (1984), representa um marco conceitual na evolução da gestão estratégica ao romper com a visão tradicional centrada exclusivamente nos acionistas. Freeman argumenta que uma organização deve considerar, de forma deliberada e sistemática, os interesses de todos os grupos que podem afetar ou ser afetados por suas atividades. Nesse sentido, stakeholders são definidos como “qualquer grupo ou indivíduo que pode influenciar ou ser influenciado pelo alcance dos objetivos organizacionais”, abrangendo desde acionistas e empregados até clientes, fornecedores, comunidades locais, governos e organizações da sociedade civil (Freeman, 1984).

Esse arcabouço teórico desloca o foco gerencial da maximização do valor para os acionistas para uma abordagem mais inclusiva e relacional, reconhecendo que a sustentabilidade do negócio está intrinsecamente ligada à criação de valor compartilhado. De acordo com Freeman, Harrison e Wicks (2007), as empresas que cultivam relacionamentos éticos e colaborativos com seus stakeholders estão mais bem posicionadas para enfrentar os desafios do ambiente contemporâneo, caracterizado por complexidade, dinamicidade e maior exigência por responsabilidade social e ambiental.

A literatura reforça a relevância da teoria no contexto da sustentabilidade e da governança corporativa. Para Donaldson e Preston (1995), a Teoria dos Stakeholders deve ser compreendida em três dimensões: descritiva, instrumental e normativa. Descritivamente, ela retrata como as empresas realmente operam em redes de relacionamentos interdependentes. Instrumentalmente, sugere que organizações que atendem aos interesses dos stakeholders tendem a ter melhor desempenho econômico. Normativamente, sustenta que atender aos stakeholders é uma obrigação moral da empresa.

Essa perspectiva é particularmente relevante para o debate sobre responsabilidade corporativa, uma vez que sustenta a necessidade de uma gestão que integre preocupações sociais e ambientais às decisões econômicas. Donaldson e Preston (1995) reforça que os stakeholders primários como empregados, clientes e investidores são essenciais para a sobrevivência da empresa, enquanto os secundários, como a mídia e ONGs, influenciam seu ambiente operacional e reputação.

Na prática, a adoção da lógica dos stakeholders exige uma mudança no modo como as empresas medem o sucesso, incorporando indicadores não financeiros, como satisfação dos colaboradores, impactos ambientais, engajamento comunitário e ética nas relações comerciais. Essa abordagem amplia o escopo da gestão estratégica, promovendo a resiliência organizacional e favorecendo a construção de valor sustentável no longo prazo (Freeman et al., 2010). A Teoria dos Stakeholders convida as organizações a reconhecerem sua interdependência com múltiplos atores sociais, promovendo decisões mais equilibradas e legitimadas, o que é essencial para a longevidade corporativa em uma sociedade cada vez mais conectada e consciente.

A literatura recente consolida a Teoria dos Stakeholders como um dos principais arcabouços explicativos da sustentabilidade organizacional, especialmente em contextos industriais e em MPMEs. Estudos recentes demonstram que pressões exercidas por stakeholders internos e externos influenciam diretamente a adoção de práticas sustentáveis, incluindo economia circular e gestão sustentável da cadeia de suprimentos. Evidências empíricas indicam que tais pressões atuam como moderadores relevantes no desempenho organizacional, reforçando o papel estratégico da gestão de stakeholders na sustentabilidade empresarial (Ahmadov et al., 2025; Li et al., 2025). Além disso, a literatura mais recente destaca que a teoria evoluiu de uma abordagem normativa para um componente central da estratégia organizacional, sendo integrada a outras perspectivas como a RBV e capacidades dinâmicas, reforçando a criação de valor compartilhado como elemento central da sustentabilidade (Arrosyid et al., 2026).

2.8.2. Teoria da contingência

A Teoria da Contingência emergiu como uma resposta crítica às limitações das abordagens clássicas da administração, especialmente aquelas que defendiam princípios universais de gestão. Seu principal argumento é que não há uma única maneira ideal de organizar ou gerenciar uma empresa; em vez disso, a eficácia organizacional depende do alinhamento entre variáveis internas — como estrutura, processos e tecnologia — e fatores externos, como ambiente competitivo, mercado e regulamentação (Lawrence e Lorsch, 1967).

Diferentemente de modelos prescritivos e normativos, a Teoria da Contingência valoriza a flexibilidade, sugerindo que o sucesso de uma organização está diretamente ligado à sua capacidade de se adaptar às condições específicas e mutáveis de seu ambiente. Nesse sentido, ela oferece um arcabouço analítico robusto que apoia a tomada de decisões estratégicas mais

contextualizadas, levando em conta aspectos como incerteza ambiental, complexidade tecnológica, tamanho organizacional e cultura institucional (Lawrence e Lorsch, 1967).

Um dos fundamentos dessa teoria é o conceito de “ajuste organizacional”, ou seja, o grau de coerência entre os elementos organizacionais e os desafios externos enfrentados. Segundo Galbraith (1973), uma organização que opera em ambientes estáveis pode funcionar eficientemente com estruturas rígidas e hierarquizadas, enquanto aquelas inseridas em contextos instáveis demandam estruturas mais orgânicas, descentralizadas e adaptáveis.

Essa abordagem tornou-se particularmente relevante em contextos modernos caracterizados por transformações tecnológicas rápidas, globalização e mudanças regulatórias. Em setores como manufatura, logística e serviços, por exemplo, a Teoria da Contingência tem sido aplicada para justificar modelos organizacionais mais flexíveis, com redes colaborativas, inovação contínua e estratégias de resposta ágil ao mercado (Donaldson, 2006).

Ao reconhecer a inexistência de uma solução padrão, essa teoria favorece a personalização e a experimentação estratégica, aspectos essenciais para a sobrevivência em mercados competitivos e voláteis.

Além disso, a Teoria da Contingência contribui para o entendimento da eficácia organizacional não apenas como um fim estático, mas como um processo dinâmico de constante alinhamento. Isso exige dos gestores competências analíticas, capacidade de leitura do ambiente externo e sensibilidade para ajustar estruturas e práticas de acordo com os objetivos e restrições contextuais.

A literatura contemporânea tem reforçado a relevância da Teoria da Contingência como um dos principais arcabouços explicativos da adaptação organizacional em ambientes caracterizados por elevada incerteza, complexidade e transformação tecnológica. Estudos recentes destacam que o conceito de “ajuste organizacional” evoluiu para além da simples correspondência entre estrutura e ambiente, incorporando dimensões como digitalização, capacidade de inovação e resiliência organizacional.

Nesse sentido, a eficácia organizacional passa a ser compreendida como resultado da capacidade dinâmica das empresas em reconfigurar seus recursos, processos e estruturas em resposta a mudanças contínuas no ambiente competitivo e institucional. Essa perspectiva amplia o escopo da teoria ao integrá-la a abordagens contemporâneas que enfatizam adaptação contínua, aprendizagem organizacional e flexibilidade estratégica.

Adicionalmente, evidências empíricas recentes indicam que organizações que adotam configurações contingenciais mais flexíveis especialmente em contextos de transformação digital e inovação apresentam desempenho superior em termos de eficiência operacional,

capacidade adaptativa e sustentabilidade de longo prazo (Ahmadov et al., 2025; Li et al., 2025; Arrosyid et al., 2026).

Em ambientes industriais, particularmente em micro, pequenas e médias empresas, a aplicação da Teoria da Contingência tem sido associada à adoção de estruturas mais descentralizadas, integração de tecnologias digitais e maior agilidade na tomada de decisão.

Dessa forma, a teoria consolida-se como um fundamento analítico robusto para o desenvolvimento de modelos organizacionais adaptativos, nos quais o alinhamento entre contexto, estratégia e estrutura constitui um elemento central para a competitividade e a sustentabilidade organizacional.

Em síntese, a Teoria da Contingência oferece uma visão realista e pragmática da gestão, ao defender que a melhor estrutura ou estratégia depende das circunstâncias específicas de cada organização. Essa perspectiva ajuda as empresas a lidar com a complexidade crescente do ambiente de negócios, promovendo decisões mais coerentes, adaptativas e eficazes no longo prazo.

2.8.3. Teoria de redes – redes estratégicas

A Teoria de Redes, especialmente no que diz respeito às redes estratégicas, oferece um olhar diferenciado sobre as formas contemporâneas de organização e cooperação interorganizacional. Diferente de modelos tradicionais baseados na hierarquia ou no mercado, essa abordagem enfatiza que as relações de troca e colaboração entre empresas podem constituir estruturas organizacionais próprias, capazes de gerar vantagens competitivas sustentáveis (Powell, 1990).

No cerne dessa teoria está a ideia de que as organizações não atuam isoladamente, mas inseridas em um sistema relacional no qual trocam recursos, conhecimentos, tecnologias e práticas. Essas redes estratégicas podem assumir diferentes configurações — alianças, consórcios, joint ventures, clusters, parcerias tecnológicas — e são construídas com o objetivo de acessar competências complementares, reduzir incertezas e promover inovação (Gulati, 1998). O capital social, entendido como o valor oriundo das conexões e da confiança entre os atores, é um dos ativos centrais nessas estruturas (Nahapiet e Ghoshal, 1998).

A dinâmica das redes interorganizacionais tem sido amplamente reconhecida como elemento central para a disseminação de práticas organizacionais, o aprendizado coletivo e a promoção da inovação. Nesse campo, destacam-se contribuições que evidenciam o papel das redes como estruturas facilitadoras da interação e da construção coletiva de conhecimento (Powell, 1990).

As redes operam como importantes canais de influência institucional, nos quais normas, rotinas e padrões de comportamento são compartilhados e difundidos entre as organizações, contribuindo para a convergência de práticas e para a legitimação de modelos organizacionais (Powell e DiMaggio, 1991).

Adicionalmente, a governança em rede revela-se particularmente eficaz em ambientes caracterizados pela necessidade de inovação contínua, na medida em que favorece o fluxo de conhecimento tácito, a interação entre atores e a experimentação conjunta (Powell, 1990; Provan; Kenis, 2008).

Do ponto de vista estratégico, as redes permitem que empresas ampliem suas capacidades sem necessidade de internalizar todos os recursos. Isso é especialmente relevante para organizações de menor porte, como as MPMEs, que muitas vezes enfrentam limitações em termos de capital, tecnologia e conhecimento. Ao participar de redes estratégicas, essas empresas podem alcançar maior escala, flexibilidade e acesso a mercados, ao mesmo tempo em que fortalecem sua resiliência (Powell, 1990; Provan; Kenis, 2008).

Além disso, a dinâmica das redes estratégicas requer formas específicas de coordenação, com ênfase em mecanismos relacionais como confiança, reciprocidade e reputação, em contraste com contratos rígidos ou mecanismos de controle hierárquico (Provan e Kenis, 2008). Tais redes desafiam os modelos clássicos de governança ao propor uma lógica mais horizontal, baseada em interdependência e valor compartilhado.

A contribuição da Teoria de Redes e as redes estratégicas é relevante para o entendimento de como organizações podem construir vantagens competitivas por meio da colaboração. Ao mapear e ativar relações interorganizacionais, as empresas não apenas expandem suas capacidades, mas também reforçam sua adaptabilidade e inovação em contextos cada vez mais complexos e interconectados.

A literatura contemporânea evidencia que redes estratégicas desempenham papel essencial na viabilização da sustentabilidade, especialmente em organizações com restrições estruturais, como as MPMEs. Estudos recentes demonstram que a colaboração interorganizacional favorece a inovação sustentável, o compartilhamento de conhecimento e a adoção de práticas de economia circular, funcionando como mecanismo de compensação de limitações internas (Khan; Majava, 2021; Ahmadov et al., 2025).

Em síntese, evidências recentes indicam que as redes organizacionais ampliam a capacidade adaptativa das empresas ao promoverem interdependência, colaboração e co-criação de valor sustentável. Esse papel torna-se ainda mais relevante em ecossistemas

produtivos complexos e dinâmicos, nos quais a articulação entre múltiplos atores favorece respostas mais ágeis e integradas às mudanças do ambiente (Herzallah et al., 2025).

2.8.4. Integração teórica sob perspectiva das MPMEs

A construção de modelos teóricos robustos requer, conforme Bacharach (1989), a explicitação clara dos construtos e das relações que estruturam o fenômeno de estudo. Para Lawrence Neuman (2014), a teoria é o elemento que dá estrutura, orientação e contexto à pesquisa, funcionando como um alicerce que sustenta todas as etapas do processo científico, desde a formulação das perguntas até a interpretação dos resultados.

Assim, a sustentação teórica não apenas legitima o modelo, mas também fortalece sua validade e capacidade de generalização empírica (Hair et al., 2019). A abordagem analítica adotada nesta tese tem como base epistemológica a integração sistêmica de três teorias fundamentais da Administração:

1. Teoria dos stakeholders (Freeman, 1984);
2. Teoria da contingência (Lawrence; Lorsch, 1967; Donaldson, 2001);
3. Teoria das redes - redes estratégicas (Powell, 1990; Gulati, 1998);

Essas abordagens, quando articuladas, permitem compreender a manufatura sustentável sob uma lógica multidimensional, relacional e adaptativa, integrando variáveis organizacionais, tecnológicas, econômicas, sociais e ambientais. Na estrutura analítica proposta, cada teoria desempenha uma função específica e complementar, sustentando as sete dimensões analíticas da manufatura sustentável em MPMEs (organizacional, recursos humanos, estratégica, econômica, operacional, tecnológica e ambiental).

A Teoria dos stakeholders (Freeman, 1984) fornece o eixo normativo e legitimador da estrutura analítica adotada. Ela estabelece que a criação de valor organizacional deve considerar o equilíbrio entre os interesses de todos os grupos que afetam ou são afetados pela empresa, indo além da visão restrita de geração de lucro. Essa perspectiva sustenta as dimensões estratégica, social e ambiental da estrutura analítica, ao reconhecer a importância da legitimidade social e da responsabilidade corporativa para a sustentabilidade de longo prazo (Donaldson; Preston, 1995; Freeman; Harrison; Wicks, 2007).

Estudos recentes reforçam essa compreensão ao indicar que a integração dos stakeholders aos processos decisórios contribui para a inovação sustentável, para o fortalecimento das capacidades organizacionais e para a construção de resiliência em contextos de maior complexidade socioambiental (Lopes de Sousa Jabbour et al., 2022; Jamwal et al., 2023).

A Teoria da contingência constitui um dos principais referenciais para compreender a eficácia organizacional em ambientes complexos, ao afirmar que não existe uma estrutura única de gestão aplicável a todas as organizações. Seu pressuposto central baseia-se no alinhamento entre variáveis internas como estrutura, processos e tecnologia e fatores externos, incluindo ambiente competitivo, incerteza e dinamismo do mercado (Lawrence; Lorsch, 1967; Donaldson, 2001).

Nesse contexto, o conceito de “ajuste organizacional” (fit) é fundamental, indicando que o desempenho depende da coerência entre estratégia, estrutura e condições ambientais específicas. A literatura recente amplia essa abordagem ao incorporar transformação digital, inovação e sustentabilidade, evidenciando que organizações mais flexíveis, com estruturas descentralizadas e integração tecnológica, apresentam maior capacidade adaptativa e desempenho superior (Li et al., 2025). Em MPMEs, essa perspectiva orienta decisões estratégicas mais aderentes ao contexto, favorecendo eficiência e resiliência.

A Teoria das redes (Powell; Dimaggio, 1991) fornece o arcabouço relacional e colaborativo que sustenta a difusão da inovação, da digitalização e da sustentabilidade. Essa teoria explica como as organizações, especialmente as MPMEs, podem alcançar maior capacidade competitiva ao integrar-se em ecossistemas de inovação compostos por empresas, universidades, centros de pesquisa, governo e sociedade civil.

Assim, ela fundamenta a dimensão tecnológica e de inovação da estrutura analítica multidimensional destacando que a transição para uma manufatura sustentável é mais bem sucedida quando baseada em cooperação, confiança e aprendizado coletivo (Gulati, 1998; Skalli et al., 2021). A articulação das teorias organizacionais discutidas anteriormente proporciona, assim, uma estrutura epistemológica consistente que sustenta a análise da manufatura sustentável em MPMEs. tanto no plano conceitual quanto no plano empírico. cada teoria contribui de modo específico e complementar, conforme sintetizado no (Quadro 3).

Quadro 3 - Síntese integradora e transição para MPMEs		
Teoria	Papel epistemológico na análise da manufatura sustentável em MPMEs	Conexão Dimensional Estruturante
Teoria dos Stakeholders	Fundamenta a incorporação de demandas institucionais, sociais e ambientais à lógica estratégica e organizacional da empresa	Estratégica, Recursos Humanos, Ambiental
Teoria da Contingência	Sustenta a adequação da estrutura analítica às variáveis contextuais, tecnológicas e ambientais específicas das MPMEs	Organizacional, Operacional, Econômica

Teoria	Papel epistemológico na análise da manufatura sustentável em MPMEs	Conexão Dimensional Estruturante
Teoria das Redes	Explica a dinâmica de cooperação, inovação aberta e difusão tecnológica no ecossistema industrial	Inovação Tecnológica, Estratégica

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Dessa forma, a estrutura analítica desenvolvida nesta pesquisa contribui para a compreensão multidimensional da manufatura sustentável em MPMEs, ao integrar sustentabilidade, digitalização e fatores organizacionais sob uma perspectiva sistêmica. Conforme argumentam Hair et al. (2019), abordagens conceitualmente consistentes apresentam maior robustez analítica quando submetidas à investigação empírica, uma vez que a coerência teórica constitui elemento fundamental para a interpretação dos fenômenos organizacionais complexos. Nesse sentido, a presente tese não se propõe à formulação de um modelo prescritivo definitivo, mas à sistematização de fundamentos conceituais, relações dimensionais e evidências empíricas que possam subsidiar o desenvolvimento futuro de abordagens e modelos adaptados às especificidades das micro, pequenas e médias empresas.

2.9. Importância das MPMEs no contexto global e brasileiro

As micro, pequenas, e médias empresas desempenham papel central na dinâmica econômica global, sendo amplamente reconhecidas como motores de geração de emprego, renda e inovação. No contexto contemporâneo, caracterizado por transformações tecnológicas associadas à Indústria 4.0 e à crescente demanda por sustentabilidade, essas organizações assumem importância estratégica ainda mais relevante, especialmente em economias emergentes como o Brasil.

Segundo evidências empíricas consolidadas por organismos internacionais, as MPMEs representam a maior parte do tecido empresarial mundial, contribuindo significativamente para o Produto Interno Bruto (PIB) e, sobretudo, para a geração de empregos formais (OECD, 2023; World Bank, 2022). Contudo, observa-se que, embora predominem em número, sua contribuição relativa para o PIB tende a ser inferior quando comparada às grandes empresas, refletindo desafios estruturais relacionados à produtividade, inovação e acesso a recursos.

2.9.1. Relevância das micro, pequenas e médias empresas no cenário internacional

No âmbito global, estudos da OCDE (OECD, 2023) indicam que as MPMEs representam aproximadamente 90% das empresas e são responsáveis por cerca de 50% do emprego mundial. Em economias desenvolvidas, como as da União Europeia e dos Estados

Unidos, esse segmento apresenta elevada participação tanto em número de empresas quanto em geração de valor.

Na União Europeia, as PMEs representam cerca de 99,8% das empresas, respondendo por aproximadamente 56% do PIB e 67% do emprego total. Já nos Estados Unidos, pequenas empresas correspondem a cerca de 99,9% das firmas, contribuindo com aproximadamente 44% do PIB e 47,3% dos empregos (European Commission, 2022; U.S. SBA, 2022).

Esses dados evidenciam que, em economias mais maduras, as MPMEs conseguem converter sua representatividade numérica em maior participação econômica relativa, refletindo maior eficiência produtiva, capacidade de inovação e integração em cadeias globais de valor.

2.9.2. Importância das micro, pequenas e médias empresas no Brasil

No Brasil, as MPMEs possuem papel ainda mais expressivo em termos de estrutura empresarial e impacto social. Conforme dados do SEBRAE (2023), representando aproximadamente 99% das empresas formais, contribuindo com cerca de 30% do PIB nacional e responsáveis por aproximadamente 54% dos empregos formais no setor privado.

Apesar da elevada participação no número de empresas e na geração de empregos, verifica-se uma discrepância significativa entre representatividade e contribuição para o PIB, quando comparado a países desenvolvidos. Essa diferença indica uma lacuna de produtividade, frequentemente associada a fatores como:

- a) Baixo nível de digitalização;
- b) Limitações tecnológicas;
- c) Restrições de acesso a crédito;
- d) Deficiências em capacitação gerencial;
- e) Baixa integração em redes produtivas e cadeias globais.

2.9.3. Participação das MPMEs na economia

Uma síntese comparativa da participação das MPMEs no Brasil, União Europeia e Estados Unidos, é apresentada na (Tabela 1) evidenciando diferenças estruturais relevantes.

Tabela 1 - Participação das MPMEs na economia

Indicador	Brasil	União Europeia	EUA
Participação no total de empresas	99%	99,80%	99,90%
Participação no PIB	~30%	~56%	~44%
Participação no emprego	~54%	~67%	~47,3%

Fonte: SEBRAE (2023); European Commission (2022); U.S. Small Business Administration (2022).

As MPMEs constituem o principal alicerce da estrutura econômica global e brasileira, desempenhando papel fundamental na geração de emprego e dinamização da economia. Contudo, a análise comparativa evidencia que o Brasil ainda enfrenta desafios significativos relacionados à produtividade e geração de valor.

Esse contexto reforça a relevância de aprofundar a análise crítica da literatura sobre manufatura sustentável, especialmente no âmbito das MPMEs, considerando suas limitações estruturais, tecnológicas e gerenciais. Nesse sentido, a presente tese busca contribuir com a proposição de direções conceituais voltadas ao desenvolvimento de modelos de manufatura sustentável mais aderentes às características, necessidades e capacidades das micro, pequenas e médias empresas, particularmente diante das transformações associadas às tecnologias da Indústria 4.0.

2.10. Desafios para o setor industrial no Brasil

A competitividade digital é uma dimensão estratégica para o desenvolvimento industrial e econômico do Brasil. O IMD World Digital Competitiveness Ranking mede anualmente a capacidade de 67 economias para adotar e explorar tecnologias digitais com vistas à transformação econômica e social. O ranking se estrutura em três pilares principais: Conhecimento, Tecnologia e Preparação para o Futuro (IMD, 2024).

2.10.1. Situação atual e evolução do Brasil no ranking digital

A evolução da posição brasileira no ranking global de competitividade digital ao longo dos últimos cinco anos é apresentada na (Tabela 2). Observa-se que, em 2024, o Brasil ocupou a 57ª posição no ranking de competitividade digital elaborado pelo International Institute for Management Development (IMD), mantendo o posicionamento registrado em 2023. Esse resultado evidencia relativa estabilidade do país no cenário internacional, embora ainda

permaneça distante das economias líderes em transformação digital e competitividade tecnológica. Isso representa uma queda em comparação a 2020 e 2021, quando ocupava a 51ª posição, sinalizando uma estagnação no avanço da digitalização e na competitividade digital do país, especialmente se comparado a economias de porte semelhante e até mesmo dentro da América Latina.

Tabela 2 - Posição competitividade e rankings digitais – Brasil

INDICADOR	2020	2021	2022	2023	2024
GERAL	51	51	52	57	57
Conhecimento	57	51	51	57	56
Tecnologia	57	55	55	60	60
Preparação futura	43	45	47	52	53

Fonte: IMD World Digital / Competitiveness Ranking (2023).

O fato de o Brasil permanecer na 57ª posição em 2024, conforme confirmação da IMD, evidencia estagnação em termos de competitividade digital global. Esse cenário é preocupante, principalmente quando comparado a países latino-americanos que possuem melhores desempenhos como o Chile na 42ª posição e também dentro do grupo dos BRICS, onde o Brasil figura atrás de China, Índia e África do Sul.

Dados da CNI revelam que apenas 48% das indústrias utilizavam ao menos uma tecnologia da Indústria 4.0 em 2016, índice que sobe para 63% nas grandes empresas e cai para 25% nas pequenas (CNI, 2016). Esse descompasso entre os portes empresariais limita a modernização sistêmica da cadeia industrial.

Estudos prospectivos estimam que até 2025 a implementação de soluções da Indústria 4.0 pode gerar reduções de até 40% nos custos de manutenção, economia de 20% no consumo de energia e aumento de até 25% na eficiência do trabalho. Isso poderia resultar em um impacto positivo de até US\$ 39 bilhões no PIB brasileiro até 2030 (CNI, 2025; ABDI, 2023).

O Brasil, apesar de seus ativos em educação pública e capacidade científica, ainda enfrenta uma lacuna significativa na transformação digital da indústria, especialmente no que se refere à infraestrutura tecnológica, qualificação de profissionais e políticas de incentivo. O enfrentamento desses desafios requer uma estratégia coordenada entre governo, setor produtivo e instituições de ensino para fomentar um ecossistema industrial mais competitivo, resiliente e alinhado com os paradigmas da Indústria 4.0.

A crescente complexidade dos desafios socioambientais e a pressão por maior eficiência operacional têm impulsionado organizações industriais especialmente MPMEs a repensarem seus processos produtivos à luz dos princípios da sustentabilidade e da transformação digital.

Nesse contexto, a abordagem de manufatura sustentável emerge como uma abordagem integrativa, que combina tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 com práticas e estratégias orientadas à sustentabilidade ambiental, social e econômica.

2.10.2. Classificação de empresas no Brasil (SEBRAE, BNDES e tributação)

A adequada compreensão da classificação das empresas por porte constitui elemento essencial para análises acadêmicas e formulação de políticas públicas voltadas ao fortalecimento das MPMEs. O enquadramento das organizações em diferentes categorias é adotado por instituições de fomento, órgãos governamentais e entidades de apoio empresarial, permitindo não apenas uma padronização conceitual, mas também o direcionamento de políticas de crédito, programas de capacitação e incentivos fiscais.

Segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), a classificação dos clientes empresariais por porte é realizada em função da Receita Operacional Bruta (ROB) anual ou, no caso de pessoas físicas, pela renda anual. Essa diferenciação possibilita ao banco estruturar linhas de financiamento, condições de crédito e programas específicos de acordo com as características e limitações de cada segmento.

Em razão de seu papel estratégico na economia brasileira, o apoio às MPMEs é considerado prioritário pelo BNDES, sendo ofertadas condições especiais que buscam ampliar o acesso ao crédito e estimular o crescimento sustentável dessas organizações (BNDES, 2023).

O Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE) adota, por sua vez, uma classificação baseada essencialmente no número de empregados e na receita bruta anual. No caso das indústrias, são consideradas microempresas aquelas que possuem até 19 empregados; pequenas indústrias, de 20 a 99 empregados; e médias indústrias, de 100 a 499 empregados.

Além disso, o enquadramento também pode ser realizado com base na receita bruta anual, de acordo com a Lei Complementar nº 123/2006 (Lei Geral da Micro e Pequena Empresa), que define como microempresa (ME) aquelas com faturamento de até R\$ 360 mil anuais, e como empresas de pequeno porte (EPP) aquelas com receita anual superior a R\$ 360 mil e inferior ou igual a R\$ 4,8 milhões (SEBRAE, 2022).

Do ponto de vista fiscal-tributário, o enquadramento empresarial está associado ao regime de tributação e ao faturamento declarado. As micro e pequenas empresas podem optar

pelo Simples Nacional, regime simplificado de arrecadação que unifica tributos federais, estaduais e municipais em uma única guia. Já as médias empresas são comumente enquadradas no regime de Lucro Presumido ou Lucro Real, conforme sua Receita Operacional Bruta anual. Empresas com faturamento superior a R\$ 300 milhões são classificadas como grandes empresas, obrigatoriamente tributadas pelo regime de Lucro Real.

Essas classificações podem ser compreendidas a partir de diferentes critérios institucionais e econômico-financeiros adotados no contexto brasileiro, envolvendo parâmetros relacionados ao faturamento, enquadramento tributário e características operacionais das empresas. De forma comparativa, os critérios utilizados pelo SEBRAE, pelo BNDES e pela classificação fiscal-tributária vigente no Brasil estão sistematizados no (Quadro 4).

Essa sistematização permite não apenas compreender a lógica de segmentação empresarial, mas também explicitar como tais parâmetros influenciam o acesso a linhas de crédito, programas de apoio e regimes fiscais diferenciados, aspectos de grande relevância para a análise das condições de adoção da Manufatura Sustentável 4.0 no contexto das MPMEs.

Quadro 4 - Classificação de empresas no Brasil

BNDES (*)	Classificação	SEBRAE (**)
Receita Operacional Bruta	REGIME FISCAL	EMPREGADOS
Anual ou Renda Anual		Receita Operacional Bruta
		Anual ou Renda Anual
Menor ou igual a R\$ 360 mil	Microempresa SIMPLES NACIONAL	19
Menor ou igual a R\$ 360 mil		Menor ou igual a R\$ 360 mil
Maior que R\$ 360 mil e menor ou igual a R\$ 4,8 milhões	EPP Pequena empresa SIMPLES NACIONAL	20 a 99
		Maior que R\$ 360 mil e menor ou igual a R\$ 4,8 milhões
Maior que R\$ 4,8 milhões e menor ou igual a R\$ 90 milhões	Média empresa I LUCRO PRESUMIDO	100 a 499
		Maior que R\$ 4,8 milhões
Maior que R\$ 90 milhões e menor que R\$ 300 milhões	Média empresa II LUCRO REAL	
Maior que R\$ 300 milhões	Grande empresa LUCRO REAL	

Fontes: (*) BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) e (**) SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas).

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

A presente pesquisa adota abordagem descritiva quantitativa, adequada à investigação de fenômenos complexos ainda não plenamente consolidados do ponto de vista teórico-empírico. Essa escolha metodológica é coerente com o objetivo de identificar estruturas subjacentes e padrões de associação entre dimensões da manufatura sustentável no contexto das MPMEs. A estratégia de pesquisa baseia-se na aplicação de levantamento do tipo *survey*, amplamente utilizada em estudos organizacionais quando se busca analisar relações entre variáveis em contextos reais (Forza, 2002). A coleta de dados estruturados junto a gestores industriais permite captar percepções organizacionais relevantes para a compreensão do fenômeno investigado.

A análise dos dados foi conduzida por meio da Análise Fatorial Exploratória (AFE), técnica estatística multivariada adequada para identificar estruturas latentes em conjuntos de variáveis observáveis e reduzir a dimensionalidade do fenômeno (Hair et al., 2019). Diferentemente de abordagens confirmatórias, a AFE permite explorar empiricamente a organização dos dados sem impor previamente uma estrutura teórica rígida, sendo particularmente indicada em estágios iniciais de desenvolvimento de modelos. Dessa forma, a combinação entre *survey* e AFE configura uma abordagem metodológica coerente com o objetivo da pesquisa, permitindo avançar da estrutura conceitual para a identificação empírica de padrões subjacentes ao modelo de manufatura sustentável.

3.1 Coleta de dados

Nesta etapa da pesquisa foram definidos aspectos relacionados à operacionalização da pesquisa quantitativa, que se dará pela aplicação de levantamento do tipo *survey*. Os levantamentos, segundo Martins e Théophilo (2009, p.60), “são próprios para os casos em que o pesquisador deseja responder as questões acerca da distribuição de uma variável ou das relações entre características de pessoas ou grupos, da maneira que ocorrem em situações naturais”. Para Lee Ho (2011), no levantamento do tipo *survey* o pesquisador avalia uma amostra significativa de um determinado problema, investigando suas características para extrair conclusões relevantes acerca de uma amostra. Para Gunther (2003) as *surveys* tem como vantagens assegurar melhor representatividade e permite generalização para uma população mais ampla. Existem três tipos de pesquisa *survey*: exploratória, descritiva e confirmatória ou explanatória (Forza, 2002). Forza argumenta que o levantamento *survey* confirmatório ou explanatório ou teste de teoria, pode ser utilizado quando o conhecimento sobre um fenômeno

já foi desenvolvido teoricamente, ou seja, utilizando conceitos bem definidos, modelos teórico-conceituais e proposições.

Na presente pesquisa, optou-se pela *survey* de natureza exploratória pois buscou-se modelos de manufatura, sustentabilidade e indústria 4.0. Segundo Forza (2002), em pesquisa “*survey*” de natureza exploratória é exigido um tamanho de amostra com número suficiente para representar a população de interesse e realizar testes estatísticos. Com isso, a preocupação se volta ao número de respostas para validade estatística com vistas a obter validade interna da pesquisa. Segundo Forza (2002) e Flynn (1990), é adequado levantamentos *surveys* com retorno superior a 50%, porém Malhotra e Grover (1998) validam um mínimo de 20% de retorno.

A definição da amostra da pesquisa objetiva selecionar um número suficiente de elementos que permita generalizar suas propriedades para a população de origem, conforme Lee Ho (2011). Esta pesquisa focará em torno de 800 empresas da Centro das Indústrias do Estado de São Paulo CIESP. As empresas serão contatadas, configurando uma amostra probabilística do tipo sistemática. Segundo Lee Ho (2011), Gil (2006), Martins e Theóphilo (2009) e Forza (2002), nesse tipo de amostra é possível ordenar os elementos da amostra. Os respondentes selecionados para esta pesquisa foram profissionais responsáveis pela gestão direta ou indireta de Pequenas e Médias Empresas (PMEs) do segmento industrial.

A análise dos dados será realizada por meio de estatística descritiva, análise de correlação entre variáveis (*cross-table*) e análise fatorial exploratória, seguindo as recomendações da literatura. De acordo com Hair et al. (2006), a análise fatorial é um método estatístico multivariado que tem como objetivo definir uma estrutura subjacente em uma matriz de dados, ou seja, examinará a estrutura das inter-relações (correlações) entre variáveis, definindo um conjunto de variáveis latentes comuns denominadas fatores. Além disso, Conway e Huffcutt (2003) destacam que a análise fatorial exploratória poderá ser útil para refinar medidas, avaliar a validade do construto e, em determinados casos, testar hipóteses. Os fatores serão extraídos utilizando o método de componentes principais, no qual os fatores serão baseados na variância total, e a rotação Varimax, que é um método ortogonal de rotação de fatores que pretende que apenas alguns fatores apresentem cargas significativas, buscando maximizar a variância entre as cargas de cada componente principal (Hair et al., 2006). A análise dos dados será realizada por meio do software IBM SPSS v.26.

Dentre as empresas que constituíram a amostra, serão selecionados respondentes que atuem nas funções de gerenciamento ou direção. Caso o número de respondentes não seja válido dentro da amostra, uma segunda etapa de busca de empresas específicas poderá ser executada para obter uma *survey* válida para fins de tratamento estatístico e com validade interna. Para a

pesquisa quantitativa, segundo Boyd e Wetfall (1964) e Mattar (1996), o protocolo será do tipo estruturado não disfarçado, pois terá na maioria questões fechadas e o respondente saberá o objetivo da pesquisa. Nas questões fechadas será utilizada a escala de classificação numérica de 11 pontos, ou seja, com escala de 0 a 10 Lee Ho, (2011).

Será determinado o tamanho da amostra admitindo um erro amostral de 5% e com um nível de confiança de 95% (Hair et al., 2019). A AFE normalmente requer altas amostragens como por exemplo: 100 a 200 casos no total, 10 casos por variável integrante do modelo. Hair et al. (2019) sugere no mínimo 5 respostas válidas por variável. Ressalta-se que uma *survey* piloto com especialistas foi realizada com o objetivo de ajustar e lapidar o protocolo de coleta de dados Lee Ho, (2011), obtendo 9 respostas de questionários com validação e sugestões de ajustes.

Para coletar os dados da *survey*, o instrumento de coleta de dados (Apêndice III) foi disponibilizado na internet. Para tanto, foi utilizado o Google Forms, que a cada resposta armazena os dados para início dos tratamentos descritivos e estatísticos. Segundo Evans e Mathur (2005), as *surveys* com coleta direta pela internet apresentam vantagens tais como: baixo custo, flexibilidade, maior controle, rapidez, entre outros. Os convites para participação na pesquisa foram encaminhados por meio dos canais institucionais oficiais do CIESP, considerando que esta entidade apoia formalmente o desenvolvimento do estudo.

Essa estratégia visa conferir maior credibilidade, segurança e confiabilidade ao processo de coleta de dados, além de reforçar o alinhamento institucional. É importante destacar que o CIESP, além de apoiar a iniciativa, também se beneficiará dos resultados obtidos, uma vez que terá acesso ao relatório final da pesquisa, bem como uma estrutura analítica e evidências exploratórias que subsidiam futuras modelagens, contribuindo diretamente para o aprimoramento das práticas e estratégias voltadas à indústria.

3.2. Considerações metodológicas e limitações

Apesar de sua utilidade, a AFE apresenta limitações que requerem atenção do pesquisador. Primeiramente, a técnica é altamente sensível ao tamanho da amostra e à qualidade dos dados. Amostras pequenas ou mal distribuídas podem gerar fatores instáveis, comprometendo a replicabilidade (Fabrigar e Wegener, 2012). Outra limitação é que os resultados da AFE são influenciados pelas decisões metodológicas tomadas pelo pesquisador, como o método de extração, o tipo de rotação e os critérios para retenção de fatores (Brown, 2015).

Essas escolhas podem levar a soluções fatoriais distintas para o mesmo conjunto de dados, exigindo transparência na descrição do processo (APA, 2020). Além disso, por ser exploratória, a AFE não confirma a estrutura fatorial encontrada; sua função é gerar hipóteses sobre a relação entre variáveis. Por isso, recomenda-se fortemente que os resultados sejam posteriormente testados por meio de Análise Fatorial Confirmatória (AFC), que avalia a adequação do modelo proposto a partir de indicadores de ajuste (Tabachnick e Fidell, 2019).

Em síntese, a AFE é uma ferramenta poderosa e indispensável no arsenal metodológico das ciências sociais e aplicadas. No entanto, sua utilização exige rigor técnico, clareza nos critérios adotados e adequada interpretação dos resultados, de forma a garantir que os fatores identificados reflitam, de fato, estruturas teóricas relevantes e consistentes.

4. RESULTADOS

Os dados analisados neste estudo foram coletados por meio de questionário estruturado, aplicado a profissionais com elevada senioridade organizacional, incluindo proprietários, diretores, gestores, supervisores e líderes, atuantes em diferentes áreas funcionais da indústria. A estratégia de coleta envolveu múltiplos canais institucionais e profissionais, tais como associações industriais, conselhos regionais e redes diretas do pesquisador, totalizando aproximadamente 11.900 convites enviados. Desse universo, foram obtidas 155 respostas válidas e qualificadas, número plenamente compatível com pesquisas organizacionais aplicadas e estatisticamente adequado para a realização das análises propostas sendo que ao final da coleta de dados, a amostra efetiva alcançou 155 respondentes, superando de forma expressiva o número mínimo inicialmente requerido.

A qualidade da amostra considera não apenas seu tamanho, mas, sobretudo, pelo perfil dos respondentes. Mais de 90% dos participantes possuem experiência profissional superior a 15 anos, o que confere maior confiabilidade às percepções reportadas acerca de práticas organizacionais, desempenho e sustentabilidade. Ademais, a predominância de respondentes oriundos das áreas industrial, administrativa e de engenharia assegura elevada aderência entre o objeto empírico investigado e o conteúdo do instrumento de pesquisa, reduzindo o risco de respostas superficiais ou descontextualizadas.

Em relação a metodologia, este capítulo foi estruturado de modo a atender rigorosamente às exigências acadêmicas, adotando uma sequência lógica e progressiva de análise, iniciando-se pela caracterização da amostra e avançando, no capítulo subsequente, para as estatísticas descritivas e inferenciais, a avaliação da qualidade psicométrica dos instrumentos e as análises multivariadas exploratórias e confirmatórias, incluindo a modelagem por equações estruturais. Cada etapa é acompanhada de tabelas analíticas e textos interpretativos expandidos, permitindo não apenas a apresentação dos resultados, mas sua discussão crítica à luz das teorias que fundamentam o modelo de Manufatura Sustentável.

Dessa forma, este capítulo e o subsequente não se limitam à descrição de resultados estatísticos, mas buscam interpretar os resultados de maneira integrada, evidenciando como as práticas associadas à Manufatura Sustentável se manifestam na realidade organizacional das MPMEs e como tais práticas se relacionam com distintas dimensões do desempenho organizacional. Essa abordagem assegura coerência interna ao trabalho, fortalece a consistência metodológica e fornece uma base empírica robusta para o teste das hipóteses estruturais propostas na tese.

4.2. Caracterização da Amostra e perfil dos respondentes

A caracterização da amostra constitui etapa fundamental para a interpretação adequada dos resultados empíricos, uma vez que permite avaliar a aderência entre o perfil dos respondentes e os objetivos da pesquisa, bem como a validade externa das inferências realizadas. Em estudos organizacionais aplicados, especialmente aqueles voltados às MPMEs, a qualificação dos respondentes assume relevância central, considerando que o fenômeno investigado envolve práticas estratégicas, operacionais e processos decisórios organizacionais (Hair et al., 2019; Neuman, 2014).

A amostra do estudo é composta por 155 respondentes qualificados, obtidos a partir de aproximadamente 11.900 convites enviados por diferentes canais institucionais e profissionais. A taxa de retorno observada ($\approx 1,5\%$) está alinhada com padrões típicos de pesquisas de survey aplicadas a públicos executivos. Observa-se predominância de profissionais com atuação em níveis gerenciais e estratégicos, com elevada experiência profissional, sendo que mais de 90% dos respondentes apresentam tempo de atuação superior a 15 anos. Esse perfil confere maior robustez analítica aos dados coletados, especialmente considerando que o fenômeno investigado envolve decisões organizacionais complexas.

4.2.1. Estratégia de coleta de dados e taxa de resposta

A distribuição estimada dos convites enviados para participação na pesquisa, segmentada por canal de divulgação utilizado no processo de coleta de dados, é apresentada na (Tabela 3).

Tabela 3 - Estratégia de envio do questionário e respostas obtidas

Canal de divulgação	Convites enviados	Estratégia adotada
CIESP – SP	6.750	Envio direto aos associados com reforço por e-mail
CIESP – Diadema	275	Envio aos Conselheiros para compartilhamento em redes profissionais
Envios diretos do autor	4.875	Contatos diretos, grupos profissionais e Linked In
Total convites enviados	11.900	
Respostas qualificadas recebidas	155	$\approx 1,5\%$

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Embora a taxa de resposta seja numericamente modesta, a literatura ressalta que pesquisas direcionadas a executivos, gestores e empresários tendem a apresentar menores taxas de retorno, sendo compensadas pela elevada qualidade informacional das respostas (Hair et al., 2019). No presente estudo, essa condição é reforçada pelo perfil funcional, hierárquico e pela experiência profissional dos participantes.

4.2.2. Perfil e função exercida

A distribuição dos respondentes segundo o cargo ou a função exercida nas organizações participantes é apresentada na (Tabela 4).

Tabela 4 - Cargo ou função dos respondentes

Cargo / Função	Frequência	Participação
Gerente	44	28%
Diretor(a)	39	25%
Proprietário(a) / Sócio(a)-administrador(a)	29	19%
Supervisor(a) / Coordenador(a)	25	16%
Líder	18	12%
Total	155	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Verifica-se que 72% dos respondentes ocupam cargos de alta e média gestão (diretores, proprietários, gerentes e supervisores), o que evidencia que as respostas refletem percepções estratégicas e operacionais de indivíduos diretamente envolvidos na formulação de políticas, na alocação de recursos e na implementação de práticas organizacionais. Esse aspecto é particularmente relevante para a investigação da Manufatura Sustentável 4.0, uma vez que sua adoção depende de decisões estruturais e estratégicas, e não apenas operacionais.

4.2.3. Área funcional de atuação

A distribuição dos respondentes por área funcional é apresentada na (Tabela 5).

Tabela 5 - Área de atuação dos respondentes

Área funcional	Frequência	Percentual
Industrial / Operacional	55	35%
Administração	49	32%
Engenharia	25	16%
Qualidade	17	11%
Tecnologia da Informação	9	6%
Total	155	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A predominância das áreas industrial/operacional e administrativa (67% da amostra) reforça a aderência empírica do estudo, uma vez que as dimensões analisadas nos modelos manufatura sustentável envolvem diretamente processos produtivos, governança organizacional, eficiência operacional, inovação tecnológica e desempenho. A presença significativa de profissionais de engenharia, qualidade e tecnologia da informação contribui para uma visão técnica e sistêmica das práticas investigadas.

4.2.4. Experiência profissional dos respondentes

A experiência profissional dos participantes é apresentada na (Tabela 6).

Tabela 6 - Tempo de experiência profissional

Tempo de experiência	Frequência	Participação
Até 5 anos	21	14%
5 a 10 anos	5	3%
10 a 15 anos	0	0%
15 a 20 anos	58	37%
Acima de 20 anos	71	46%
Total	155	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se que 83% dos respondentes possuem mais de 15 anos de experiência profissional, dos quais 46% apresentam trajetória superior a 20 anos. Esses resultados indicam que a amostra é predominantemente composta por profissionais com elevada experiência e ampla vivência em contextos organizacionais e industriais, aspecto que reforça a consistência das percepções obtidas em relação às práticas estratégicas, operacionais e gerenciais investigadas.

Tal característica confere robustez às percepções reportadas, uma vez que indivíduos com elevada experiência tendem a apresentar maior capacidade analítica, visão sistêmica e compreensão aprofundada dos impactos associados a práticas de manufatura sustentável, inovação tecnológica e desempenho organizacional. Dessa forma, reduz-se significativamente o risco de respostas baseadas em avaliações superficiais, intuitivas ou descontextualizadas, fortalecendo a qualidade empírica e a validade dos resultados do estudo.

4.2.5. Distribuição geográfica dos respondentes

A distribuição geográfica da amostra, segmentada por município e unidade federativa (UF), encontra-se apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Localização geográfica dos respondentes

Localização	Frequência	Participação
São Paulo – SP	45	29%
Diadema – SP	18	12%
Osasco – SP	9	6%
Guarulhos – SP	8	5%
São Caetano do Sul – SP	7	5%
Demais municípios e estados	68	43%
Total	155	

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se forte concentração no estado de São Paulo, principal polo industrial do país, o que é coerente com o foco da pesquisa. Entretanto, a presença de respondentes de outras regiões brasileiras amplia a variabilidade contextual da amostra, contribuindo para a validade externa dos resultados e para a compreensão do fenômeno em diferentes realidades organizacionais.

4.2.6. Síntese analítica da amostra

A caracterização da amostra evidencia elevado grau de aderência entre o perfil dos respondentes e os objetivos da pesquisa. Trata-se de uma amostra composta majoritariamente por profissionais experientes, com atuação direta em funções estratégicas, gerenciais e operacionais, inseridos em contextos industriais relevantes. Essas características conferem robustez empírica às análises subsequentes e sustentam a validade das inferências realizadas acerca da relação entre manufatura sustentável e as MPMEs.

A distribuição da amostra por porte organizacional apresentada na (Tabela 8), evidencia a predominância de pequenas empresas (49,03%), seguidas por médias empresas (33,55%) e microempresas (17,42%).

Tabela 8 - Distribuição de frequências por porte

Porte	Frequência	%	Frequência Acum.
Microempresas	27	17,42	27
Pequenas empresas	76	49,03	103
Médias empresas	52	33,55	155
Amostra (MPMEs)	155	100,00	

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A configuração observada revela elevada aderência à estrutura do tecido produtivo brasileiro, no qual as MPMEs desempenham papel central. De acordo com o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE, 2023), esse segmento representa aproximadamente 99% das empresas formais no país, sendo responsável por cerca de 30% do Produto Interno Bruto (PIB) e por mais de 70% dos empregos formais.

Em perspectiva internacional, essa relevância é igualmente expressiva. Segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 2023), as pequenas e médias empresas correspondem a aproximadamente 99% das organizações nos países-membros e respondem por cerca de 50% a 60% do valor adicionado. De forma convergente, o Banco Mundial e a International Finance Corporation (IFC, 2022) indicam que as MPMEs

representam cerca de 90% das empresas globais e mais de 50% do emprego mundial, podendo alcançar até 40% do PIB nas economias emergentes.

Nesse contexto, a escolha analítica das MPMEs nesta pesquisa não se limita a uma delimitação amostral, mas representa um recorte estratégico, uma vez que este segmento concentra os principais efeitos econômicos relacionados à geração de emprego, produtividade e competitividade.

Sob a ótica da Teoria da Contingência, o porte organizacional constitui variável estruturante, influenciando diretamente a capacidade de adoção de práticas de manufatura sustentável, especialmente no que se refere à disponibilidade de recursos, ao grau de formalização e à maturidade organizacional.

4.3. Análise de dados

A análise estatística dos dados foi conduzida a partir de uma abordagem estruturada e progressiva, combinando técnicas descritivas e multivariadas, com o propósito de examinar o comportamento das dimensões analisadas, avaliar a consistência do instrumento de coleta e explorar possíveis padrões subjacentes aos dados. A análise das estatísticas descritivas evidencia elevados níveis de dispersão entre as dimensões analisadas, conforme indicado pelos coeficientes de variação (CV). Considerando a classificação proposta por Gomes (1990), observa-se que os valores de CV encontram-se predominantemente em níveis elevados, indicando heterogeneidade significativa nas respostas.

Esse resultado sugere que as médias, isoladamente, apresentam limitações como medida de tendência central para a interpretação do fenômeno, uma vez que a elevada variabilidade compromete sua representatividade. Esse comportamento é consistente com evidências empíricas reportadas na literatura, que indicam que a variabilidade elevada em contextos de MPMEs reflete diferentes níveis de maturidade organizacional e práticas heterogêneas de gestão (Machado et al., 2018).

Assim, a interpretação dos resultados requer o uso complementar de análises multivariadas, capazes de capturar relações estruturais entre as dimensões. Essa estratégia analítica permite ir além da simples descrição numérica, possibilitando a identificação de tendências, variações e relações potenciais entre variáveis, ao mesmo tempo em que fornece subsídios para a interpretação dos resultados dentro de um quadro metodológico consistente. Nesse sentido, a análise estatística assume papel central na articulação entre evidência empírica e interpretação científica, ainda que suas conclusões devam ser compreendidas dentro dos limites inerentes ao método adotado.

4.3.1. Estatística descritiva

A análise descritiva da (Tabela 9) foi realizada com base em medidas de posição e dispersão, constituindo o primeiro nível de aproximação com os dados coletados. Essa etapa permite observar, de forma sintética, como as dimensões se comportam no conjunto da amostra, fornecendo indícios iniciais sobre padrões e variações.

Os resultados indicam que as médias das dimensões apresentam valores relativamente próximos entre si, situando-se, na amostra geral, em torno do intervalo de 6,0 a 6,2. Esse padrão pode sugerir um nível intermediário de desenvolvimento das práticas analisadas, o que, sob uma perspectiva interpretativa, pode ser associado a um estágio ainda em consolidação, caracterizado como emergente no processo de adoção de práticas relacionadas à Manufatura Sustentável 4.0. A sobreposição dos intervalos de confiança indica ausência de diferenças substanciais entre dimensões, sugerindo comportamento estrutural integrado. Os coeficientes de variação (24%–28%) indicam heterogeneidade moderada, típica de contextos organizacionais com diferentes níveis de maturidade.

A relativa proximidade entre as médias aponta para um comportamento convergente entre as dimensões, o que pode indicar que as organizações tendem a evoluir de maneira relativamente alinhada nos diferentes aspectos avaliados. Ainda que essa convergência não implique uniformidade plena, ela sugere a existência de um padrão sistêmico de desenvolvimento, no qual as dimensões não se apresentam de forma isolada, mas possivelmente inter-relacionadas.

Ao analisar a dispersão dos dados, identifica-se que:

- (a) As microempresas apresentam coeficientes de variação mais elevados, o que pode indicar maior heterogeneidade estrutural e variações mais acentuadas na adoção das práticas analisadas;
- (b) As pequenas e médias empresas, por sua vez, tendem a apresentar menor variabilidade relativa, sugerindo maior estabilidade e possível consolidação organizacional em relação às dimensões consideradas.

Essa diferenciação entre portes organizacionais pode estar associada a fatores como disponibilidade de recursos, grau de formalização dos processos e capacidade de absorção de práticas gerenciais e tecnológicas.

Tabela 9 - Estatística descritiva das dimensões analíticas da manufatura sustentável

Dimensões de Avaliação		Categorias												
		Micro Empresas			Pequenas Empresas			Médias Empresas			AMOSTRA			
		Média	Desvio	CV	Média	Desvio	CV	Média	Desvio	CV	Média	Desvio	CV	IC
			Padrão	(%)		Padrão	(%)		Padrão	(%)		Padrão	(%)	95%
(ORG)	Organizacional	6,7	1,5	23%	5,6	1,2	22%	6,2	1,7	28%	6,0	1,5	25%	5,76 - 6,24
(SOC)	Recursos Humanos	6,5	1,9	29%	5,7	1,5	27%	6,2	1,7	27%	6,0	1,5	26%	5,76 - 6,24
(EST)	Estratégica	6,5	1,6	25%	5,9	1,5	25%	6,2	1,5	25%	6,1	1,5	24%	5,86 - 6,34
(ECO)	Econômica	6,5	2,1	33%	6,0	1,7	29%	6,0	1,7	29%	6,1	1,7	28%	5,83 - 6,37
(OPE)	Operacional	6,2	2,1	34%	6,2	1,6	26%	6,2	1,7	28%	6,2	1,6	25%	5,95 - 6,45
(INO)	Inovação Tecnológica	6,6	2,2	33%	5,9	1,7	28%	6,1	1,7	28%	6,1	1,7	27%	5,83 - 6,37
(AMB)	Ambiental	6,3	2,2	34%	6,0	1,6	27%	6,2	1,6	26%	6,1	1,6	26%	5,85 - 6,35

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3.2. Confiabilidade da amostra e subamostras

Os coeficientes de confiabilidade das categorias avaliadas, apresentados na (Tabela 10), indicam níveis elevados de consistência interna do instrumento de pesquisa, conforme os critérios sugeridos por Hair et al. (2019), com valores de Alpha de Cronbach variando entre 0,955 e 0,964.

Tabela 10 - Confiabilidade de categorias

	Alpha de Cronbach	Alpha de Cronbach Stand.	N
Microempresas	0,964	0,964	27
Pequenas empresas	0,955	0,955	76
Médias empresas	0,96	0,96	52
Amostra (MPM)	0,959	0,959	155

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados sugerem que o instrumento apresenta consistência interna elevada, indicando que os itens que compõem as categorias tendem a medir, de forma relativamente homogênea, os construtos propostos. Entretanto, valores superiores a 0,95 podem indicar redundância entre itens, sugerindo sobreposição conceitual entre variáveis. Esse comportamento, no entanto, é coerente com a natureza sistêmica do modelo, no qual as dimensões apresentam elevado grau de interdependência.

De acordo com Hair et al. (2019), valores de Alpha de Cronbach superiores a 0,70 são considerados adequados para pesquisas em ciências sociais aplicadas, enquanto valores mais elevados podem indicar maior estabilidade interna da escala. Nesse sentido, os coeficientes observados apontam para uma adequação defensável do instrumento, especialmente para fins de análise multivariada.

Os resultados de confiabilidade obtidos indicam níveis consistentes de estabilidade interna entre as variáveis analisadas, demonstrando aderência aos parâmetros metodológicos recomendados para pesquisas organizacionais e estudos multivariados aplicados. Nesse contexto, estudos como o de Machado et al. (2018) destacam que a confiabilidade representa um requisito fundamental para a aplicação de técnicas estatísticas multivariadas, especialmente em investigações direcionadas às MPMEs, nas quais a heterogeneidade organizacional e estrutural tende a ampliar a complexidade analítica dos modelos. Dessa forma, os resultados observados mostram-se compatíveis com os níveis de consistência interna usualmente aceitos na literatura científica.

4.3.3. KMO e esfericidade de Bartlett

Com o objetivo de avaliar a adequação dos dados à aplicação de técnicas de análise fatorial, foram realizados o cálculo do índice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e o Teste de Esfericidade de Bartlett. Esses procedimentos permitem examinar, respectivamente, o grau de intercorrelação entre as variáveis e a hipótese de que a matriz de correlações difere de uma matriz identidade. Os resultados obtidos para cada estrato amostral e para o conjunto da amostra são apresentados na (Tabela 11).

Tabela 11 - Validade de categorias

Categorias	Kayser-Meyer-Okin (KMO)	Bartlett χ^2 (Signif.)	N
Microempresas	0,900	225,455 (0,000)	27
Pequenas empresas	0,901	569,533 (0,000)	76
Médias empresas	0,902	377,441 (0,000)	52
Amostra (MPM)	0,924	1183,914 (0,000)	155

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os valores do índice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) situam-se entre 0,900 e 0,924, indicando adequada proporção de variância comum entre as variáveis, conforme parâmetros usualmente adotados na literatura. De forma complementar, o Teste de Esfericidade de Bartlett apresentou significância estatística em todos os estratos analisados ($p < 0,001$), sugerindo que a matriz de correlações é distinta de uma matriz identidade.

Em conjunto, esses resultados indicam que os dados apresentam condições apropriadas para a aplicação de técnicas de análise fatorial, possibilitando a investigação de estruturas subjacentes entre as variáveis. De forma mais específica, observa-se:

- a) Adequação da matriz de correlação para análise multivariada;
- b) Presença de correlações suficientes entre as variáveis;
- c) Indícios de organização latente entre os itens do instrumento.

Ressalta-se, entretanto, que tais evidências devem ser interpretadas como condições preliminares para a análise fatorial, não sendo suficientes, isoladamente, para sustentar inferências sobre validade convergente ou estrutura dimensional do modelo, as quais requerem análises adicionais, como cargas fatoriais, comunalidades e variância explicada.

4.3.4. Correlação entre as dimensões

A interpretação da matriz demonstra que dimensões relacionadas à estratégia, operação, inovação tecnológica e meio ambiente apresentam níveis elevados de associação, sugerindo que avanços em determinadas capacidades organizacionais tendem a influenciar simultaneamente outras dimensões da sustentabilidade industrial. Da mesma forma, os aspectos organizacionais e de recursos humanos mostram-se associados às demais dimensões, indicando que capacidades internas, gestão e qualificação profissional constituem elementos relevantes para a implementação de práticas sustentáveis.

Observa-se ainda que as correlações identificadas são significativas ao nível de 0,01. Em termos estatísticos, isso significa que existe menos de 1% de probabilidade de que as associações observadas tenham ocorrido ao acaso, correspondendo a um nível de confiança aproximado de 99%. Esse resultado reduz substancialmente a probabilidade de erro do Tipo I, isto é, rejeitar incorretamente a hipótese de inexistência de correlação entre as dimensões analisadas, reforçando a consistência estatística das associações identificadas.

Tabela 12 - Matriz de correlação entre dimensões

Dimensões	1	2	3	4	5	6	7
1. Organizacional	1						
2. Recursos Hum.	,768**	1					
3. Estratégica	,698**	,781**	1				
4. Econômica	,670**	,758**	,843**	1			
5. Operacional	,664**	,773**	,815**	,836**	1		
6. Inov. Tecnol.	,638**	,753**	,762**	,817**	,860**	1	
7. Ambiental	,673**	,737**	,760**	,835**	,824**	,869**	1

** . A correlação é significativa no nível 0,01 (2 extremidades).

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Do ponto de vista metodológico, os resultados observados fornecem sustentação empírica para a aplicação da análise fatorial exploratória, uma vez que a matriz de correlação evidencia associações positivas e estatisticamente significativas entre as dimensões analisadas. Conforme destacam Hair et al. (2019), a existência de correlações consistentes entre variáveis constitui um dos pressupostos fundamentais dessa técnica, pois indica compartilhamento de variância comum e potencial existência de estruturas latentes subjacentes. Nesse contexto, a investigação de potenciais fatores com maior independência conceitual e estatística apresenta-se como uma alternativa relevante para tornar o modelo mais parcimonioso e confiável.

4.3.5. Análise fatorial

Com o objetivo de explorar a estrutura subjacente às dimensões avaliadas no modelo de Manufatura Sustentável 4.0, procedeu-se à aplicação da análise fatorial exploratória (AFE), técnica multivariada indicada quando há evidências de correlações significativas entre variáveis e interesse na redução da dimensionalidade do fenômeno analisado.

Essa abordagem possibilita examinar padrões de associação entre as dimensões, contribuindo para a identificação de fatores latentes que sintetizam o construto investigado, sem pressupor previamente sua estrutura definitiva. Nesse sentido, a AFE permite compreender como as dimensões se organizam empiricamente no contexto das MPMEs, fornecendo subsídios para o refinamento das direções analíticas propostas.

A adequação dos dados à aplicação da técnica foi previamente verificada por meio do coeficiente Kaiser-Meyer-Olkin ($KMO = 0,924$) e do teste de esfericidade de Bartlett ($p < 0,001$), cujos resultados indicam excelente adequação da amostra e presença de correlações significativas entre as variáveis, conforme critérios amplamente adotados na literatura (Hair et al., 2019).

A matriz fatorial rotacionada (Tabela 13), obtida pelo método de rotação varimax com normalização de Kaiser, com convergência alcançada após seis iterações. Os resultados indicam a extração de dois fatores com autovalores superiores a 1, que, conjuntamente, explicam 87,16% da variância total, valor considerado elevado e indicativo de forte capacidade explicativa do modelo.

Tabela 13 - Análise fatorial para dimensões de avaliação de manufaturas sustentáveis

Fator	Variância Absorvida	Dimensões	Componentes		Comunalidade
			1	2	
Estratégia de Negócio	54%	Estratégica	0,715	0,553	0,817
		Econômica	0,823	0,436	0,867
		Operacional	0,840	0,417	0,879
		Inovação Tecnológica	0,875	0,349	0,888
		Ambiental	0,845	0,389	0,865
Capacidade Organizacional	32%	Organizacional	0,337	0,905	0,932
		Recursos Humanos	0,561	0,733	0,852
Eigenvalue			3,374	1,355	4,729
Variância			0,543	0,328	0,8716

Fonte: Elaborado pelo autor (2026). Matriz fatorial rotacionada para convergência em seis iterações; método de rotação varimax com normalização de Kaiser; coeficiente Kaiser-Meyer-Olkin = 0,924; 87,16% da variância total explicada por dois fatores.

O primeiro fator (Componente 1) apresenta maior contribuição relativa na explicação da variância (54%) e reúne as dimensões estratégica, econômica, operacional, inovação tecnológica e ambiental. Observa-se que essas dimensões apresentam cargas fatoriais elevadas nesse componente (variando de 0,715 a 0,875), bem como altos níveis de comunalidade, indicando relevante contribuição para a estrutura fatorial. Esse agrupamento evidencia a existência de um eixo estruturante associado à articulação entre estratégia, operação, tecnologia e sustentabilidade ambiental, sugerindo que, no contexto das MPMEs, essas dimensões não se manifestam de forma isolada, mas como um conjunto integrado de práticas orientadas à implementação da manufatura sustentável.

Embora a denominação de fatores envolva certo grau de subjetividade, esse componente pode ser interpretado como representativo de um eixo estratégico-operacional-tecnológico, refletindo a convergência entre direcionamento estratégico, execução produtiva, inovação e sustentabilidade ambiental. Do ponto de vista teórico, esse resultado mostra-se consistente com a Teoria da Contingência, ao evidenciar a necessidade de alinhamento entre estratégia, estrutura, tecnologia e contexto organizacional, bem como com a Teoria de Redes, na medida em que a integração entre capacidades estratégicas, operacionais e tecnológicas depende de processos de cooperação, compartilhamento de conhecimento e interação entre diferentes atores organizacionais e institucionais. Adicionalmente, a Teoria dos Stakeholders contribui para interpretar a incorporação das dimensões ambiental e estratégica como resposta às demandas e expectativas de múltiplos grupos de interesse relacionados à sustentabilidade organizacional.

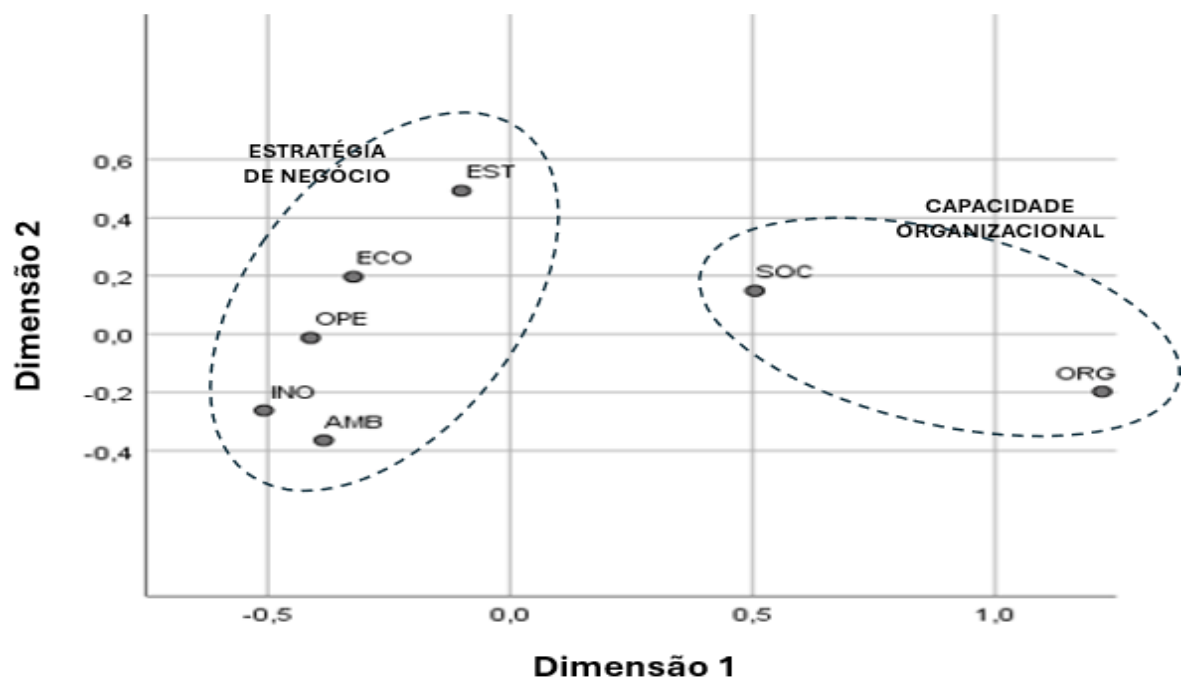
O segundo fator (Componente 2), responsável por 32% da variância explicada, concentra as dimensões organizacional e de recursos humanos, cujas cargas fatoriais (0,905 e 0,733, respectivamente) indicam elevada aderência a esse componente, além de altos valores de comunalidade. Esse padrão sugere a existência de um eixo associado às capacidades internas e estruturais das organizações, particularmente relacionadas à governança organizacional, cultura, liderança e desenvolvimento de pessoas.

Esse fator pode ser interpretado como representativo de um eixo de capacidade organizacional, refletindo os elementos internos que sustentam a implementação das práticas de manufatura sustentável, assim como sob a perspectiva teórica, esse resultado está alinhado com a Teoria da Contingência, ao evidenciar que tais capacidades influenciam a forma como as práticas são adotadas e integradas.

Os resultados obtidos na análise fatorial exploratória evidenciam a existência de relações estruturais entre as dimensões analisadas, indicando padrões de associação que sugerem proximidade conceitual entre determinados grupos de variáveis. Entretanto,

considerando a natureza multidimensional do fenômeno investigado e a necessidade de ampliar a compreensão visual das relações de similaridade entre os construtos, optou-se pela utilização complementar da abordagem baseada em Escalonamento Multidimensional (Multidimensional Scaling – MDS). Essa técnica permite representar graficamente o grau de proximidade ou distanciamento entre as dimensões analisadas, favorecendo uma interpretação mais integrada das relações estruturais identificadas na análise fatorial. Assim, a (Figura 2) apresenta o mapa perceptual gerado pelo Escalonamento Multidimensional, evidenciando a configuração espacial dos fatores e suas inter-relações no contexto da manufatura sustentável em MPMEs.

Figura 2 - Mapa de fatores por escalonamento multidimensional (MDS)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A configuração espacial resultante sugere a existência de padrões de proximidade entre as dimensões do modelo, que podem ser interpretados como indícios de associação estrutural entre os construtos. De forma geral, observa-se uma distribuição que tende a organizar as dimensões em dois agrupamentos principais.

No primeiro agrupamento, situado à esquerda do plano, concentram-se as dimensões estratégica (EST), econômica (ECO), operacional (OPE), inovação tecnológica (INO) e ambiental (AMB). A relativa proximidade entre esses elementos sugere que tais dimensões compartilham características comuns no contexto empírico analisado, possivelmente relacionadas à orientação estratégica e à operacionalização das práticas de Manufatura Sustentável 4.0.

No segundo agrupamento, localizado à direita, destacam-se as dimensões organizacional (ORG) e recursos humanos/social (SOC), que apresentam maior proximidade entre si e maior distanciamento em relação ao primeiro grupo. Esse posicionamento pode indicar um padrão distinto de associação, mais relacionado às capacidades internas e à estrutura organizacional.

A separação espacial entre os agrupamentos, embora não absoluta, sugere a presença de dois eixos latentes que organizam as dimensões do modelo. Esse resultado apresenta convergência com a estrutura identificada na análise fatorial exploratória, na qual também se observou a redução das dimensões em dois fatores principais. Tal convergência entre técnicas distintas (análise fatorial e MDS) contribui para a consistência interpretativa dos achados, ainda que não deva ser interpretada como evidência conclusiva.

Adicionalmente, a disposição das dimensões no espaço bidimensional indica que, embora organizadas em grupos relativamente distintos, as dimensões não se encontram completamente isoladas, sugerindo níveis de inter-relação entre os construtos. Esse aspecto é compatível com abordagens que consideram os sistemas organizacionais como estruturas compostas por elementos interdependentes, nos quais diferentes dimensões interagem de forma dinâmica.

Sob uma perspectiva teórica, essa configuração pode ser interpretada à luz da Teoria das Redes, ao evidenciar padrões de conexão e proximidade entre os elementos. No entanto, tais interpretações devem ser consideradas como possibilidades analíticas, e não como confirmações definitivas, dado o caráter exploratório da técnica empregada.

Em síntese, o escalonamento multidimensional oferece uma representação complementar à análise fatorial, permitindo visualizar a estrutura relacional entre as dimensões. Os resultados sugerem uma organização em dois agrupamentos principais um associado a aspectos estratégico-operacionais e outro às capacidades organizacionais mantendo, entretanto, indícios de interdependência entre eles, o que reforça a natureza sistêmica.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos resultados evidencia um conjunto de padrões que, quando considerados de forma integrada, permitem uma compreensão mais aprofundada da dinâmica de adoção da Manufatura Sustentável 4.0 no contexto das MPMEs. Inicialmente, os resultados descritivos indicaram níveis relativamente homogêneos entre as dimensões, com médias situadas em torno de valores intermediários. Esse comportamento sugere que as práticas associadas à Manufatura Sustentável não se encontram plenamente consolidadas, mas tampouco ausentes, indicando um estágio de desenvolvimento organizacional ainda em evolução.

A análise de dispersão revelou diferenças relevantes entre os portes organizacionais, especialmente no que se refere à maior variabilidade observada nas microempresas. Esse padrão pode estar associado a limitações estruturais, menor formalização de processos e maior sensibilidade a restrições de recursos, aspectos amplamente discutidos na literatura sobre micro pequenas e médias empresas. Do ponto de vista psicométrico, os elevados níveis de confiabilidade interna e os resultados favoráveis de validade fatorial indicam que o instrumento apresenta consistência adequada para captar os construtos propostos, ainda que a possibilidade de sobreposição parcial entre dimensões não deva ser descartada.

A análise fatorial exploratória evidenciou a presença de dois fatores principais, responsáveis por elevada proporção da variância explicada, sugerindo a possibilidade de síntese das dimensões em dois eixos estruturantes: um associado à orientação estratégico-operacional e outro vinculado às capacidades organizacionais internas. Essa estrutura foi reforçada pela análise de escalonamento multidimensional (MDS), que apresentou uma configuração espacial consistente com a organização fatorial, indicando proximidade entre dimensões conceitualmente relacionadas e distinção relativa entre os agrupamentos. A convergência entre diferentes técnicas analíticas (descritiva, fatorial e MDS) contribui para a consistência interpretativa dos achados, ainda que tais evidências devam ser compreendidas dentro dos limites do desenho metodológico adotado.

Sob uma perspectiva teórica, os resultados podem ser interpretados de forma integrada a partir de três fundamentos centrais adotados nesta tese: Teoria dos Stakeholders, Teoria da Contingência e Teoria de Redes.

- I. À luz da Teoria dos Stakeholders, a relativa convergência entre empresas de diferentes portes pode ser interpretada, de forma cautelosa, como possível reflexo de pressões externas e internas exercidas por clientes, fornecedores, órgãos reguladores, mercado, colaboradores e demais atores que influenciam as decisões

organizacionais. Essa perspectiva sugere que demandas por sustentabilidade, legitimidade e responsabilidade socioambiental podem induzir MPMEs a orientar suas práticas em direções semelhantes, ainda que apresentem diferentes capacidades internas de implementação.

- II. Sob a ótica da Teoria da Contingência, as variações observadas entre os portes organizacionais indicam que a adoção de práticas de manufatura sustentável não ocorre de maneira uniforme, mas depende das condições específicas de cada organização. Fatores como tamanho, estrutura, recursos disponíveis, nível tecnológico, maturidade gerencial, complexidade operacional e ambiente competitivo podem influenciar o grau de aderência às práticas analisadas. Assim, os resultados reforçam a necessidade de abordagens adaptadas ao contexto das MPMEs, evitando modelos universais ou excessivamente prescritivos.
- III. A partir da Teoria de Redes, os resultados também podem ser compreendidos pela influência das relações interorganizacionais na disseminação de práticas, conhecimentos e padrões de sustentabilidade. A participação em redes produtivas, cadeias de suprimentos, associações setoriais, parcerias tecnológicas e relações com clientes estratégicos pode favorecer o aprendizado coletivo e reduzir limitações internas típicas das MPMEs. Dessa forma, a convergência parcial entre empresas pode refletir não apenas decisões isoladas, mas também processos de difusão, cooperação e influência relacional.

De forma geral, os resultados descritivos oferecem indícios de um processo de desenvolvimento ainda em curso, no qual coexistem sinais de alinhamento estrutural, pressões institucionais, condicionantes contextuais e influência das redes de relacionamento. Essa leitura reforça a importância de análises complementares para aprofundar a compreensão do fenômeno estudado, especialmente considerando as especificidades das micro, pequenas e médias empresas e a proposta da tese de indicar direções para o desenvolvimento de modelos dedicados a esse segmento.

5.1. Síntese analítica dos resultados

As análises desenvolvidas neste estudo permitem compreender a manufatura sustentável, no contexto das MPMEs, como um fenômeno de natureza multidimensional, cuja estrutura empírica é caracterizada pela interdependência entre dimensões organizacionais, estratégicas, operacionais, tecnológicas e ambientais.

Os resultados evidenciam a existência de padrões consistentes de associação entre essas dimensões, indicando que a manufatura sustentável não se manifesta por meio de componentes isolados, mas por estruturas integradas que refletem a dinâmica relacional entre práticas e capacidades organizacionais. Essa configuração sugere que abordagens fragmentadas tendem a apresentar limitações na representação do fenômeno, reforçando a necessidade de modelos analíticos integrados. A estrutura fatorial identificada contribui para o refinamento do modelo proposto, ao evidenciar a presença de fatores latentes que reorganizam as dimensões em eixos estruturantes. Esse resultado indica que a complexidade conceitual da manufatura sustentável pode ser representada por configurações empíricas mais sintéticas, sem perda de consistência teórica, favorecendo sua operacionalização analítica e aplicação prática.

Do ponto de vista metodológico, a utilização da análise fatorial exploratória permitiu identificar essas estruturas latentes, contribuindo para a compreensão inicial do fenômeno. No entanto, conforme reconhecido na literatura, os resultados obtidos devem ser interpretados como evidências exploratórias, sendo necessária a aplicação de técnicas confirmatórias para validação estrutural do modelo. No âmbito gerencial, os achados sugerem que a adoção da manufatura sustentável nas MPMEs está associada à articulação entre capacidades organizacionais, integração tecnológica e alinhamento estratégico. Esse padrão indica que iniciativas isoladas tendem a apresentar menor efetividade, sendo mais adequadas abordagens que considerem simultaneamente múltiplas dimensões do modelo.

Adicionalmente, os resultados apontam que a adoção da manufatura sustentável em contextos de economias emergentes está condicionada a fatores estruturais mais amplos, como acesso a tecnologias, capacitação e ambiente institucional, reforçando a necessidade de abordagens que considerem múltiplos níveis de análise. A síntese dessas evidências é apresentada no Quadro 18 – Fundamentos teóricos, evidências empíricas e implicações, que consolida de forma integrada os principais achados do estudo, articulando resultados estatísticos, fundamentos teóricos e implicações analíticas e gerenciais. Esse quadro desempenha papel central no fechamento da discussão, ao explicitar as contribuições do estudo de forma estruturada e coerente.

Em termos gerais, os resultados indicam que a manufatura sustentável, no contexto das MPMEs, pode ser mais adequadamente compreendida a partir de uma perspectiva sistêmica, adaptativa e contextual, na qual diferentes dimensões interagem de maneira dinâmica e interdependente. Nesse sentido, o modelo proposto constitui uma aproximação teórico-empírica que contribui para a compreensão do fenômeno, ao integrar evidências empíricas e fundamentos conceituais em uma estrutura analítica coerente. Ao mesmo tempo, reconhece-se

que essa estrutura representa um estágio de desenvolvimento do conhecimento, sujeito a refinamentos futuros por meio de validações adicionais e aplicações em diferentes contextos organizacionais.

As análises desenvolvidas neste estudo permitem compreender a manufatura sustentável, no contexto das MPMEs, como um fenômeno de natureza multidimensional, no qual diferentes dimensões organizacionais apresentam relações de interdependência. Os resultados obtidos sugerem a existência de padrões de associação entre dimensões organizacionais, estratégicas, operacionais, tecnológicas e ambientais, indicando a presença de estruturas subjacentes que contribuem para uma compreensão integrada do tema.

Esse achado mostra-se consistente com a perspectiva sistêmica das organizações, conforme proposto por Bertalanffy (1968) e por Kast e Rosenzweig (1972), ao indicar que alterações em determinadas dimensões tendem a repercutir sobre outras, reforçando a necessidade de abordagens integradas na análise da manufatura sustentável. Adicionalmente, a variabilidade observada entre organizações sugere aderência à perspectiva da Teoria da Contingência, conforme discutido por Lawrence e Lorsch (1967) e Donaldson (2001), na medida em que a adoção de práticas sustentáveis parece estar condicionada a fatores contextuais e estruturais específicos.

Sob a perspectiva teórica, o estudo busca contribuir para a organização e integração de dimensões associadas à manufatura sustentável em um modelo analítico estruturado. Conforme argumentam Whetten (1989) e Bacharach (1989), a relevância de um modelo teórico está associada à sua capacidade de articular variáveis, explicitar relações e delimitar seu escopo de aplicação. Nesse sentido, o modelo proposto constitui uma tentativa de sistematização dessas dimensões, dialogando com abordagens contemporâneas que apontam para a necessidade de maior integração entre sustentabilidade, tecnologia e gestão.

No âmbito metodológico, a utilização de abordagem quantitativa com aplicação de análise fatorial exploratória permitiu identificar estruturas latentes entre as variáveis analisadas. De acordo com Hair et al. (2019), essa técnica é apropriada em estágios iniciais de investigação, especialmente quando se busca compreender a estrutura subjacente de dados complexos. No entanto, conforme ressaltam os autores, os resultados de análises exploratórias devem ser interpretados com cautela, não sendo suficientes, por si só, para validação definitiva de modelos teóricos.

Do ponto de vista gerencial, os resultados sugerem que a adoção de práticas de manufatura sustentável em MPMEs pode estar associada a fatores como capacidade organizacional, integração tecnológica e alinhamento estratégico. Essa interpretação encontra

respaldo na Visão Baseada em Recursos, conforme discutido por Barney (1991) e Wernerfelt (1984), ao indicar que a disponibilidade e mobilização de recursos internos podem influenciar a adoção de práticas sustentáveis. De forma complementar, a Teoria das Redes, conforme Powell (1990), sugere que interações externas e relações interorganizacionais podem desempenhar papel relevante nesse processo.

Adicionalmente, os achados indicam que a adoção da manufatura sustentável em economias emergentes pode estar condicionada a fatores institucionais mais amplos, como acesso a tecnologias, capacitação e políticas de incentivo, reforçando a importância de abordagens sistêmicas que considerem múltiplos níveis de análise. No que se refere às limitações, destaca-se que a pesquisa se baseia em dados de natureza transversal, o que restringe a análise de dinâmicas temporais. Além disso, a utilização de análise fatorial exploratória não permite inferências causais ou validação estrutural definitiva da estrutura analítica, conforme discutido por Hair et al. (2019), indicando a necessidade de estudos complementares.

Dessa forma, pesquisas futuras podem avançar na aplicação de técnicas confirmatórias, como análise fatorial confirmatória e modelagem de equações estruturais, bem como na realização de estudos longitudinais que permitam avaliar a evolução da maturidade em manufatura sustentável. Conforme destacam Whetten (1989) e Colquitt e Zapata-Phelan (2007), o avanço teórico depende não apenas da proposição de modelos, mas também de sua testagem, refinamento e replicação em diferentes contextos. Nesse sentido, o (Quadro 5) sintetiza, de forma integrada, os principais fundamentos teóricos mobilizados, as evidências empíricas identificadas e suas respectivas implicações analíticas e gerenciais.

Quadro 5 – Fundamentos teóricos, evidências empíricas e implicações

Dimensão Analítica	Fundamentação Teórica	Evidências Empíricas do Estudo	Implicações Analíticas e Gerenciais
Integração multidimensional	Bertalanffy (1968); Kast e Rosenzweig (1972)	Associação entre múltiplas dimensões da estrutura analítica	Indica a necessidade de abordagem sistêmica
Variabilidade organizacional	Lawrence e Lorsch (1967); Donaldson (2001)	Diferenças entre empresas na adoção das práticas	Sugere adaptação ao contexto organizacional
Recursos internos	Barney (1991); Wernerfelt (1984)	Relação entre capacidades organizacionais e adoção	Indica relevância dos recursos internos
Redes e ambiente	Powell (1990)	Indícios de influência de fatores externos	Sugere importância de redes e cooperação
Estrutura fatorial	Hair et al. (2019)	Identificação de fatores latentes	Indica consistência inicial da estrutura
Construção teórica	Whetten (1989); Bacharach (1989)	Organização das dimensões na estrutura analítica	Contribui para sistematização conceitual
Limitações metodológicas	Hair et al. (2019); Colquitt e Zapata-Phelan (2007)	Natureza exploratória e transversal dos dados	Reforça necessidade de validação futura

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.2. Análise crítica dos resultados

De forma geral, a estrutura identificada indica uma clara distinção entre dois conjuntos de elementos: um relacionado à orientação estratégica, tecnológica e operacional da sustentabilidade e outro vinculado às capacidades organizacionais internas. Essa configuração sugere que a manufatura sustentável, no contexto das MPMs, estrutura-se a partir da interação entre dois pilares fundamentais, compreendendo, de um lado, a execução e o direcionamento estratégico da sustentabilidade e, de outro, as capacidades organizacionais e humanas necessárias para sustentar e viabilizar a implementação dessas práticas no ambiente empresarial.

A elevada variância explicada (87,16%) e a presença de cargas fatoriais cruzadas indicam que as dimensões apresentam sobreposição conceitual e interdependência estrutural, reforçando a interpretação de que o modelo não deve ser compreendido como um conjunto de dimensões isoladas, mas como um sistema integrado. Embora os resultados indiquem uma elevada proporção de variância explicada, sugerindo consistência estatística da solução fatorial, recomenda-se cautela na sua interpretação. A estrutura identificada deve ser compreendida

como uma representação empírica do conjunto de dados analisado, podendo ser influenciada por características específicas da amostra e do instrumento utilizado.

Adicionalmente, a presença de cargas fatoriais relevantes em mais de um fator para determinadas dimensões pode indicar interdependência entre os construtos, aspecto compatível com a natureza sistêmica da Manufatura Sustentável 4.0. Nesse sentido, a análise fatorial não deve ser interpretada como uma redefinição conclusiva da estrutura teórica do modelo, mas sim como uma evidência empírica que contribui para sua compreensão e eventual refinamento, podendo subsidiar análises futuras, inclusive por meio de técnicas confirmatórias.

Em termos gerais, os resultados sugerem que as dimensões do modelo podem ser organizadas em dois fatores latentes principais, associados, respectivamente, a aspectos estratégico-operacionais e organizacionais. Essa redução dimensional pode contribuir para a análise e interpretação do modelo, especialmente em contextos aplicados, sem, entretanto, eliminar a necessidade de considerar a complexidade e a interdependência entre as dimensões originais.

Essa configuração apresenta proximidade com resultados empíricos anteriores, nos quais a análise fatorial resultou na redução de dimensões em fatores mais sintéticos, contribuindo para a simplificação e operacionalização de modelos aplicados a MPMEs. Estudos como os de Machado et al. (2018) indicam que, em contextos organizacionais de menor porte, há tendência de menor diferenciação estrutural entre dimensões, o que resulta em maior integração entre práticas estratégicas, operacionais e organizacionais.

5.3. Integração entre dimensões analíticas, variáveis e fundamentos teóricos

Com o objetivo de ampliar a interpretação integrada dos resultados empíricos, os Quadros 5 e 6 sistematizam as relações entre as dimensões analíticas investigadas, as variáveis consideradas, os agrupamentos fatoriais identificados na análise fatorial exploratória e os fundamentos teóricos utilizados na pesquisa. A divisão entre capacidades organizacionais e estratégia de negócio está alinhada aos resultados empíricos apresentados na Tabela 12 – Análise Fatorial para Dimensões de Avaliação de Manufaturas Sustentáveis, reforçando a existência de dois grandes eixos estruturantes da manufatura sustentável no contexto das MPMEs.

Sob essa perspectiva, os quadros reforçam que a manufatura sustentável não deve ser compreendida apenas como adoção de tecnologias ou práticas ambientais isoladas, mas como um fenômeno organizacional multidimensional, condicionado por fatores contingenciais, pressões de stakeholders e relações interorganizacionais em rede. Dessa forma, a interpretação

conjunta das dimensões analisadas contribui para consolidar uma leitura mais sistêmica e adaptativa da sustentabilidade industrial em micro, pequenas e médias empresas.

Os resultados sintetizados no (Quadro 6) evidenciam que a capacidade organizacional representa um dos condicionantes relevantes para a adoção de práticas de manufatura sustentável em MPMEs. Observa-se que fatores relacionados à estrutura organizacional, liderança, cultura interna e qualificação dos colaboradores exercem influência direta sobre a capacidade das empresas em incorporar práticas sustentáveis de forma estruturada e contínua.

Sob a perspectiva da Teoria da Contingência, os achados sugerem que não existe uma configuração organizacional universalmente adequada para a implementação da sustentabilidade industrial, sendo necessária adaptação às condições específicas de cada organização, considerando limitações de recursos, maturidade gerencial e contexto competitivo. Paralelamente, a Teoria dos Stakeholders contribui para compreender que a sustentabilidade depende da articulação entre diferentes atores organizacionais e institucionais, reforçando a importância da legitimidade organizacional, do engajamento interno e das relações externas no desenvolvimento de práticas sustentáveis.

Nesse sentido, as evidências indicam que a manufatura sustentável em MPMEs depende não apenas de investimentos tecnológicos ou operacionais, mas também do fortalecimento das capacidades organizacionais internas, especialmente no que se refere à gestão de pessoas, coordenação organizacional e integração entre objetivos econômicos, sociais e ambientais.

Quadro 6 – Capacidades organizacionais associadas à manufatura sustentável em MPMEs

Dimensão Analítica	Principais variáveis associadas	Teoria predominante	Interpretação analítica	Implicações para MPMEs
Organizacional	Estrutura organizacional, liderança, governança, cultura organizacional, alinhamento interno	Teoria da Contingência	A capacidade de adoção da manufatura sustentável depende do alinhamento entre estrutura organizacional, contexto competitivo, maturidade gerencial e disponibilidade de recursos.	As MPMEs necessitam de estruturas mais flexíveis e adaptativas, compatíveis com suas limitações operacionais e financeiras.
Recursos Humanos / Social	Capacitação, engajamento de colaboradores, barreiras culturais, indicadores sociais, relacionamento com stakeholders	Teoria dos Stakeholders	A sustentabilidade depende da capacidade organizacional de integrar interesses internos e externos, promovendo legitimidade, participação e cooperação social.	O envolvimento de colaboradores, fornecedores, clientes e instituições externas torna-se fator crítico para viabilizar práticas sustentáveis.

Dimensão Analítica	Principais variáveis associadas	Teoria predominante	Interpretação analítica	Implicações para MPMEs
CAPACIDADE ORGANIZACIONAL	Relações entre liderança, estrutura, pessoas e legitimidade organizacional	Integração entre Stakeholders e Contingência	A manufatura sustentável depende da capacidade organizacional de adaptação estrutural e de articulação entre diferentes atores internos e externos.	A consolidação de práticas sustentáveis em MPMEs exige desenvolvimento gradual de maturidade organizacional, capacitação e alinhamento estratégico interno.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A manufatura sustentável em MPMEs está associada à integração de fatores estratégicos, econômicos, operacionais, tecnológicos e ambientais, reforçando seu caráter multidimensional e sistêmico, conforme evidenciado no (Quadro 7). As evidências obtidas sugerem que a sustentabilidade industrial não deve ser compreendida de forma isolada ou restrita às práticas ambientais, mas como resultado da articulação entre decisões estratégicas, capacidades organizacionais e condições estruturais que influenciam diretamente a dinâmica competitiva e adaptativa das organizações.

Sob a ótica da Teoria da Contingência, verifica-se que a adoção de práticas sustentáveis ocorre de maneira heterogênea entre as empresas, sendo influenciada por fatores como disponibilidade de recursos, maturidade tecnológica, capacidade de investimento e pressão competitiva. Essa perspectiva ajuda a explicar por que muitas MPMEs implementam práticas sustentáveis de forma gradual, parcial ou incremental, priorizando ações associadas à eficiência operacional, redução de desperdícios e racionalização de recursos.

A Teoria de Redes amplia essa interpretação ao demonstrar que a inovação tecnológica e a digitalização industrial tendem a depender da capacidade das organizações em estabelecer relações cooperativas e conexões interorganizacionais. Nesse contexto, associações setoriais, fornecedores, instituições de apoio e redes colaborativas podem atuar como mecanismos de compartilhamento de conhecimento e redução de barreiras tecnológicas.

Complementarmente, a Teoria dos Stakeholders contribui para compreender a crescente influência das pressões ambientais, sociais e mercadológicas sobre as decisões organizacionais, reforçando a sustentabilidade como elemento associado à legitimidade, competitividade e permanência das organizações no mercado. Dessa forma, os resultados reforçam a necessidade

de desenvolvimento de abordagens mais adaptativas, flexíveis e contextualizadas para a manufatura sustentável em MPMEs.

Quadro 7 – Estratégia de negócio e dimensões da manufatura sustentável em MPMEs

Dimensão Analítica	Principais variáveis associadas	Teoria predominante	Interpretação analítica	Implicações para MPMEs
Estratégica	Planejamento sustentável, integração da sustentabilidade à estratégia, indicadores de desempenho, posicionamento competitivo	Teoria da Contingência	Estratégias sustentáveis apresentam maior efetividade quando adaptadas às condições ambientais, tecnológicas e institucionais específicas da organização.	As MPMEs tendem a adotar práticas sustentáveis de forma incremental e contingencial, conforme pressão competitiva e capacidade interna.
Econômica	Viabilidade financeira, custos de implementação, retorno econômico, restrições financeiras, produtividade	Teoria da Contingência	A adoção de práticas sustentáveis é condicionada pela disponibilidade de recursos financeiros e pela percepção de retorno econômico.	A limitação de capital e a dificuldade de investimento representam barreiras estruturais relevantes para as MPMEs.
Operacional	Eficiência operacional, redução de desperdícios, Lean Manufacturing, economia circular, gestão de processos	Teoria da Contingência	Processos produtivos sustentáveis dependem da adequação entre tecnologia, operações e contexto organizacional.	A simplificação operacional e o uso racional de recursos surgem como mecanismos mais viáveis para pequenas estruturas produtivas.
Inovação Tecnológica	Digitalização, Indústria 4.0, IoT, Big Data, automação, integração tecnológica	Teoria de Redes	A inovação tecnológica ocorre de forma mais efetiva por meio de conexões interorganizacionais, compartilhamento de conhecimento e cooperação tecnológica.	Redes de cooperação, associações setoriais e parcerias institucionais tornam-se mecanismos relevantes para reduzir limitações tecnológicas das MPMEs.
Ambiental	Gestão ambiental, emissões, resíduos, eficiência energética, práticas ambientais, circularidade	Teoria dos Stakeholders	Pressões regulatórias, sociais e mercadológicas influenciam diretamente a adoção de práticas ambientais sustentáveis.	A legitimidade ambiental passa a representar fator estratégico para permanência e competitividade das MPMEs.
ESTRATÉGIA DE NEGÓCIO	Relações entre estratégia, operações, inovação e sustentabilidade ambiental	Integração entre Stakeholders, Contingência e Redes	A manufatura sustentável configura-se como fenômeno multidimensional, dependente simultaneamente de adaptação organizacional, articulação em rede e resposta às pressões institucionais e mercadológicas.	O desenvolvimento de abordagens adaptadas às MPMEs exige modelos flexíveis, relacionais e contingenciais, compatíveis com ambientes caracterizados por elevada heterogeneidade estrutural.

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os resultados empíricos obtidos encontram suporte nas principais teorias organizacionais que fundamentam o modelo proposto, permitindo uma interpretação integrada do fenômeno. Sob a ótica da Teoria dos Stakeholders, os resultados evidenciam que a incorporação de práticas sustentáveis está associada à necessidade de atender a múltiplos interesses, incluindo demandas ambientais, sociais e econômicas. A presença da dimensão ambiental no mesmo fator que dimensões estratégicas e operacionais sugere que a sustentabilidade tende a ser integrada à lógica de criação de valor organizacional.

A Teoria da Contingência permite compreender a variabilidade observada entre as dimensões, indicando que a adoção da manufatura sustentável depende do alinhamento entre características internas das empresas e condições externas do ambiente. A heterogeneidade dos resultados reforça que não existe uma configuração única aplicável a todas as organizações, sendo necessária adaptação às especificidades contextuais. Por sua vez a Teoria de Redes contribui para a compreensão da dimensão tecnológica e de inovação, indicando que a adoção de práticas associadas à Indústria 4.0 pode estar relacionada à capacidade das organizações de se inserirem em ecossistemas colaborativos, facilitando o acesso a conhecimento, tecnologia e inovação.

5.4. Implicações teóricas

Do ponto de vista teórico, os resultados desta pesquisa contribuem para o avanço da literatura ao evidenciar que a Manufatura Sustentável 4.0, no contexto das MPMEs, apresenta uma estrutura empírica caracterizada por agrupamentos latentes que reorganizam as dimensões originalmente propostas.

A redução das dimensões em fatores mais sintéticos, identificada por meio da análise fatorial exploratória, não implica simplificação conceitual do fenômeno, mas indica a existência de estruturas latentes que organizam e articulam as dimensões em níveis mais agregados. Esse resultado contribui para o refinamento de modelos teóricos, ao evidenciar que a complexidade conceitual pode ser representada por estruturas mais integradas do ponto de vista empírico.

Essa evidência sugere que abordagens baseadas em múltiplas dimensões independentes podem não capturar adequadamente a dinâmica da manufatura sustentável em MPMEs, indicando a necessidade de modelos que considerem a interdependência estrutural entre variáveis e a formação de eixos integradores.

Adicionalmente, os resultados contribuem para a literatura ao evidenciar que a operacionalização empírica da manufatura sustentável tende a ocorrer por meio da

convergência entre dimensões estratégicas, operacionais, tecnológicas e ambientais, enquanto aspectos organizacionais e de recursos humanos configuram um eixo distinto, porém complementar. Essa distinção empírica fornece subsídios para a reestruturação conceitual do fenômeno, indicando a existência de núcleos estruturantes no modelo.

Outro aspecto relevante refere-se à evidência de que a adoção de práticas de manufatura sustentável ocorre de forma relativamente homogênea entre dimensões, porém em níveis intermediários, o que sugere a presença de um estágio de maturidade em transição. Esse resultado contribui para o avanço teórico ao indicar que o desenvolvimento da manufatura sustentável em MPMEs não segue trajetórias lineares ou sequenciais, mas sim processos simultâneos e interdependentes.

Além disso, os achados reforçam a necessidade de transição de modelos predominantemente conceituais para modelos teórico-empíricos, ao demonstrar que a validação estatística pode revelar estruturas diferentes daquelas originalmente propostas na literatura. Essa contribuição é particularmente relevante no contexto de MPMEs, onde a complexidade organizacional é menor e as dimensões tendem a se integrar de forma mais intensa.

Com o objetivo de consolidar essa articulação entre evidências empíricas, fundamentos teóricos e implicações práticas, apresenta-se o (Quadro 8), que sintetiza os principais achados da pesquisa e explicita suas contribuições teóricas. Esse quadro desempenha função integradora ao traduzir os resultados estatísticos em implicações estruturadas, reforçando a coerência entre a análise empírica e o avanço do conhecimento na área.

Quadro 8 – Resultados empíricos fundamentos e implicações gerenciais

Evidência Estatística (Síntese)	Interpretação Teórica	Implicações Gerenciais
Médias intermediárias (~6,0) e convergência entre dimensões	Teoria Geral dos Sistemas – interdependência entre elementos organizacionais	Necessidade de abordagem integrada na implementação da manufatura sustentável
Maior variabilidade em microempresas	Teoria da Contingência – influência do contexto e dos recursos	Adoção deve ser gradual e adaptativa conforme o porte
Alta confiabilidade ($\alpha > 0,95$)	Consistência interna com possível sobreposição parcial de construtos	Possibilidade de simplificação do modelo sem perda analítica relevante
KMO elevado e Bartlett significativo	Adequação para análise multivariada e presença de estrutura latente	Validação do uso de modelos integrados para diagnóstico organizacional
Estrutura bifatorial (87,16% da variância explicada)	RBV e Capacidades Dinâmicas – distinção entre capacidades internas e execução estratégica	Priorização entre desenvolvimento organizacional e implementação operacional
Agrupamento estratégico-operacional (EST, ECO, OPE, INO, AMB)	Integração entre estratégia, operação, tecnologia e sustentabilidade	Necessidade de alinhamento entre inovação, operação e sustentabilidade

Evidência Estatística (Síntese)	Interpretação Teórica	Implicações Gerenciais
Agrupamento organizacional (ORG, SOC)	Capital humano e capacidades organizacionais como base estrutural	Desenvolvimento organizacional como condição para transformação
Convergência entre Análise Fatorial e MDS	Robustez analítica por triangulação de métodos	Maior confiabilidade para aplicação prática do modelo
Estrutura com dois blocos interdependentes	Teoria das Redes e Sistemas – relações dinâmicas entre dimensões	Gestão deve considerar interações entre áreas e não ações isoladas

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5.5. Implicações gerenciais

Os resultados obtidos apresentam implicações relevantes para a gestão de MPMEs, especialmente no que se refere à implementação de práticas de manufatura sustentável.

A identificação de lacunas entre importância e utilização indica a necessidade de maior alinhamento entre planejamento estratégico e execução operacional. Esse desalinhamento pode comprometer a efetividade das iniciativas sustentáveis, exigindo mecanismos de integração entre níveis estratégico e operacional.

A estrutura fatorial identificada sugere que a implementação da manufatura sustentável deve ser conduzida de forma integrada, considerando simultaneamente aspectos tecnológicos, operacionais e organizacionais. Abordagens isoladas tendem a apresentar menor efetividade, uma vez que as dimensões demonstram interdependência estrutural.

A relevância das capacidades organizacionais evidencia a necessidade de investimentos em desenvolvimento de competências, qualificação de recursos humanos e fortalecimento da estrutura organizacional, elementos essenciais para a sustentação das práticas implementadas.

Adicionalmente, os resultados indicam que a adoção de tecnologias associadas à Indústria 4.0 deve ser acompanhada de mudanças organizacionais, evitando abordagens centradas exclusivamente na tecnologia, sem alinhamento com processos e pessoas.

Por fim, a heterogeneidade observada reforça a necessidade de modelos adaptativos, capazes de considerar as especificidades das MPMEs, incluindo limitações de recursos, maturidade tecnológica e contexto institucional.

5.6. Limitações da pesquisa

A presente pesquisa apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados, especialmente no que se refere aos aspectos metodológicos, amostrais e de escopo analítico.

Em primeiro lugar, a natureza exploratória do estudo, associada ao uso da análise fatorial exploratória, não permite inferências causais entre as variáveis investigadas, restringindo as

conclusões à identificação de padrões de associação e estruturas latentes. Nesse sentido, os resultados devem ser interpretados como evidências iniciais de organização do fenômeno, e não como relações confirmadas de causa e efeito.

Em segundo lugar, a utilização de survey implica a coleta de dados baseada na percepção dos respondentes, o que pode introduzir vieses associados à subjetividade das respostas. Apesar disso, esse risco é parcialmente mitigado pelo perfil qualificado da amostra, composta majoritariamente por profissionais com elevada experiência e atuação em níveis estratégicos e gerenciais.

No que se refere à amostra, embora o tamanho ($n = 155$) seja adequado para os procedimentos estatísticos adotados, a concentração geográfica no Brasil, com predominância no estado de São Paulo, limita a generalização dos resultados para outros contextos regionais e internacionais. Assim, os achados devem ser interpretados à luz das características institucionais e econômicas do ambiente analisado.

Adicionalmente, o caráter transversal da pesquisa restringe a análise a um recorte temporal específico, não permitindo observar a evolução das práticas de manufatura sustentável ao longo do tempo, tampouco identificar trajetórias de maturidade organizacional.

Por fim, a utilização da análise fatorial exploratória, embora adequada aos objetivos do estudo, não permite a confirmação da estrutura do modelo proposto, sendo necessária a aplicação de técnicas confirmatórias, como modelagem de equações estruturais, em estudos futuros, com vistas à validação mais robusta das relações identificadas.

5.7. Agenda para pesquisas futuras

A partir dos resultados obtidos e das limitações identificadas, delineiam-se oportunidades relevantes para o avanço das investigações no campo da manufatura sustentável, especialmente no contexto das MPMEs.

Inicialmente, recomenda-se o desenvolvimento de estudos de natureza longitudinal, com o objetivo de analisar a evolução da maturidade em manufatura sustentável ao longo do tempo. Essa abordagem permitirá compreender trajetórias de desenvolvimento, identificar estágios de consolidação e examinar a dinâmica de integração entre dimensões organizacionais, tecnológicas e ambientais.

Adicionalmente, a ampliação do escopo geográfico das pesquisas constitui um caminho importante para o aprofundamento do conhecimento na área. A inclusão de diferentes contextos institucionais e regionais possibilitará avaliar a influência de fatores externos, como políticas

públicas, ambiente regulatório e nível de desenvolvimento econômico, sobre a adoção das práticas de manufatura sustentável.

Do ponto de vista metodológico, destaca-se a necessidade de aplicação de técnicas confirmatórias, como a modelagem de equações estruturais (PLS-SEM), com vistas à validação da estrutura do modelo proposto e ao teste de relações entre construtos. Esse avanço permitirá fortalecer a consistência teórico-empírica do modelo e ampliar sua aplicabilidade em diferentes contextos organizacionais.

Outra linha promissora refere-se à incorporação de métricas objetivas de desempenho organizacional, permitindo a análise da relação entre o nível de adoção da manufatura sustentável e resultados mensuráveis, como produtividade, eficiência operacional, desempenho ambiental e competitividade. Essa integração contribuirá para reduzir a dependência de dados perceptuais e ampliar a robustez das evidências empíricas.

Além disso, recomenda-se a inclusão de variáveis moderadoras e condicionantes, como porte da empresa, nível de digitalização, setor de atuação e contexto institucional, possibilitando análises mais refinadas das relações identificadas e contribuindo para a compreensão das condições sob as quais o modelo apresenta maior aderência.

Por fim, a realização de estudos comparativos entre MPMEs e grandes organizações pode fornecer evidências adicionais sobre diferenças estruturais na adoção da manufatura sustentável, permitindo identificar especificidades, limitações e potencialidades associadas a cada porte organizacional.

Em conjunto, essas direções indicam caminhos para o avanço da literatura, ao promover a evolução de modelos exploratórios para abordagens confirmatórias e integradas, contribuindo para a consolidação da manufatura sustentável como campo de investigação teórico-empírico aplicado.

5.8. Considerações finais

A presente tese teve como objetivo oferecer avanços conceituais e direções analíticas de manufatura sustentável aplicável às MPMEs, considerando suas especificidades organizacionais e contextuais.

A partir das análises realizadas, os resultados indicam que a manufatura sustentável, no contexto das MPMEs, não se configura como um conjunto de práticas isoladas, mas como um fenômeno de natureza multidimensional, estruturado por relações de interdependência entre dimensões organizacionais, estratégicas, operacionais, tecnológicas e ambientais.

A evidência empírica obtida, especialmente por meio da análise fatorial exploratória, permitiu identificar a presença de estruturas latentes que reorganizam as dimensões analíticas

em eixos integradores. Esse resultado sugere que a complexidade conceitual da manufatura sustentável pode ser representada por configurações empíricas mais sintéticas, evidenciando a existência de padrões estruturais subjacentes que contribuem para a compreensão do fenômeno.

Nesse sentido, a questão de pesquisa proposta relacionada à proposição de direções para o desenvolvimento de modelos de manufatura sustentável aplicável às MPMEs é respondida ao demonstrar que tais direções devem considerar a natureza sistêmica e integrada do fenômeno, incorporando a interação entre capacidades organizacionais, direcionamento estratégico, execução operacional, inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental.

Os resultados também indicam que a adoção da manufatura sustentável ocorre em níveis intermediários de maturidade, com evidência de diferenças entre dimensões e indícios de desalinhamento parcial entre planejamento estratégico e execução operacional. Esse padrão reforça a compreensão de que a incorporação da sustentabilidade nas MPMEs ocorre de forma gradual, condicionada por limitações estruturais e capacidades organizacionais disponíveis.

A articulação entre evidências empíricas e fundamentação teórica permitiu consolidar uma estrutura analítica coerente, capaz de representar o fenômeno de forma integrada e aderente ao contexto das MPMEs.

De forma geral, os achados desta tese indicam que a manufatura sustentável deve ser compreendida como um sistema organizacional complexo, no qual diferentes dimensões interagem de maneira dinâmica e interdependente, exigindo abordagens integradas tanto para sua análise quanto para sua implementação.

Assim, a estrutura analítica desenvolvida constitui uma aproximação teórico-empírica que contribui para a compreensão do fenômeno e oferece uma base estruturada para análises futuras, ao mesmo tempo em que evidencia a necessidade de continuidade das investigações para aprofundamento e refinamento do conhecimento na área.

REFERÊNCIAS

- ACQUAH, I. S. K. Assessing the impact of Industry 4.0 technologies on sustainable manufacturing: evidence from a developing country. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 362, p. 132332, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132332>.
- ACQUAH, I. S. K.; LAARI, S.; PÄRNÄNEN, K.; KAINUMA, Y. A hybrid approach of PLS-SEM and fsQCA to measure environmental performance in sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 385, p. 135703, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135703>.
- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL (ABDI). Transformação digital da indústria brasileira: desafios e perspectivas. Brasília: ABDI, 2023.
- AGRAWAL, R.; WANKHEDE, V. A.; KUMAR, A. Enablers and barriers of sustainable manufacturing: Results from a survey. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 29, p. 252-267, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.09.029>.
- AHMADOV, T.; GERSTLBERGER, W.; RAHMAN, M. Firm size as a moderator of stakeholder pressure and circular economy practices: implications for SMEs. *Journal of Entrepreneurship, Management and Innovation*, [S. l.], 2025.
- ALKANDI, I. et al. Green supply chain management and sustainable performance: a resource-based view perspective. *Sustainability*, [S. l.], v. 17, 2025.
- ARROSYID, A. F.; NUGRAHA, A. S.; MAULANA, H. Stakeholder theory approach in strategic management: a critical review and practical implications. *Brilliant International Journal of Management and Tourism*, [S. l.], 2026.
- BACHARACH, S. B. Organizational Theories: Some Criteria for Evaluation. *Academy of Management Review*, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 496-515, 1989.
- BAG, S. et al. Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], 2021.
- BAG, S.; GUPTA, S.; KUMAR, A.; SIVARAJAH, U. Industry 4.0 adoption and manufacturing sustainability: A systematic review and future research agenda. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 390, p. 136069, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136069>.
- BAG, S.; SAHU, A. K.; KILBOURN, P.; PISA, N.; DHAMIJA, P. Modeling barriers of digital manufacturing in a circular economy for enhancing sustainability. *Technological Forecasting and Social Change*, [S. l.], v. 183, p. 121899, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121899>.
- BAG, S.; TELUKDARIE, A.; CHEN, C. C.; DONG, Q. The role of industry 4.0 technologies in sustainable manufacturing: A systematic literature review and future research agenda. *Technological Forecasting and Social Change*, [S. l.], v. 171, p. 120971, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120971>.
- BAG, S.; TELUKDARIE, A.; PRETORIUS, J. H. C.; GUPTA, S. Industry 4.0 and supply chain sustainability: Framework and future research directions. *Benchmarking: An International Journal*, [S. l.], v. 25, n. 9, p. 3238-3264, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2017-0059>.
- BAG, S.; YADAV, G.; DHAMIJA, P.; KATARIA, K. K. The role of organizational enablers in successful implementation of sustainable manufacturing practices: An empirical

study. *Business Strategy and the Environment*, [S. l.], v. 29, n. 2, p. 763-778, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/bse.2406>.

BAG, S.; YADAV, G.; LUTHRA, S. Relationships between Industry 4.0, sustainable manufacturing and circular economy: Proposal of a research framework. *International Journal of Production Research*, [S. l.], v. 59, n. 16, p. 4960-4978, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1824088>.

BARNEY, J. B. Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, Thousand Oaks, v. 17, n. 1, p. 99-120, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1177/014920639101700108>.

BERTALANFFY, L. von. *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. New York: George Braziller, 1968.

BHANOT, N. An integrated approach for analysing the enablers and barriers of sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 275, p. 122474, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122474>.

BHANOT, N.; RAO, P. V.; DESHMUKH, S. G. Enablers and barriers of sustainable manufacturing: Results from a survey of researchers and industry professionals. *Procedia CIRP*, [S. l.], v. 29, p. 562-567, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.036>.

BROWN, Timothy A. *Confirmatory Factor Analysis for Applied Research*. 2. ed. New York: The Guilford Press, 2015.

CANNAS, R. et al. Sustainable and digital manufacturing in rsl. *Journal of Manufacturing Technology Management*, [S. l.], 2023.

CANNAS, V. G.; POZZI, R.; SAPORITI, N.; URBINATI, A. Unveiling the interaction among circular economy, industry 4.0, and lean production: A multiple case study analysis and an empirically based framework. *International Journal of Production Economics*, [S. l.], v. 282, p. 109537, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2025.109537>.

CENTOBELLI, P.; CERCHIONE, R.; ESPOSITO, E. Navigating the smart circular economy: A framework for manufacturing firms. *Technological Forecasting and Social Change*, [S. l.], v. 153, p. 119211, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119211>.

CHOURASIYA, R. Towards sustainable success: A framework for assessing performance of sustainable manufacturing adoption in Indian textile industry. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 280, p. 124260, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124260>.

CILIBERTO, C. Enabling the Circular Economy transition: A sustainable lean manufacturing recipe for Industry 4.0. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 31, p. 452-468, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.02.017>.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). *Mapa Estratégico da Indústria 2023-2032: Desenvolvimento Produtivo, Inovação e Tecnologia*. Brasília: CNI, 2025.

DEL GIUDICE, M. A self-tuning model for smart manufacturing SMEs: Effects on digital innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, [S. l.], v. 180, p. 121706, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121706>.

DESPEISSE, M. Sustainable manufacturing tactics and cross-functional factory modelling. *Journal of Manufacturing Technology Management*, [S. l.], v. 31, n. 3, p. 481-501, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1108/JMTM-01-2019-0014>.

DESPEISSE, M.; OATES, M. R.; BALL, P. D. Sustainable manufacturing tactics and cross-functional factory modelling. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 42, p. 31-41, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.008>.

DONALDSON, L. *The contingency theory of organizations*. Thousand Oaks: Sage Publications, 2001.

DONALDSON, T.; PRESTON, L. E. The stakeholder theory of the corporation: Concepts, evidence, and implications. *Academy of Management Review*, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 65-91, 1995. DOI: <https://doi.org/10.5465/amr.1995.9503271992>.

DUBEY, R. Big data analytics and artificial intelligence pathway to operational performance under the effects of entrepreneurial orientation and environmental dynamism: A study of manufacturing organisations. *Technological Forecasting and Social Change*, [S. l.], v. 167, p. 120705, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120705>.

DUBIN, R. *Theory Building*. 2. ed. New York: Free Press, 1978.

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

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

FABRIGAR, Leandre R.; WEGENER, Duane T. *Exploratory Factor Analysis*. New York: Oxford University Press, 2012.

FORZA, Cipriano. Survey research in operations management: a process-based perspective. *International Journal of Operations & Production Management*, Bingley, v. 22, n. 2, p. 152-194, 2002.

FREEMAN, R. E. *Strategic management: A stakeholder approach*. Boston: Pitman, 1984.

FREEMAN, R. E.; HARRISON, J. S.; WICKS, A. C. *Managing for stakeholders: Survival, reputation, and success*. New Haven: Yale University Press, 2007.

GADEKAR, R. Model development for assessing inhibitors impacting Industry 4.0 implementation in Indian manufacturing industries: An integrated ISM-Fuzzy MICMAC approach. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 279, p. 123698, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123698>.

GANJAVI, N. Integrated sustainable production value measurement model based on lean and six sigma in Industry 4.0 context. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 332, p. 129917, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129917>. GARZA-REYES, J. A. et al. Lean and green - A systematic review of the state-of-the-art literature. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 234, p. 102-120, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.194>. GARZA-REYES, J. A.; SALOMÉ VALLS, A.; PETER, S.; KUMAR, V. Does lean and sustainable manufacturing lead to Industry 4.0 adoption? *International Journal of Production Economics*, [S. l.], v. 223, p. 107534, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107534>.

GARZA-REYES, J. A.; KUMAR, V. Unveiling the interaction among circular economy, Industry 4.0, and lean production: A multiple case study analysis and an empirically based

framework. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 330, p. 129811, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129811>.

GHOBAKHLOO, M. Empowering sustainable manufacturing through digital transformation. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 268, p. 122425, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122425>.

GHOBAKHLOO, M. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 252, p. 119869, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>.

GOVINDAN, K.; DIABAT, A.; SHANKAR, K. M. Identification of barriers to sustainable manufacturing using interpretive structural modeling and fuzzy MICMAC analysis. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 96, p. 214-228, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.014>.

GULATI, R. Alliances and networks. *Strategic Management Journal*, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 293-317, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199804\)19:4<293::AID-SMJ982>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199804)19:4<293::AID-SMJ982>3.0.CO;2-M).

GUPTA, H.; KUMAR, A.; WASAN, P. Industry 4.0, cleaner production and circular economy: An integrative framework for evaluating ethical and sustainable business performance of manufacturing organizations. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 297, p. 126645, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126645>.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E. *Multivariate data analysis*. 8. ed. Boston: Cengage, 2019.

HAIR, J. F.; HULT, G. T. M.; RINGLE, C.; SARSTEDT, M. *A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)*. 3. ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4135/9781071803221>.

HARIKANNAN, N. Analysis of the relationship among Industry 4.0 technologies, sustainable manufacturing practices and organizational sustainable performance using structural equation modelling. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 27, p. 1325-1344, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.002>.

HARIYANI, S.; MISHRA, R. Organizational enablers for sustainable manufacturing and Industry 4.0: An empirical study. *Clean Technologies and Environmental Policy*, [S. l.], v. 24, n. 5, p. 1507-1520, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02214-1>.

HERZALLAH, A. M. et al. Sustainable innovation as a catalyst linking green supply chain management and performance. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, [S. l.], 2025.

INSTITUTE FOR MANAGEMENT DEVELOPMENT (IMD). *World Digital Competitiveness Ranking 2024*. IMD, 2024. Disponível em: <https://www.imd.org/centers/wcc/world-digital-competitiveness-ranking/>. Acesso em: 31 ago. 2025.

JABBOUR, A. B. L. de S.; JABBOUR, C. J. C.; GODINHO FILHO, M.; ROUBAUD, D. Industry 4.0 and the circular economy: A proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. *Annals of Operations Research*, [S. l.], v. 270, p. 273-286, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2772-8>.

JABBOUR, C. J. C.; DE SOUSA JABBOUR, A. B. L.; FOROPON, C.; GODINHO FILHO, M. Investigating the role of sustainable manufacturing adoption in improving firms'

financial and market performance. *International Journal of Production Economics*, [S. l.], v. 227, p. 107690, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107690>.

JABBOUR, C. J. C.; FIORINI, P. D. C.; NDUBISI, N. O.; QUEIROZ, M. M.; PIATO, É. L. Navigating the smart circular economy: A framework for manufacturing firms. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 386, p. 135748, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135748>.

JAMWAL, A. et al. Sustainable manufacturing in Industry 4.0: A review on sustainable manufacturing frameworks and sustainability performance measurement. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 336, p. 130385, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130385>.

JAMWAL, A.; AGARWAL, V.; GUPTA, S.; LUU, T. V. Sustainability in manufacturing: a review of enablers, performance measures, and circular economy perspective. *Journal of Manufacturing Systems*, [S. l.], v. 69, p. 551-569, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.07.005>.

JAMWAL, A.; AGRAWAL, R.; SHARMA, M. Deep learning for manufacturing sustainability: Models, applications in Industry 4.0 and implications. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 35, p. 30-50, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.02.002>.

JENA, A. A hybrid fuzzy based approach for Industry 4.0 framework implementation strategy and its sustainability in Indian automotive industry. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 356, p. 131878, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131878>.

JOUNG, C. B. et al. A framework for sustainable manufacturing indicators. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013.

JOUNG, C. B.; CARRELL, J.; SARKAR, P.; FENG, S. C. Categorization of indicators for sustainable manufacturing. *Ecological Indicators*, [S. l.], v. 24, p. 148-157, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.05.030>.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A.; GAWANKAR, S. A. Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, [S. l.], v. 117, p. 408-425, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>.

KAMBLE, S.; GUNASEKARAN, A.; GAWANKAR, S. A.; DHONE, N. C. A systematic review of barriers to sustainable manufacturing in emerging economies. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 24, p. 136-152, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.07.007>.

KHAN, O.; MAJAVA, J. Collaboration in circular economy and sustainable networks. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], 2021.

KHAN, S. A. R.; YU, Z.; UMAR, M.; TANVEER, M. Investigating the role of sustainable manufacturing adoption in improving firms' financial and environmental performance: Evidence from emerging economies. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 351, p. 131566, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131566>.

KHAN, S. Navigating the Smart Circular Economy: A framework for manufacturing firms. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 396, p. 136134, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136134>.

KHAN, S.; HALEEM, A.; KHAN, M. I. Main challenges involved in the adoption of sustainable manufacturing practices: A study in the Indian context. *Journal of Manufacturing Technology Management*, [S. l.], v. 31, n. 5, p. 1035-1058, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1108/JMTM-07-2019-0267>.

KHANZODE, A. G. Modelling interactions of select enablers of Lean Six-Sigma considering sustainability implications: An integrated circular economy and Industry 4.0 perspective. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 293, p. 126178, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126178>.

KRISTOFFERSEN, E. The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 392, p. 136306, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136306>.

KUMAR, A.; SINGH, R. K.; KUMAR, V.; SCHOLTEN, K. A framework for assessing the sustainable Industry 4.0 practices in the context of circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 27, p. 1068-1081, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.020>.

LEE, Ho. *The Practice of Survey Research: Theory and Applications*. Thousand Oaks: SAGE Publications, 2011.

LI, X. et al. Sustainable supply chain management practices and performance: the role of stakeholder pressure. *Humanities and Social Sciences Communications*, [S. l.], 2025.

LIM, M. K. Circular economy to ensure production operational sustainability: A green-lean approach. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 30, p. 251-261, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.015>.

LOPES DE SOUSA JABBOUR, A. B. Does applying a circular business model lead to organizational resilience? Mediating effects of Industry 4.0 and customers integration. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 32, p. 124-138, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.04.002>. DE SOUSA JABBOUR, A. B. et al. Circular economy business models and operations management. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 328, p. 129577, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129577>.

LOPES DE SOUSA JABBOUR, A. B. et al. Unlocking the circular economy through new business models based on digital technologies: An integrative framework. *Resources, Conservation and Recycling*, [S. l.], v. 180, p. 106223, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106223>.

LOPES DE SOUSA JABBOUR, A. B.; JABBOUR, C. J. C.; FOROPON, C.; GODINHO FILHO, M. When titans meet - Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. *Technological Forecasting and Social Change*, [S. l.], v. 132, p. 18-25, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.017>.

LUU, N. A. et al. Circular economy and Industry 4.0: A review. *Sustainability*, [S. l.], 2022.

LUU, T. V. A model of Industry 4.0 and a circular economy for green logistics and a sustainable supply chain. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 368, p. 133051, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133051>.

MACHADO, M. C. et al. Towards a new model for SME self-assessment: a Brazilian empirical study. *Total Quality Management & Business Excellence*, [S. l.], v. 31, n. 9-10, p. 1041-1059, 2020.

MCGUIRE, S.; SHULTZ, E.; AYOOLA, B.; RALPH, P. Sustainability is stratified: toward a better theory of sustainable systems. *arXiv*, [S. l.], 2023.

MOKTADIR, M. A. Drivers to sustainable manufacturing practices and circular economy: A perspective of leather industries in Bangladesh. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 274, p. 122844, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122844>.

MULLER, J. M. Barriers and enablers for Industry 4.0 in SMEs: A combined integration framework. *Technological Forecasting and Social Change*, [S. l.], v. 177, p. 121509, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121509>.

MULLER, J. M.; BULIGA, O.; VOIGT, K. I. Empowering sustainable manufacturing: Unleashing digitalization and circular economy toward resource-efficient production. *Technological Forecasting and Social Change*, [S. l.], v. 165, p. 120530, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120530>.

NAHAPIET, J.; GHOSHAL, S. Social capital, intellectual capital, and the organizational advantage. *Academy of Management Review*, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 242-266, 1998. DOI: <https://doi.org/10.5465/amr.1998.533225>.

NEUMAN, W. Lawrence. *Social Research Methods: Qualitative and Quantitative Approaches*. 7. ed. Boston: Pearson Education, 2014.

NIEWIADOMSKI, P. Identification of barriers to sustainable manufacturing implementation-The perspective of manufacturers of parts and components for agricultural transport. *Sustainability*, [S. l.], v. 13, n. 4, p. 2091, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13042091>.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, [S. l.], v. 372, n. 71, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.

PALMIÉ, M.; AEBERSOLD, A.; OGHAZI, P.; PASHKEVICH, N.; GASSMANN, O. Digital-sustainable business models: Definition, systematic literature review, integrative framework and research agenda from a strategic management perspective. *International Journal of Management Reviews*, [S. l.], v. 26, n. 3, p. 1-29, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijmr.12380>.

PIERONI, M. P. P.; MCALOONE, T. C.; PIGOSSO, D. C. A. Digital-sustainable business models: Definition, systematic literature review, and research agenda. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 27, p. 1722-1740, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.04.021>.

POWELL, W. W. Neither market nor hierarchy: Network forms of organization. *Research in Organizational Behavior*, [S. l.], v. 12, p. 295-336, 1990.

POWELL, W. W.; DIMAGGIO, P. J. (Ed.). *The new institutionalism in organizational analysis*. Chicago: University of Chicago Press, 1991.

PRAUSE, M. Challenges of Industry 4.0 technology adoption for SMEs: The case of Japan. *Sustainability*, [S. l.], v. 13, n. 4, p. 2362, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13042362>.

RAJPUT, S. Industry 4.0 model for integrated circular economy-reverse logistics network. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 26, p. 103-117, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.11.005>.

RAJPUT, S.; SINGH, S. P. Identifying drivers to sustainable manufacturing practices and circular economy: A case of Indian manufacturing industries. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 276, p. 123227, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123227>.

REHMAN, M. A. et al. A review of green manufacturing practices and challenges. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 137, p. 427-448, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.141>.

REHMAN, M. A. Impact of green manufacturing practices on organisational performance in Indian context: An empirical study. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 32, p. 435-446, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.05.003>.

REIS, J.; AMORIM, M.; MELÃO, N. Distinguishing digitization, digitalization and digital transformation: A systematic literature review. *Information Systems Frontiers*, [S. l.], v. 22, n. 6, p. 1463-1477, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-019-09975-3>.

SARTAL, A. The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 276, p. 124178, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124178>.

SARTAL, A.; BELLAS, R.; MEJÍAS, A. M.; GARCÍA-COLLADO, A. The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: A literature review. *Advances in Mechanical Engineering*, [S. l.], v. 12, n. 5, p. 1-17, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814020925232>.

SCHNELLBACH, P. Evaluating the effects of energy productivity measures on lean production key performance indicators. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 28, p. 1550-1561, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.002>.

SHARMA, M.; LUTHRA, S.; MANGLA, S. K.; GARG, C. P. Industry 4.0-driven business model innovation for supply chain sustainability: A systematic review and future research directions. *Sustainability*, [S. l.], v. 12, n. 21, p. 8658, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12218658>.

SINGH, S. P. Connecting circular economy and Industry 4.0. *International Journal of Information Management*, [S. l.], v. 49, p. 98-113, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.03.002>.

SKALLI, D. et al. Analyzing the integrated effect of circular economy, Lean Six Sigma, and Industry 4.0 on sustainable manufacturing performance. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 330, p. 129803, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129803>.

SNYDER, H. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, [S. l.], v. 104, p. 333-339, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>.

STOCK, T. et al. Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. *Process Safety and Environmental Protection*, [S. l.], v. 118, p. 254-267, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.026>.

STOCK, T.; SELIGER, G. Opportunities of sustainable manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, [S. l.], v. 40, p. 536-541, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>.

STRIELKOWSKI, W. et al. Organizational sustainability via systems thinking: a soft systems methodology approach. *arXiv*, [S. l.], 2023.

TABACHNICK, B. G.; FIDELL, L. S. *Using multivariate statistics*. 7. ed. Boston: Pearson, 2019.

TANCO, M. et al. Main challenges involved in the adoption of sustainable manufacturing in Uruguayan small and medium-sized companies. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 27, p. 1267-1281, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.001>.

TIWARI, A. et al. A review of research in sustainable manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, [S. l.], v. 31, n. 7, p. 655-681, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1444814>.

TIWARI, S.; KHAN, M. S. Towards strategic digital transformation and manufacturing sustainability via crowdfunding business model. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 403, p. 136773, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136773>. VALDEZ-JUÁREZ, L. E. Digital transformation and innovation, dynamic capabilities to strengthen the financial performance of Mexican SMEs: A sustainable approach. *Technological Forecasting and Social Change*, [S. l.], v. 180, p. 121711, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121711>.

VELEVA, V.; ELLENBECKER, M. Indicators of sustainable production: framework and methodology. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 9, n. 6, p. 519-549, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00010-5](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00010-5).

VINODH, S. Structural equation modeling of sustainable manufacturing practices. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 31, p. 212-223, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.019>.

VINODH, S.; BEN RUBEN, R.; ASOKAN, P. Towards sustainable success: A framework for assessing the performance of manufacturing firms. *Sustainability*, [S. l.], v. 8, n. 7, p. 647, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/su8070647>.

VINODH, S.; JAYAKRISHNA, K. Assessing the performance of manufacturing sustainability: A conceptual approach. *International Journal of Process Management and Benchmarking*, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 1-20, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPMB.2018.10008946>.

VINODH, S.; JAYAKRISHNA, K. Organizational enablers for sustainable manufacturing and Industry 4.0: An empirical study. *Clean Technologies and Environmental Policy*, [S. l.], v. 21, n. 3, p. 631-645, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-018-01686-0>.

VINODH, S.; JOY, D. A framework to achieve sustainability in manufacturing organizations. *International Journal of Production Research*, [S. l.], v. 50, n. 17, p. 4753-4768, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.637937>.

WERNERFELT, B. A resource-based view of the firm. *Strategic Management Journal*, Chichester, v. 5, n. 2, p. 171-180, 1984. DOI: <https://doi.org/10.1002/smj.4250050207>.

WHETTEN, D. A. What constitutes a theoretical contribution? *Academy of Management Review*, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 490-495, 1989. DOI: <https://doi.org/10.5465/amr.1989.4308371>.

XU, J. Impacts of digital transformation on eco-innovation and sustainable performance: Evidence from Chinese manufacturing companies. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 368, p. 133152, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133152>.

YADAV, G. et al. Circular economy to ensure production operational excellence: A case of sustainable manufacturing. *Sustainable Production and Consumption*, [S. l.], v. 30, p. 467-483, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.006>.

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*, [S. l.], v. 122, p. 103280, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103280>.

YADAV, G.; LUTHRA, S.; JAKHAR, S. K.; MANGLA, S. K.; RAI, D. P. Interpretive structural modelling based analysis of sustainable manufacturing enablers. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.], v. 254, p. 120160, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120160>.

APÊNDICE I - Resumo dos modelos e estudos manufatura sustentável analisados

Quadro 9 - Resumo dos modelos e estudos manufatura sustentável analisados							
Nº	Autor/Ano	Tipo de Modelo, Estudo ou Proposta	Principais Características	Foco Central	Cluster Temático	Dimensões	Melhorias Propostas
1	ACQUAH, 2022	Modelo empírico híbrido (PLS-SEM + fsQCA)	Combina caminhos lineares e não lineares para medir desempenho ambiental.	Identificar relações múltiplas entre circularidade e sustentabilidade.	Economia Circular + Avaliação Quantitativa	Capacidades circulares, práticas sustentáveis, indicadores ambientais	Replicar em outros contextos; simplificar para PMEs.
2	BAG, 2022	Framework conceitual integrador	Conecta I4.0, manufatura sustentável e economia circular.	Criar modelo teórico integrador.	Digitalização + Sustentabilidade	Integração digital, lean/green/circular	Validar empiricamente; aplicar em casos reais.
3	BAI, 2020	Framework de avaliação (AHP)	Avalia tecnologias I4.0 pelos impactos sustentáveis (ambiental, social, econômico).	Classificar tecnologias mais sustentáveis.	Avaliação de Tecnologias	Ambiental, Social, Econômico	Aplicar em casos reais; reduzir subjetividade.
4	BHANOT, 2020	Abordagem metodológica (ISM + MICMAC)	Estrutura facilitadores e barreiras da manufatura sustentável.	Mapear fatores críticos de adoção.	Barreiras/Fatores Críticos	Cultura, infraestrutura, trabalho, instituições	Validar quantitativamente; ampliar perspectivas.
5	CANNAS, 2021	Framework empírico (estudos de caso)	Integra Lean, Circularidade e I4.0 em fábricas.	Entender interações entre abordagens.	Integração Lean–Circular–I4.0	Eficiência, fluxos sustentáveis, digitalização	Expandir casos e métricas.
6	CHOURASIYA, 2021	Framework empírico setorial	Mede impactos de práticas sustentáveis no setor têxtil indiano.	Relacionar sustentabilidade e desempenho.	Sustentabilidade Setorial	Gestão ambiental, social, econômica	Replicar em outros setores.
7	CILIBERTO, 2022	Modelo conceitual integrador	Combina Lean, Circular e I4.0 para transição sustentável.	Promover sistemas coesos de sustentabilidade.	Integração Estratégica	Lean, circularidade, digitalização	Validar empiricamente; definir indicadores.
8	NASCIMENTO et al., 2022	Modelo empírico setorial	Uso de impressão 3D circular para reciclagem metálica.	Reutilizar sucata automotiva com manufatura aditiva.	Circularidade + 3D Printing	Coleta, digitalização, impressão 3D	Expandir a outros setores; medir viabilidade econômica.
9	DEL GIUDICE, 2022	Modelo adaptativo empírico	Analisa capacidade adaptativa de PMEs frente à digitalização.	Fortalecer inovação digital em PMEs.	Inovação Digital em PMEs	Maturidade digital, inovação, desempenho	Ampliar replicação internacional.
10	DESPEISSE, 2020	Biblioteca de táticas sustentáveis	Organiza estratégias operacionais e ecoeficiência.	Disponibilizar práticas aplicáveis.	Práticas Sustentáveis Operacionais	Operacional, ecoeficiência, modelagem multifuncional	Integrar a sistemas digitais.
11	GADEKAR, 2021	Modelo analítico (ISM-Fuzzy MICMAC)	Identifica inibidores da Indústria 4.0.	Hierarquizar barreiras digitais.	Barreiras I4.0	Tecnológicas, organizacionais, externas	Validar em diferentes países.
12	GHOHBAKHLO O, 2020	Modelo teórico	Organiza oportunidades sustentáveis da digitalização.	Integrar digitalização com sustentabilidade.	Digitalização + Sustentabilidade	Processos digitais, inovação, organização	Validar empiricamente.
13	GUPTA et al., 2021	Framework conceitual ético	Integra ESG, I4.0 e economia circular.	Mensurar performance sustentável com ética.	ESG + Indústria 4.0	Ecoeficiência, tecnologias, governança	Criar métricas padronizadas para ética.

Continuação

Nº	Autor/Ano	Tipo de Modelo, Estudo ou Proposta	Principais Características	Foco Central	Cluster Temático	Dimensões	Melhorias Propostas
14	HARIKANNA N, 2021	Modelo SEM empírico	Testa relações entre tecnologias, sustentabilidade e performance.	Demonstrar impacto da I4.0 em sustentabilidade.	Tecnologias Digitais + SEM	Tecnologias digitais, práticas sustentáveis, performance	Reduzir viés autorreportado.
15	HUANG, 2022	Modelo relacional empírico	Relaciona capacidades digitais verdes, aprendizado e desempenho.	Explicar como aprendizado amplia sustentabilidade.	Green Digital Transformation	Capacidades digitais verdes, aprendizado, performance	Ampliar amostra e setores.
16	JAMWAL et al., 2023	Modelo empírico aplicado (IA)	Usa deep learning para eficiência energética e predição de falhas.	Usar IA para sustentabilidade operacional.	IA/Deep Learning + Sustentabilidade	Predição, energia, rastreabilidade	Avaliar em diferentes setores.
17	JOUNG, 2013	Taxonomia conceitual	Organiza indicadores sustentáveis em manufatura.	Padronizar métricas de avaliação.	Indicadores + ISO/GRI	Ambiental, econômico, social	Integrar a plataformas digitais.
18	KHAN, 2022	Framework conceitual SCE	Estrutura facilitadores tecnológicos e circulares.	Implementar economia circular inteligente.	Smart Circular Economy	Tecnologia, circularidade, organização	Validar empiricamente.
19	KHANZODE, 2021	Modelo conceitual fuzzy	Integra Lean Six Sigma, circularidade e I4.0.	Mapear relações de eficiência sustentável.	Lean + Circularidade + I4.0	Processos, reuso, inteligência operacional	Testar em setores industriais reais.
20	LIM, 2021	Framework “Green-Lean”	Combina lean e circularidade para operações verdes.	Alinhar eficiência e responsabilidade ambiental.	Lean + Circularidade	Lean, circularidade, ambiental	Criar KPIs sustentáveis; ampliar escala.
21	LOPES DE SOUSA JABBOUR, 2021	Modelo empírico SEM	Relaciona circularidade, I4.0, clientes e resiliência.	Fortalecer resiliência organizacional.	Economia Circular + Resiliência	Circularidade, digitalização, clientes, resiliência	Replicar em outros países.
22	LUU, 2023	Modelo conceitual	Integra IoT, Big Data e circularidade na logística verde.	Tornar cadeias logísticas mais sustentáveis.	Logística Sustentável + I4.0	Tecnologias, logística, circularidade	Validar empiricamente.
23	MALEK, 2023	Modelo ISM qualitativo	Estrutura facilitadores da manufatura sustentável.	Priorizar fatores críticos de adoção.	Facilitadores Sustentabilidade	Políticas, cultura, inovação	Validar quantitativamente.
24	MOKTADIR, 2020	Estudo empírico setorial	Identifica drivers sustentáveis na indústria do couro.	Demonstrar papel regulatório na sustentabilidade.	Drivers Setoriais	Regulação, mercado, tecnologia	Expandir para outros setores.
25	NIEWIADO MSKI, 2021	Estudo qualitativo setorial	Identifica barreiras à sustentabilidade no transporte agrícola.	Mapear entraves em PMEs agrícolas.	Barreiras Setoriais	Técnicas, econômicas, organizacionais	Comparar entre setores.
26	PRAUSE, 2021	Modelo conceitual qualitativo	Identifica barreiras PMEs japonesas à I4.0.	Mapear entraves culturais, técnicos e organizacionais.	Barreiras PMEs Digitais	Técnicas, culturais, organizacionais	Replicar em outros países.

							Conclusão
Nº	Autor/Ano	Tipo de Modelo, Estudo ou Proposta	Principais Características	Foco Central	Cluster Temático	Dimensões	Melhorias Propostas
27	RAHMAN, 2022	Modelo híbrido (SEM-ANN)	Examina sustentabilidade com crowdfunding e stakeholders.	Integrar financiamento alternativo à sustentabilidade.	Sustentabilidade + Crowdfunding	Modelos de negócio, I4.0, stakeholders	Aplicar em setores diferentes.
28	RAJPUT, 2021	Modelo conceitual integrador	Integra circularidade, produção limpa e digitalização.	Conectar I4.0 a práticas ambientais responsáveis.	Produção Limpa + Circularidade + I4.0	Circularidade, produção limpa, digitalização	Aplicar em indústrias tradicionais.
29	REHMAN, 2022	Modelo empírico	Relaciona práticas verdes e desempenho organizacional.	Mostrar benefícios econômicos e reputacionais.	Green Manufacturing	Práticas verdes, inovação sustentável, resultados	Ampliar comparações internacionais.
30	ROSEN, 2019	Revisão teórica	Discute design e manufatura sustentável.	Base conceitual para design sustentável.	Design Sustentável	Ciclo de vida, impactos ambientais, inovação responsável	Validar empiricamente.
31	SAJADIEH, 2022	Framework de avaliação	Avalia maturidade sustentável em fábricas urbanas.	Mensurar nível de integração sustentável.	Fábricas Inteligentes Urbanas	Sustentabilidade, I4.0, impactos sociais	Ampliar para fábricas tradicionais.
32	SARTAL, 2020	Revisão conceitual	Analisa evolução da manufatura sustentável até I4.0.	Mapear marcos e tendências históricas.	Revisão Teórica	Tecnologias, consumo, integração inteligente	Criar frameworks operacionais.
33	SCHNELLBACH, 2022	Modelo empírico	Relaciona eficiência energética e indicadores lean.	Unir gestão energética e lean.	Energia + Lean	Energia, lean, integração operacional	Testar em diferentes setores.
34	SKALLI et al., 2022	Modelo empírico integrador	Integra circularidade, Lean Six Sigma e I4.0.	Mostrar ganhos de adoção simultânea.	Integração Tripla (Circular+Lean+I4.0)	Sustentabilidade, lean, tecnologias digitais	Adaptar a PMEs; reduzir complexidade.
35	TANCO, 2021	Estudo qualitativo setorial	Identifica desafios de PMEs uruguaias em manufatura sustentável.	Mapear barreiras latino-americanas.	Barreiras PMEs LatAm	Tecnológicas, culturais, mercado	Ampliar análise comparativa regional.
36	VALDEZ-JUÁREZ, 2022	Modelo empírico SEM	Relaciona transformação digital, inovação e desempenho financeiro sustentável.	Medir impacto da inovação sustentável em PMEs.	Sustentabilidade Financeira + Digitalização	Transformação digital, inovação, financeiro, sustentabilidade	Replicar em outras regiões.
37	XU, 2022	Modelo empírico SEM	Examina efeito da digitalização na eco-inovação e sustentabilidade.	Mostrar papel da digitalização na eco-inovação.	Digitalização + Eco-inovação	Digitalização, eco-inovação, resultados sustentáveis	Aplicar em PMEs e setores variados.
38	YADAV et al., 2020	Framework empírico de adoção da sustentabilidade	Empírico – método multicritério (RBWM)	Facilitadores da adoção da sustentabilidade associados às tecnologias da Indústria 4.0	Sustentabilidade + Indústria 4.0	Gerencial, Econômica, Ambiental, Tecnológica/Informacional e Cadeia de Suprimentos	Estruturação e priorização dos facilitadores críticos para a adoção da sustentabilidade industrial

Fonte: Autor (2025)

APÊNDICE II - Análise sistematizada dos modelos e estudos de manufatura sustentável

1 Modelo PLS-SEM e fsQCA para mensuração de desempenho ambiental (Acquah, 2022)

Investiga de forma integrada como as capacidades da economia circular e as práticas de manufatura sustentável influenciam o desempenho ambiental das organizações industriais. Para tanto, o autor emprega uma abordagem metodológica híbrida, combinando a modelagem de equações estruturais (PLS-SEM), voltada à identificação de relações lineares entre variáveis, com a análise qualitativa comparativa fuzzy (fsQCA), que permite captar configurações causais complexas e não lineares.

O modelo teórico proposto contempla três dimensões centrais: as capacidades circulares, que englobam estratégias como reuso e remanufatura; as práticas sustentáveis na manufatura, relacionadas à eficiência operacional e ao uso racional de recursos; e os indicadores de desempenho ambiental, como a redução de emissões e o consumo consciente de matérias-primas. A análise empírica, baseada em dados coletados em empresas asiáticas, revela que o alcance de um elevado desempenho ambiental não decorre de um único padrão causal, mas sim de múltiplas combinações possíveis entre as variáveis envolvidas.

Entre as principais contribuições do estudo, destaca-se a demonstração de que tanto caminhos lineares quanto relações complexas e contingenciais podem levar a melhorias ambientais significativas. No entanto, a sofisticação dos métodos empregados impõe desafios quanto à sua replicabilidade, especialmente em contextos organizacionais com menor disponibilidade de dados estruturados.

O autor sugere que futuras pesquisas explorem a aplicação desse modelo em diferentes regiões e setores industriais, possibilitando comparações que ampliem a compreensão sobre os fatores que impulsionam a sustentabilidade ambiental em distintos contextos socioeconômicos.

2 Framework de pesquisa integrador entre Indústria 4.0, manufatura sustentável e economia circular (Bag, 2022)

O estudo apresentado por Bag (2022) propõe um modelo teórico integrador que busca conectar, de maneira estruturada, as tecnologias da Indústria 4.0 com as práticas sustentáveis de manufatura e os princípios da economia circular. A proposta parte da premissa de que a transformação digital por meio de ferramentas como Internet das Coisas (IoT) e Big Data, aliada às abordagens lean, green e circulares, pode impulsionar novos paradigmas de produção mais eficientes e sustentáveis.

O framework considera variáveis relacionadas à integração de processos industriais, uso eficiente de recursos e criação de redes regenerativas de valor. Embora o modelo ainda não tenha sido testado em campo, sua estrutura foi construída com base em uma extensa revisão da literatura científica, o que lhe confere robustez teórica.

Como principal limitação, destaca-se a ausência de validação empírica, o que reforça a necessidade de investigações aplicadas, como estudos de caso ou pesquisas em ambientes industriais reais, para verificar sua aplicabilidade e eficácia prática. A pesquisa contribui, portanto, com uma base conceitual promissora para orientar futuras explorações sobre a sinergia entre digitalização industrial e sustentabilidade.

3 Framework de avaliação de tecnologias da Indústria 4.0 sob ótica da sustentabilidade (Bai, 2020)

Bai (2020) propõe um framework de avaliação com o objetivo de analisar o impacto das tecnologias da Indústria 4.0 sob a ótica da sustentabilidade, considerando seus efeitos sobre os três pilares fundamentais: ambiental, social e econômico. A proposta busca orientar a priorização de tecnologias com maior potencial de contribuição sustentável, fornecendo critérios estruturados para tomada de decisão no ambiente industrial.

O modelo está estruturado em três dimensões principais: eficiência energética, representando a dimensão ambiental; impacto social, com foco na inclusão da mão de obra e nas implicações sociais da automação; e viabilidade econômica, considerando aspectos como custo de adoção tecnológica e retorno sobre o investimento. As variáveis analisadas incluem o consumo de energia das tecnologias avaliadas, a capacidade de gerar inclusão produtiva e o custo operacional associado à sua implementação.

A aplicação do modelo foi realizada por meio do método Analytic Hierarchy Process (AHP), com o apoio de especialistas do setor industrial. Os resultados permitiram identificar e classificar as tecnologias 4.0 com maior alinhamento aos princípios da sustentabilidade, possibilitando aos gestores industriais tomar decisões estratégicas mais embasadas. No entanto, o estudo apresenta limitações relacionadas à subjetividade das avaliações fornecidas pelos especialistas e à ausência de aplicação prática em estudos de caso reais, o que restringe sua generalização para diferentes contextos produtivos.

Como sugestão para pesquisas futuras, o autor recomenda a validação empírica do framework em ambientes industriais diversos, a fim de testar sua robustez e adaptabilidade frente à variação setorial e aos diferentes estágios de maturidade tecnológica das organizações.

4 Abordagem integrada utilizando ISM e MICMAC para facilitadores e barreiras à manufatura sustentável (Bhanot, 2020)

Neste trabalho, Bhanot (2020) propõe uma abordagem metodológica estruturada com o objetivo de compreender os principais elementos que influenciam a adoção da manufatura sustentável, especialmente em economias emergentes. O modelo integra duas ferramentas analíticas ISM (Interpretive Structural Modeling) e MICMAC (Matrice d'Impacts Croisés Multiplication Appliquée à un Classement) permitindo mapear e hierarquizar os fatores críticos envolvidos no processo de transição sustentável.

A proposta teórica identifica tanto os facilitadores quanto as barreiras à sustentabilidade na manufatura, organizando esses fatores em níveis de influência e dependência. Dentre as principais dimensões analisadas, destacam-se aspectos como cultura organizacional, infraestrutura tecnológica, qualificação da força de trabalho e suporte institucional. A construção do modelo baseou-se em revisão da literatura especializada e entrevistas com profissionais do setor industrial.

Como contribuição prática, o modelo oferece um caminho estruturado para que organizações possam diagnosticar pontos críticos e agir estrategicamente para superar obstáculos à sustentabilidade. No entanto, uma das limitações apontadas pelo autor é a predominância de dados qualitativos e subjetivos, o que pode comprometer a generalização dos resultados. A ausência de testes quantitativos e de validação empírica mais ampla também é um aspecto a ser superado em futuras pesquisas.

O autor recomenda que o modelo seja aplicado em estudos de caso reais, com a incorporação de diferentes perspectivas — como a de consumidores, entidades reguladoras e demais stakeholders — a fim de enriquecer a compreensão sobre a adoção da manufatura sustentável em cenários industriais concretos.

5 Framework empírico integrando economia circular, Indústria 4.0 e lean manufacturing (Cannas, 2021)

Cannas (2021) propõe um modelo empírico com base em múltiplos estudos de caso, buscando compreender como práticas de produção enxuta (lean), princípios da economia circular e tecnologias associadas à Indústria 4.0 interagem nos ambientes produtivos. O framework resultante é estruturado em três dimensões fundamentais: eficiência operacional, gestão de fluxos de materiais sustentáveis e digitalização de processos.

Dentre as variáveis analisadas, destacam-se indicadores como o tempo de ciclo produtivo, a taxa de reaproveitamento de materiais e o nível de automação dos processos

industriais. A proposta foi validada em empresas dos setores automotivo e metalúrgico, oferecendo uma visão prática sobre a aplicabilidade do modelo em contextos industriais distintos.

A contribuição central da pesquisa reside na articulação empírica de conceitos oriundos de três abordagens contemporâneas lean, circular economy e Indústria 4.0, fornecendo um referencial útil para gestores e formuladores de políticas industriais. No entanto, o autor reconhece que a amplitude limitada da base de estudos de caso representa uma restrição à generalização dos resultados. Além disso, a necessidade de adaptação setorial e os custos envolvidos na implementação tecnológica são apontados como desafios práticos para adoção do modelo em larga escala.

Como diretriz para pesquisas futuras, recomenda-se ampliar o número de casos analisados, bem como incorporar métricas de desempenho mais abrangentes, a fim de aprofundar a avaliação dos impactos concretos dessa integração entre sustentabilidade, digitalização e eficiência produtiva.

6 Framework de avaliação da adoção sustentável na indústria têxtil indiana (Chourasiya, 2021)

O trabalho de Chourasiya (2021) propõe um framework prático para mensurar os impactos da adoção de práticas sustentáveis sobre o desempenho organizacional, com foco na indústria têxtil indiana. O modelo é estruturado em três dimensões fundamentais: gestão ambiental, responsabilidade social corporativa e eficiência econômica.

Para operacionalizar a análise, o estudo adota indicadores como o uso racional da água, as condições de trabalho e a margem operacional. A aplicação empírica foi conduzida com base em dados estatísticos de empresas localizadas na Índia, revelando uma correlação positiva entre o nível de sustentabilidade adotado e os resultados organizacionais.

A principal contribuição do estudo reside na oferta de uma estrutura de avaliação prática e direcionada a gestores industriais que buscam alinhar desempenho econômico e responsabilidade socioambiental. No entanto, a abrangência da pesquisa é limitada ao setor têxtil, o que impõe restrições à generalização dos resultados.

Como sugestão para trabalhos futuros, o autor recomenda a replicação do modelo em outros setores industriais, especialmente aqueles com diferentes níveis de impacto ambiental, a fim de testar a robustez e a versatilidade da proposta em contextos variados.

7 Abordagem combinada Lean-Circular para transição sustentável com apoio da Indústria 4.0 (Ciliberto, 2022)

A proposta de Ciliberto (2022) é um modelo conceitual que integra os fundamentos da manufatura enxuta, os princípios da economia circular e as tecnologias emergentes da Indústria 4.0 como uma abordagem estratégica voltada à sustentabilidade industrial. A proposta busca consolidar essas três vertentes em um sistema coeso capaz de promover a transição sustentável dos processos produtivos, especialmente em cenários industriais cada vez mais digitalizados. O modelo se apoia em três dimensões inter-relacionadas: a eliminação de desperdícios por meio das práticas lean, o redesenho dos processos produtivos com foco na circularidade contemplando iniciativas como design para reuso e logística reversa e o suporte tecnológico viabilizado por sensores inteligentes e sistemas de monitoramento em tempo real, alinhados à lógica da Indústria 4.0.

Apesar de oferecer uma estrutura teórica robusta, embasada em ampla revisão da literatura e ilustrada por aplicações parciais em estudos de caso industriais, a proposta ainda carece de validação prática e de indicadores mensuráveis que comprovem sua efetividade em ambientes produtivos reais. Uma limitação importante apontada pelo autor está relacionada à necessidade de investimentos significativos e à superação de barreiras culturais dentro das organizações, fatores essenciais para viabilizar a implementação bem-sucedida da abordagem integrada. Diante disso, o autor sugere que futuras investigações testem o modelo em contextos industriais diversos, com especial atenção à mensuração de indicadores de eficiência, redução de desperdícios e impacto ambiental, de modo a consolidar sua aplicabilidade e utilidade prática.

8 Modelo sustentável de impressão 3D circular para reciclagem de sucata metálica na indústria automotiva (de Mattos Nascimento et. Al, 2022)

O estudo desenvolvido por de Mattos Nascimento et. Al (2022) apresenta um modelo sustentável de economia circular voltado à reciclagem de sucata metálica por meio da tecnologia de impressão 3D, com aplicação no setor automotivo. A proposta parte da integração entre práticas de reaproveitamento de resíduos e manufatura aditiva circular, estruturando-se em três etapas principais: a coleta e triagem de resíduos metálicos, o processamento e digitalização dos materiais, e a posterior transformação via impressão 3D. O modelo busca otimizar a reutilização de recursos, reduzindo impactos ambientais e promovendo ganhos em termos de economia de material e tempo de ciclo produtivo.

A validação inicial da proposta foi realizada por meio de estudo de caso em empresas da cadeia produtiva automotiva, revelando resultados promissores quanto à taxa de reaproveitamento e à eficiência operacional do processo. No entanto, os autores destacam que

a efetiva implementação do modelo ainda encontra limitações, sobretudo no que se refere à maturidade tecnológica exigida e à disponibilidade de materiais compatíveis com a manufatura aditiva. Além disso, a literatura carece de registros sobre sua aplicação em larga escala, o que restringe a generalização dos resultados obtidos até o momento.

Como diretriz para investigações futuras, sugere-se a análise do desempenho econômico e ambiental do modelo em contextos industriais reais, bem como a avaliação de sua viabilidade em outros setores além do automotivo, de forma a ampliar o escopo de aplicabilidade e consolidar sua relevância prática.

9 Modelo adaptativo para promover inovação digital em PMEs (Del Giudice, 2022)

Del Giudice (2022) apresenta um modelo adaptativo voltado para pequenas e médias empresas do setor de manufatura inteligente, com o objetivo de apoiar sua capacidade de autoajuste diante dos desafios impostos pela inovação digital. O modelo parte da premissa de que a adaptabilidade organizacional é um fator essencial para que essas empresas possam responder de forma eficaz a ambientes de negócios em constante transformação. A estrutura analítica proposta abrange quatro dimensões principais: a maturidade digital das organizações, suas estratégias de inovação, o ambiente competitivo no qual estão inseridas e o desempenho alcançado em termos de inovação.

Para avaliar esses elementos, o autor utiliza variáveis como a taxa de inovação, o número de soluções digitais desenvolvidas e o grau de alinhamento das inovações com as demandas do mercado. O modelo foi empiricamente testado por meio de levantamento com empresas e análise estatística utilizando modelagem de equações estruturais (SEM), o que permitiu identificar relações significativas entre os fatores analisados. Os resultados sugerem que empresas com maior capacidade de adaptação tendem a obter melhor desempenho inovador, especialmente quando operam em contextos altamente dinâmicos.

Apesar de seus resultados promissores, a proposta ainda apresenta limitações. A principal delas refere-se à dificuldade de mensuração precisa da adaptabilidade organizacional, sobretudo em ambientes instáveis ou com alta variabilidade de mercado. O autor recomenda que pesquisas futuras ampliem a aplicação empírica do modelo em diferentes setores produtivos e em contextos culturais diversos, de modo a testar sua robustez e ampliar sua aplicabilidade prática em escala internacional.

10 Biblioteca de táticas de manufatura sustentável e modelagem de fábrica multifuncional (Despeisse, 2020)

No trabalho desenvolvido por Despeisse (2020), é apresentada uma biblioteca estruturada de táticas voltadas à manufatura sustentável, com o objetivo de conectar conceitos de sustentabilidade a práticas operacionais aplicáveis em diferentes contextos industriais. A proposta contempla um conjunto organizado de estratégias que podem ser adaptadas por empresas em busca de melhorias ambientais e operacionais, com base em experiências práticas e fundamentos teóricos consolidados.

O modelo é composto por três eixos principais: o primeiro reúne táticas operacionais sustentáveis, como a minimização do consumo de energia e a adoção de logística interna com menor impacto ambiental; o segundo aborda a modelagem cross-funcional de processos, enfatizando a colaboração entre diferentes áreas produtivas; e o terceiro inclui indicadores de ecoeficiência, que permitem mensurar os efeitos dessas táticas sobre o desempenho organizacional. Cada tática é acompanhada de exemplos práticos, variáveis de avaliação e critérios para determinar sua aplicabilidade em diferentes ambientes produtivos.

A proposta foi parcialmente validada em fábricas europeias, onde demonstrou resultados positivos, especialmente em relação à redução de desperdícios e ao consumo energético. No entanto, o modelo ainda apresenta limitações, entre as quais se destaca a ausência de integração direta com sistemas digitais de produção, o que dificulta sua automatização e adoção em fábricas mais tecnologicamente avançadas. O autor sugere que futuras pesquisas implementem e testem essas táticas em ambientes industriais reais, a fim de verificar sua eficácia, identificar barreiras à aplicação prática e aprimorar sua adaptação a sistemas de manufatura digitalizados.

11 Modelo ISM-Fuzzy MICMAC para avaliar inibidores da Indústria 4.0 (Gadekar, 2021)

Gadekar (2021) propõe um modelo analítico para identificar e hierarquizar os principais inibidores à implementação da Indústria 4.0 em ambientes de manufatura, com foco no contexto indiano. A proposta combina as abordagens ISM (Interpretive Structural Modeling) e Fuzzy MICMAC para estruturar os fatores de resistência com base na influência e na dependência mútua entre as variáveis analisadas. O modelo destaca três grandes categorias de barreiras: tecnológicas, organizacionais e externas estas últimas englobando aspectos governamentais e mercadológicos.

As variáveis foram selecionadas e classificadas a partir da percepção de especialistas, permitindo mapear os obstáculos mais relevantes ao processo de transformação digital. Entre os principais resultados, destaca-se o papel da resistência cultural à mudança e das limitações na infraestrutura tecnológica como os fatores mais críticos à adoção da Indústria 4.0. O modelo

se mostra particularmente útil para orientar o planejamento estratégico e a tomada de decisão por parte de gestores industriais, ao oferecer uma visão estruturada das barreiras que precisam ser superadas para viabilizar a digitalização produtiva.

No entanto, o estudo apresenta limitações importantes, uma vez que os dados foram obtidos exclusivamente por meio da opinião de especialistas locais, o que restringe sua generalização. O autor sugere que pesquisas futuras validem o modelo com dados empíricos e o apliquem em diferentes países emergentes, a fim de verificar a robustez da estrutura proposta em contextos diversos.

12 Modelo teórico sobre oportunidades sustentáveis da digitalização (Ghobakhloo, 2020)

No estudo conduzido por Ghobakhloo (2020), é proposto um modelo teórico que busca organizar e compreender as oportunidades oferecidas pela digitalização e pelas tecnologias da Indústria 4.0 no avanço da sustentabilidade em contextos industriais. A estrutura do modelo baseia-se em três dimensões centrais: a digitalização de processos, a transformação organizacional e a inovação voltada à sustentabilidade. Entre os elementos mais relevantes abordados estão o uso de big data e analytics, a automação de processos produtivos, a reengenharia de modelos de negócios e a incorporação de tecnologias verdes no ambiente fabril.

A proposta foi desenvolvida com base em uma revisão aprofundada da literatura científica e em formulações conceituais, permitindo a construção de um arcabouço que explora como a digitalização pode contribuir para a redução do consumo de recursos naturais, o aumento da eficiência produtiva e a elevação da transparência nas cadeias de suprimentos. Apesar de sua fundamentação teórica consistente, o modelo ainda não passou por validação empírica, o que limita a comprovação direta dos impactos ambientais em diferentes contextos industriais.

Mesmo sem testes estatísticos, a estrutura proposta oferece diretrizes práticas que podem orientar organizações na construção de estratégias que integrem transformação digital com objetivos sustentáveis. O autor sugere que pesquisas futuras apliquem o modelo em estudos de caso reais, utilizando métricas ambientais concretas para avaliar sua eficácia e adaptabilidade em cenários produtivos diversos e dinâmicos.

13 Framework ético de sustentabilidade integrando Indústria 4.0, produção mais limpa e economia circular (Gupta et.al, 2021)

No estudo conduzido por Gupta, Kumar e Wasan (2021), é apresentado um modelo conceitual que busca integrar práticas éticas de sustentabilidade à digitalização industrial,

propondo um framework avaliativo capaz de mensurar a performance sustentável de organizações manufatureiras. A estrutura do modelo é fundamentada em três dimensões principais: práticas limpas, que incluem indicadores de ecoeficiência e controle de resíduos; o uso de tecnologias emergentes, como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e automação; e a responsabilidade social e governança, com foco na ética corporativa e no impacto socioambiental.

As variáveis utilizadas no modelo abrangem métricas ESG (ambientais, sociais e de governança), indicadores de circularidade e parâmetros relacionados à redução de impactos ambientais. O framework foi desenvolvido com base em uma combinação de revisão teórica e estudos de caso, oferecendo uma abordagem integradora entre os princípios da Indústria 4.0, a produção mais limpa e os fundamentos da economia circular.

Apesar da robustez conceitual, o modelo ainda carece de validação empírica mais ampla. Uma das principais limitações apontadas pelos autores refere-se à dificuldade de transformar critérios éticos — por natureza qualitativos e contextuais — em métricas padronizadas e comparáveis entre diferentes organizações e setores. Nesse sentido, os autores sugerem que pesquisas futuras desenvolvam estudos quantitativos que permitam aplicar o modelo de forma mais sistemática e mensurável, validando sua eficácia em diferentes realidades produtivas.

14 Modelo de equações estruturais (SEM) (Harikannan, 2021)

Harikannan (2021) explora as conexões entre as tecnologias associadas à Indústria 4.0, as práticas sustentáveis adotadas na manufatura e o impacto dessas relações sobre o desempenho sustentável das organizações. A abordagem metodológica se baseia na modelagem de equações estruturais (SEM), permitindo analisar os efeitos diretos e indiretos entre as variáveis envolvidas.

O modelo proposto considera três grandes eixos: a adoção de tecnologias digitais emergentes, como automação inteligente e integração cibernética; a implementação de práticas sustentáveis no ambiente produtivo; e os indicadores de performance organizacional sustentável, relacionados à eficiência ambiental, social e econômica.

Os resultados indicam que o uso das tecnologias da Indústria 4.0 pode promover avanços significativos na adoção de práticas sustentáveis, o que, por sua vez, contribui para melhorar o desempenho organizacional. A principal contribuição do trabalho reside justamente na demonstração empírica dessa relação, utilizando uma ferramenta estatística robusta para validar os vínculos entre tecnologia, sustentabilidade e performance.

O estudo apresenta limitações, especialmente por se basear em dados autorreportados, o que pode introduzir viés de percepção. Também não foram incluídas observações diretas nem análises longitudinais, o que restringe a generalização dos resultados. Como desdobramento, o autor sugere a realização de estudos de caso em diferentes contextos industriais e culturais, incorporando variáveis moderadoras como o setor de atuação, o nível de apoio institucional e as características organizacionais.

15 Modelo relacional entre capacidades digitais verdes, aprendizado organizacional e desempenho sustentável (Huang, 2022)

O estudo desenvolvido por Huang (2022) apresenta um modelo relacional voltado à análise das interações entre transformação digital verde, aprendizado organizacional e desempenho sustentável no contexto de empresas taiwanesas do setor de manufatura. A pesquisa tem como foco compreender de que maneira capacidades digitais voltadas à sustentabilidade — como o uso de tecnologias da informação energeticamente eficientes se articulam com práticas organizacionais de aprendizagem e contribuem para a melhoria dos indicadores de sustentabilidade corporativa.

O modelo proposto está estruturado em três dimensões: as capacidades digitais verdes, que abrangem a adoção de soluções tecnológicas de baixo impacto ambiental; a ambidestria de aprendizado, que envolve o equilíbrio entre a exploração de novas competências e a exploração de capacidades já estabelecidas; e o desempenho sustentável, mensurado por meio de indicadores como KPIs ambientais e iniciativas de capacitação voltadas à sustentabilidade. A validação foi realizada por meio de modelagem de equações estruturais (SEM), demonstrando que o aprendizado organizacional atua como mecanismo amplificador dos efeitos positivos das capacidades digitais verdes sobre a performance sustentável.

A pesquisa apresenta limitações quanto à sua capacidade de generalização, uma vez que foi conduzida com uma amostra restrita a uma única região e composta por empresas com alto grau de maturidade tecnológica. O autor recomenda que estudos futuros repliquem o modelo em contextos geográficos e setores industriais distintos, ampliando a compreensão sobre a aplicabilidade da transformação digital verde em ambientes produtivos com diferentes níveis de desenvolvimento tecnológico.

16 Modelos e aplicações de deep learning para sustentabilidade na Indústria 4.0 (Jamwal et al., 2023)

O estudo desenvolvido por Jamwal, Agrawal e Sharma (2023) investiga o uso de técnicas de deep learning como ferramenta estratégica para promover práticas sustentáveis no

contexto da Indústria 4.0. O modelo proposto foca na aplicação da inteligência artificial profunda para melhorar a eficiência energética, prever falhas operacionais e otimizar a gestão de recursos em ambientes industriais complexos e altamente automatizados. A estrutura analítica do estudo abrange quatro dimensões principais: a predição de falhas em equipamentos e sistemas produtivos, a otimização do consumo energético, a rastreabilidade de produtos ao longo da cadeia produtiva e o apoio à tomada de decisões por meio da análise de grandes volumes de dados em tempo real.

Entre as variáveis consideradas destacam-se a taxa de acerto dos algoritmos de deep learning, o nível de consumo energético e a redução de paradas não planejadas nas linhas de produção. A proposta foi testada em ambientes industriais reais, onde se observaram reduções de até 30% nas falhas e cerca de 15% no consumo de energia, evidenciando o potencial das soluções baseadas em IA para contribuir com a sustentabilidade operacional das empresas.

Os autores reconhecem limitações importantes, especialmente no que diz respeito à dependência de grandes volumes de dados atualizados em tempo real, bem como à necessidade de qualificação técnica especializada para operacionalizar esses sistemas avançados. Recomenda-se, portanto, que estudos futuros realizem investigações longitudinais e setoriais, avaliando a efetividade da aplicação do deep learning em diferentes segmentos industriais e seus impactos sobre indicadores ambientais, econômicos e sociais de forma mais abrangente.

17 Taxonomia de indicadores de manufatura sustentável (Joung, 2013)

Joung (2013) apresenta uma proposta de taxonomia abrangente de indicadores voltada à avaliação da sustentabilidade na manufatura, com o objetivo de padronizar métricas e facilitar sua aplicação prática em contextos industriais diversos. O modelo organiza os indicadores em três grandes dimensões: ambiental, econômica e social. Dentro de cada uma dessas categorias, são contempladas subdimensões que abordam aspectos como uso e eficiência energética, emissões atmosféricas, custos operacionais, criação de valor e bem-estar dos trabalhadores.

A proposta contempla tanto indicadores quantitativos quanto qualitativos, permitindo a comparação de desempenho entre empresas ao longo do tempo e possibilitando a realização de benchmarking. Um dos principais objetivos do modelo é justamente fornecer critérios de mensuração padronizados que apoiem a melhoria contínua em sustentabilidade industrial, alinhando-se a frameworks internacionais amplamente reconhecidos, como o GRI (Global Reporting Initiative) e as normas ISO.

O desenvolvimento do modelo foi fundamentado em revisão sistemática da literatura e em análise crítica de diretrizes normativas e práticas consolidadas. Apesar de seu caráter

estruturado e do potencial de aplicação estratégica, o modelo enfrenta desafios quando aplicado a empresas com baixa maturidade em termos de mensuração da sustentabilidade. Além disso, destaca-se a necessidade de integração com ferramentas digitais e plataformas de apoio à decisão em tempo real, de modo a facilitar sua incorporação em sistemas produtivos já digitalizados. O autor sugere que pesquisas futuras explorem essa integração e validem a aplicação prática da taxonomia em ambientes industriais com diferentes graus de complexidade e desenvolvimento tecnológico.

18 Framework para implementação da Economia Circular Inteligente (SCE) em empresas de manufatura (Khan, 2022)

O estudo desenvolvido por Khan (2022) propõe um framework conceitual voltado à implementação da Economia Circular Inteligente (Smart Circular Economy – SCE) em empresas do setor de manufatura. A estrutura do modelo é composta por três dimensões centrais: os facilitadores tecnológicos, que incluem a aplicação de sensores, Internet das Coisas (IoT) e automação inteligente; a arquitetura circular, associada a estratégias como reuso de materiais, modularidade de produtos e design circular; e o suporte organizacional, relacionado à cultura institucional, políticas internas e investimentos voltados à sustentabilidade e inovação.

As variáveis utilizadas no modelo abrangem aspectos como integração digital, indicadores de circularidade e o nível de engajamento institucional na adoção de práticas circulares inteligentes. O modelo foi desenvolvido com base em revisão teórica sistemática e análise de tendências emergentes na literatura, e tem como principal objetivo oferecer um referencial prático para guiar empresas na transição para modelos produtivos alinhados aos princípios da economia circular e da digitalização.

Apesar de sua estrutura abrangente e fundamentação teórica consistente, o modelo ainda não passou por validação empírica em cenários industriais reais, o que representa sua principal limitação. Além disso, o sucesso de sua implementação está condicionado ao nível de maturidade organizacional e à capacidade tecnológica das empresas, fatores que podem interferir diretamente na viabilidade e efetividade das ações propostas. O autor sugere que estudos futuros apliquem o framework em contextos empresariais concretos, a fim de testar sua aplicabilidade, identificar ajustes necessários e ampliar sua contribuição prática para o avanço da sustentabilidade industrial inteligente.

19 Modelo integrado Lean Six Sigma e Economia Circular com perspectiva da Indústria 4.0 (Khanzode, 2021)

O estudo conduzido por Khanzode (2021) propõe um modelo integrado que combina os princípios do Lean Six Sigma com práticas da economia circular e tecnologias emergentes da Indústria 4.0, com o objetivo de fortalecer estratégias sustentáveis no ambiente manufatureiro. A proposta busca explorar as interações entre diferentes facilitadores que influenciam a eficiência operacional, o reaproveitamento de materiais e a inteligência nos processos de controle e tomada de decisão.

O modelo está estruturado em três dimensões principais: a eficiência de processos, com foco na redução de desperdícios e otimização de ciclos produtivos; o reuso de materiais, alinhado aos princípios da circularidade; e a inteligência operacional, apoiada pela digitalização e automação dos sistemas produtivos. Entre as variáveis analisadas estão o índice de desperdício, o tempo de ciclo, os níveis de reaproveitamento e o grau de digitalização das atividades de controle.

Para analisar essas interações, o autor utiliza métodos interpretativos combinados com lógica fuzzy, permitindo mapear relações complexas entre os fatores envolvidos. Apesar de oferecer uma contribuição teórica relevante, o modelo ainda carece de validação empírica em ambientes industriais reais, o que limita sua aplicabilidade direta. Além disso, sua implementação pode enfrentar desafios relacionados à complexidade operacional e à necessidade de adaptação específica para diferentes setores produtivos. Como diretriz para pesquisas futuras, o autor sugere testar o modelo em contextos industriais variados, a fim de avaliar sua eficácia e promover ajustes que favoreçam sua adoção prática.

20 Modelo "Green-Lean" integrando economia circular e lean para sustentar operações produtivas (Lim, 2021)

No estudo conduzido por Lim (2021), é proposto um modelo integrador que combina os princípios da manufatura enxuta (lean) com os fundamentos da economia circular, com o objetivo de promover a sustentabilidade operacional em processos produtivos. A abordagem, denominada “green-lean”, visa alinhar eficiência e responsabilidade ambiental, proporcionando uma base estratégica para empresas que buscam otimizar recursos e reduzir impactos negativos ao meio ambiente.

O modelo está estruturado em três dimensões principais: práticas lean, com foco na eliminação de desperdícios; fluxos circulares, que englobam atividades como remanufatura e reutilização de materiais; e desempenho ambiental, avaliado por meio de indicadores como consumo energético, nível de perdas, tempo de ciclo e taxa de reaproveitamento. A proposta foi

aplicada em estudos de caso com empresas industriais, fornecendo indícios de viabilidade prática e ganhos operacionais associados à adoção simultânea de práticas enxutas e circulares.

Apesar de seus méritos conceituais e da consistência metodológica, o modelo ainda enfrenta limitações quanto à sua aplicação em larga escala. A principal barreira identificada refere-se à necessidade de um elevado grau de maturidade organizacional para viabilizar a integração total entre os pilares lean e circular. O autor sugere que pesquisas futuras explorem a implementação do modelo em ambientes industriais diversos, com o uso de indicadores de desempenho sustentáveis (KPIs) que permitam mensurar de forma objetiva os benefícios decorrentes da aplicação do framework proposto.

21 Modelo empírico sobre resiliência organizacional mediada pela Indústria 4.0 e integração com clientes em modelos de negócio circulares (Lopes de Sousa Jabbour, 2021)

O estudo conduzido por Lopes de Sousa Jabbour (2021) investiga de que forma a adoção de modelos de negócio baseados na economia circular contribui para o fortalecimento da resiliência organizacional, considerando como variáveis mediadoras a Indústria 4.0 e a integração com os clientes. O modelo proposto foi validado empiricamente com dados de empresas brasileiras por meio de modelagem de equações estruturais (SEM), oferecendo evidências quantitativas sobre os efeitos positivos da circularidade empresarial quando combinada a tecnologias digitais e estratégias de relacionamento com o cliente.

A estrutura do modelo contempla quatro dimensões principais: circularidade, representada por práticas como reutilização de materiais e design sustentável; digitalização, que inclui automação e sensoriamento inteligente dos processos; relacionamento com o cliente, com foco em fidelização e cocriação de valor; e resiliência organizacional, entendida como a capacidade de adaptação e recuperação frente a crises ou disrupções. Entre as variáveis mensuradas estão a taxa de reuso, o tempo de recuperação operacional e o nível de fidelização dos clientes.

Os resultados indicam que os modelos circulares, especialmente quando associados à transformação digital promovida pela Indústria 4.0, contribuem significativamente para a construção de organizações mais resilientes. No entanto, o estudo apresenta algumas limitações, notadamente o foco regional restrito ao contexto brasileiro e a ausência de uma abordagem longitudinal, o que dificulta a generalização dos resultados ao longo do tempo e em diferentes setores industriais. Para futuras pesquisas, os autores recomendam a replicação do modelo em outros segmentos produtivos e a inclusão de novos mediadores contextuais, como políticas públicas e regulação ambiental.

22 Modelo conceitual integrando Indústria 4.0 e economia circular para logística verde e cadeia de suprimentos sustentável (Luu, 2023)

O estudo conduzido por Luu (2023) propõe um modelo conceitual que integra tecnologias emergentes da Indústria 4.0, como Internet das Coisas (IoT) e big data, com práticas de economia circular aplicadas às cadeias de suprimentos e à logística verde. A proposta tem como objetivo promover maior eficiência ambiental nos processos logísticos, associando inovação tecnológica à sustentabilidade operacional.

O modelo está estruturado em três dimensões principais: tecnologias emergentes, representadas por soluções digitais aplicadas ao monitoramento e à automação da cadeia logística; práticas logísticas sustentáveis, focadas na redução de impactos ambientais ao longo do ciclo de transporte e armazenagem; e circularidade de recursos, que engloba estratégias como o reaproveitamento de embalagens e a minimização de resíduos logísticos. Entre as variáveis consideradas destacam-se o tempo de ciclo logístico, os índices de reaproveitamento de materiais e os níveis de emissão de poluentes.

Apesar de apresentar uma estrutura teórica robusta e alinhada às diretrizes contemporâneas de sustentabilidade, o modelo ainda não foi testado empiricamente. A ausência de validação quantitativa e de estudos de caso limita sua aplicabilidade imediata, especialmente em contextos industriais com baixa maturidade digital. Além disso, sua implementação exige significativa infraestrutura tecnológica, o que pode representar uma barreira para empresas em estágios iniciais de digitalização. O autor sugere que futuras pesquisas testem o modelo em ambientes logísticos reais, a fim de mensurar seus impactos operacionais e ambientais com maior precisão.

23 Modelo de análise dos facilitadores da manufatura sustentável com modelagem estrutural interpretativa (ISM) (Malek, 2023)

Malek (2023) propõe um modelo qualitativo baseado na Modelagem Estrutural Interpretativa (ISM) com o objetivo de identificar, classificar e estruturar hierarquicamente os principais facilitadores da manufatura sustentável. A proposta busca compreender quais fatores exercem maior influência sobre a adoção de práticas sustentáveis nas organizações industriais, organizando-os em diferentes níveis de impacto.

O modelo contempla três dimensões principais: políticas e normas institucionais que orientam práticas sustentáveis, cultura organizacional que favorece ou restringe a internalização da sustentabilidade, e inovação tecnológica como catalisadora de transformações nos processos produtivos. As variáveis consideradas foram selecionadas com base no julgamento de

especialistas da área e, posteriormente, organizadas de forma hierárquica por meio da aplicação do método ISM, o que permitiu identificar relações de influência e dependência entre os elementos analisados.

Embora forneça uma estrutura conceitual valiosa para orientar decisões estratégicas e políticas de sustentabilidade, o modelo apresenta limitações importantes. Sua natureza interpretativa e qualitativa torna-o dependente da subjetividade dos especialistas envolvidos, e a ausência de validação empírica com dados quantitativos restringe sua aplicabilidade em contextos industriais mais amplos. O autor sugere que pesquisas futuras realizem testes empíricos do modelo em diferentes setores produtivos, buscando confirmar a robustez das relações hierárquicas propostas e ampliar sua utilidade prática para a gestão da sustentabilidade na manufatura.

24 Identificação de fatores críticos para práticas sustentáveis e economia circular na indústria do couro (Moktadir, 2020)

O estudo conduzido por Moktadir (2020) tem como objetivo identificar os principais fatores que impulsionam a adoção de práticas sustentáveis e de economia circular na indústria do couro em Bangladesh. O modelo proposto foca na análise de drivers que incentivam a transição para a sustentabilidade em setores tradicionais, buscando compreender como diferentes pressões externas e internas influenciam o comportamento organizacional.

A estrutura do modelo está organizada em três dimensões principais: os fatores regulatórios, relacionados à pressão ambiental e exigências legais; a demanda de mercado, associada às expectativas dos consumidores e competitividade setorial; e o suporte tecnológico, que envolve incentivos à inovação, capacitação técnica e disponibilidade de recursos tecnológicos. As variáveis foram avaliadas por meio de um levantamento empírico com aplicação de survey e posterior análise estatística, permitindo a identificação dos elementos com maior peso na decisão das empresas quanto à adoção de práticas sustentáveis.

Os resultados revelaram que a regulação ambiental é o fator de maior impacto, superando outras variáveis como incentivos econômicos e suporte técnico. Esse resultado reforça o papel estratégico das políticas públicas e da governança ambiental na indução de comportamentos sustentáveis em indústrias de base tradicional. No entanto, o estudo apresenta como principal limitação seu foco restrito a um único setor e contexto geográfico, o que limita a generalização dos resultados. O autor sugere que futuras pesquisas apliquem o modelo em diferentes setores produtivos e regiões de países em desenvolvimento, a fim de validar padrões comuns e fortalecer a aplicabilidade do modelo em contextos mais amplos.

25 Identificação de barreiras para manufatura sustentável no setor de transporte agrícola (Niewiadomski, 2021)

Niewiadomski (2021) propõe um modelo voltado à identificação das principais barreiras enfrentadas por fabricantes de peças e componentes para transporte agrícola na adoção de práticas de manufatura sustentável. A proposta parte de uma abordagem qualitativa, baseada em entrevistas com representantes do setor, e visa mapear os entraves que dificultam a implementação efetiva da sustentabilidade em empresas de pequeno porte.

O modelo estrutura as barreiras em três grandes dimensões: técnicas, relacionadas a limitações operacionais e tecnológicas; econômicas, que englobam o alto custo de tecnologias limpas e a ausência de incentivos financeiros; e organizacionais, como a escassez de mão de obra qualificada e a falta de estrutura interna para apoiar transformações sustentáveis. Essas variáveis refletem os principais desafios enfrentados por empresas que operam em contextos produtivos com baixa capacidade de investimento e forte dependência de fatores externos, como políticas públicas e suporte institucional.

Os resultados evidenciam a urgência de iniciativas direcionadas à superação dessas barreiras, principalmente por meio de políticas de incentivo à inovação sustentável, qualificação da força de trabalho e acesso a tecnologias mais acessíveis. No entanto, o modelo apresenta como limitação o seu foco restrito ao setor agrícola e a um perfil específico de empresa, o que dificulta a generalização dos resultados. O autor recomenda que pesquisas futuras ampliem a análise para outros setores industriais de base tradicional, permitindo a comparação entre padrões de barreiras e a proposição de soluções transversais para a sustentabilidade na manufatura.

26 Identificação de barreiras técnicas, culturais e estruturais para adoção da Indústria 4.0 por PMEs japonesas (Prause, 2021)

Prause (2021) propõe um modelo conceitual que busca identificar e classificar os principais desafios enfrentados por pequenas e médias empresas japonesas no processo de adoção das tecnologias associadas à Indústria 4.0. A proposta parte de uma análise qualitativa baseada em entrevistas e documentos setoriais, permitindo mapear as barreiras que dificultam a digitalização e a incorporação de inovações tecnológicas nesses contextos organizacionais.

O modelo está estruturado em três grandes dimensões: barreiras técnicas, representadas pela ausência de infraestrutura adequada e limitações tecnológicas básicas; barreiras culturais, relacionadas à resistência organizacional à mudança, à aversão a riscos e à preferência por modelos tradicionais de operação; e barreiras organizacionais, que incluem dificuldades de

gestão, ausência de lideranças digitais e escassez de talentos capacitados para operar novas tecnologias. Essas dimensões refletem os entraves mais comuns enfrentados por PMEs ao tentar se alinhar às exigências da Indústria 4.0.

Embora o modelo ofereça uma contribuição importante para o entendimento dos obstáculos à transformação digital em economias industrializadas, ele ainda carece de validação quantitativa. Além disso, a principal limitação da pesquisa é a sua aplicação restrita ao contexto japonês, o que reduz a generalização dos resultados. Como sugestão para estudos futuros, o autor propõe que o modelo seja replicado em outros países asiáticos ou europeus, com o intuito de verificar sua aplicabilidade em realidades culturais e estruturais distintas e, assim, contribuir para a construção de estratégias mais eficazes de superação de barreiras à digitalização em PMEs.

27 Modelo SEM-ANN de interação de variáveis sustentáveis com foco em negócios, crowdfunding e stakeholders (Rahman, 2022)

No estudo conduzido por Rahman (2022), é proposto um modelo híbrido que combina técnicas de Structural Equation Modeling (SEM) e Artificial Neural Networks (ANN) com o objetivo de investigar a interação entre diferentes fatores críticos que afetam a sustentabilidade empresarial. A proposta analisa como quatro dimensões principais influenciam o desempenho sustentável das organizações: a adoção de modelos de negócios sustentáveis, a incorporação de tecnologias da Indústria 4.0, o uso de estratégias de financiamento alternativo como o crowdfunding, e a pressão exercida por stakeholders externos.

As variáveis incluídas no modelo abrangem indicadores ESG (ambientais, sociais e de governança), práticas de inovação digital e mecanismos de engajamento com partes interessadas. O modelo foi validado por meio de dados empíricos, permitindo a análise de relações complexas e não lineares entre os elementos analisados. Os resultados revelaram uma forte influência do crowdfunding e da pressão institucional sobre a sustentabilidade corporativa, indicando que o acesso a capital coletivo e a exigência de accountability por parte dos stakeholders são fatores decisivos na promoção de práticas sustentáveis.

Apesar de sua sofisticação metodológica e dos insights relevantes gerados, o modelo apresenta limitações quanto à sua complexidade analítica e à dificuldade de replicação em contextos industriais e culturais distintos. Como recomendação para pesquisas futuras, o autor sugere a realização de estudos comparativos em diferentes setores econômicos e regiões geográficas, a fim de verificar a generalização dos resultados e adaptar o modelo a realidades empresariais com diferentes níveis de maturidade digital e institucional.

28 Modelo integrador Indústria 4.0 e produção mais limpa com foco em economia circular (Rajput, 2021)

Rajput (2021) propõe um modelo integrador que articula práticas da economia circular, estratégias de produção mais limpa e tecnologias emergentes da Indústria 4.0, com o objetivo de promover maior sustentabilidade operacional em ambientes industriais. A estrutura conceitual do modelo busca conectar a digitalização com práticas ambientais responsáveis, criando um arcabouço teórico para guiar empresas na transição para sistemas produtivos mais eficientes e circulares.

O modelo está organizado em três dimensões principais: práticas circulares, que envolvem ações como o reuso de materiais e a reciclabilidade de produtos; práticas limpas, focadas na eficiência no uso de recursos e na redução de emissões e resíduos; e digitalização, com destaque para automação e rastreamento digital ao longo da cadeia produtiva. As variáveis analisadas incluem o uso de materiais recicláveis, o nível de consumo energético e o grau de maturidade tecnológica das organizações.

Embora tenha sido validado com base em estudos setoriais, o modelo ainda apresenta limitações, sobretudo no que se refere à sua aplicação prática em indústrias tradicionais. A principal dificuldade identificada diz respeito à mensuração efetiva do grau de circularidade em sistemas produtivos convencionais, que muitas vezes carecem de infraestrutura adequada ou de dados sistematizados. Como sugestão para pesquisas futuras, o autor recomenda a aplicação do modelo em setores com diferentes níveis de maturidade tecnológica e ambiental, a fim de testar sua adaptabilidade e ampliar sua utilidade como ferramenta estratégica de gestão sustentável.

29 Modelo empírico de práticas verdes e desempenho organizacional no contexto indiano (Rehman, 2022)

No estudo conduzido por Rehman (2022), é proposto um modelo empírico que busca avaliar a relação entre a adoção de práticas de manufatura verde e o desempenho organizacional em empresas do contexto indiano. A pesquisa parte da premissa de que a incorporação de estratégias sustentáveis nos processos produtivos pode gerar benefícios não apenas ambientais, mas também econômicos e reputacionais para as organizações.

O modelo está estruturado em três dimensões principais: práticas verdes, que abrangem a redução da poluição e a gestão eficiente de resíduos; inovação sustentável, envolvendo investimentos em tecnologias e processos ambientalmente responsáveis; e resultados organizacionais, mensurados por indicadores como o custo de produção, o retorno sobre investimentos sustentáveis e a reputação da marca. Os dados foram coletados por meio de

survey aplicado a empresas atuantes na Índia e analisados estatisticamente para identificar correlações significativas entre as variáveis.

Os resultados confirmaram que a adoção de práticas verdes está positivamente associada ao desempenho organizacional, reforçando a relevância estratégica da sustentabilidade nas decisões empresariais. No entanto, o estudo apresenta limitações importantes, especialmente no que se refere à sua aplicabilidade restrita a um único país e setor econômico. A ausência de métricas transversais e de comparações internacionais também limita a generalização dos resultados. O autor sugere que pesquisas futuras repliquem o modelo em diferentes contextos geográficos e industriais, utilizando indicadores padronizados globalmente para ampliar a robustez e a comparabilidade dos resultados.

30 Revisão teórica sobre manufatura e design sustentável (Rosen, 2019)

No trabalho desenvolvido por Rosen (2019), é apresentada uma revisão conceitual aprofundada que discute os fundamentos, práticas e necessidades de integração entre a manufatura sustentável e o design industrial. O estudo busca oferecer uma base teórica abrangente para orientar a inserção de princípios sustentáveis na engenharia de produto, abordando tanto os desafios quanto as possibilidades de aplicação em ambientes industriais contemporâneos.

O modelo teórico proposto está estruturado em três dimensões centrais: o ciclo de vida do produto, que considera a sustentabilidade desde a concepção até o descarte; a redução dos impactos ambientais no processo de design, enfatizando escolhas de materiais e eficiência produtiva; e a inovação responsável, voltada ao desenvolvimento de soluções que conciliem desempenho técnico, viabilidade econômica e responsabilidade socioambiental. A proposta inclui categorias de ação sustentáveis e diretrizes para orientar decisões de projeto com foco em sustentabilidade.

Trata-se de um modelo essencialmente teórico, sem validação empírica direta ou aplicação em estudos de caso, o que limita sua utilidade imediata em contextos operacionais sem adaptações. A ausência de testes práticos ou métricas aplicáveis dificulta a transferência direta do conteúdo para realidades industriais concretas. Diante disso, o autor recomenda que futuras pesquisas desenvolvam estudos empíricos que explorem a aplicabilidade das categorias propostas em diferentes setores produtivos, permitindo verificar sua efetividade e ajustar sua utilização conforme o nível de maturidade das organizações.

31 Modelo de avaliação de maturidade de sustentabilidade em fábricas inteligentes urbanas (Sajadieh, 2022)

No estudo conduzido por Sajadieh (2022), é proposto um framework de avaliação destinado a mensurar o grau de maturidade em sustentabilidade de fábricas inteligentes localizadas em contextos urbanos. O modelo foi desenvolvido com base em revisão teórica e testes exploratórios, com o objetivo de oferecer uma ferramenta analítica capaz de identificar o nível de integração entre práticas sustentáveis, tecnologias digitais e impactos socioambientais nos ambientes produtivos urbanos.

O modelo é composto por três dimensões principais: a implementação de práticas sustentáveis, que abrange iniciativas como gestão de resíduos, uso eficiente de recursos e estratégias de reuso; a adoção de tecnologias da Indústria 4.0, incluindo automação, conectividade e análise de dados; e os impactos ambientais e sociais decorrentes das operações industriais, com ênfase na redução de emissões e no engajamento com a comunidade local. As variáveis analisadas incluem o grau de automação, os níveis de emissão e as práticas de reutilização de materiais.

Embora o modelo ofereça uma contribuição relevante para a avaliação da sustentabilidade em ambientes de manufatura avançada, ele apresenta como principal limitação o fato de ter sido aplicado apenas em contextos urbanos e em pequena escala. Ainda não há testes comparativos com fábricas tradicionais localizadas em regiões não urbanas, o que restringe a generalização dos resultados. O autor recomenda que estudos futuros apliquem o modelo em diferentes tipos de unidades fabris, localizadas em regiões diversas, com vistas a ampliar sua robustez, adaptabilidade e utilidade como ferramenta de gestão da sustentabilidade industrial.

32 Revisão sobre manufatura sustentável no contexto da Indústria 4.0 (Sartal, 2020)

No estudo conduzido por Sartal (2020), é apresentada uma análise conceitual e histórica da evolução do conceito de manufatura sustentável, com foco na forma como essa abordagem vem sendo progressivamente integrada ao contexto da Indústria 4.0. Trata-se de uma revisão teórica que mapeia os principais marcos e transições do campo, identificando oportunidades e tendências que emergem da convergência entre sustentabilidade e digitalização industrial.

A proposta teórica está estruturada em três dimensões centrais: os avanços tecnológicos que possibilitam novas formas de produção sustentável; as mudanças nos padrões de consumo, que pressionam por maior responsabilidade ambiental e social nas cadeias produtivas; e a integração de sistemas inteligentes, como a automação, a Internet das Coisas e a análise de dados em tempo real, como facilitadores da sustentabilidade em ambientes industriais. O estudo

propõe uma linha do tempo crítica que destaca os principais momentos de transformação conceitual e tecnológica relacionados ao tema.

Embora forneça uma contribuição relevante ao sistematizar o desenvolvimento do conceito de manufatura sustentável e apontar caminhos para sua consolidação no contexto da Indústria 4.0, o trabalho apresenta limitações, especialmente pela ausência de uma estrutura analítica quantitativa. Por se tratar de uma revisão teórica, não são propostas variáveis mensuráveis ou modelos empíricos diretamente aplicáveis. O autor recomenda que futuras pesquisas avancem na construção de frameworks operacionais e no desenvolvimento de estudos empíricos que validem as hipóteses levantadas, permitindo a transição da teoria para a prática em diferentes setores produtivos.

33 Modelo de alinhamento entre medidas de produtividade energética e indicadores-chave da produção enxuta (Schnellbach, 2022)

O estudo conduzido por Schnellbach (2022) propõe um modelo analítico que investiga a relação entre práticas de produtividade energética e os principais indicadores de desempenho da produção enxuta. A proposta tem como foco identificar sinergias entre a eficiência no uso de energia e a melhoria contínua dos processos produtivos, com base em princípios do lean manufacturing.

O modelo está estruturado em três dimensões principais: gestão energética, voltada para a otimização do consumo de energia nos processos industriais; práticas lean, que buscam a eliminação de desperdícios e o aumento da eficiência operacional; e integração operacional, que refere-se à articulação entre sistemas de gestão energética e práticas de melhoria contínua. As variáveis consideradas incluem consumo energético por unidade produzida, desperdício por processo e taxa de valor agregado. A validação foi realizada com base em dados de benchmarking industrial, permitindo uma análise comparativa entre empresas com diferentes níveis de maturidade operacional.

Os resultados demonstram que melhorias na produtividade energética podem estar alinhadas aos objetivos estratégicos do lean, contribuindo para a geração de valor e redução de custos de forma simultânea. No entanto, o modelo apresenta limitações quanto à sua aplicação, uma vez que depende da existência de uma estrutura madura de medição energética e foi testado em ambientes industriais específicos, sem diversidade setorial significativa. O autor recomenda que pesquisas futuras explorem a aplicação do modelo em diferentes setores produtivos e avaliem possíveis trade-offs entre metas energéticas e produtivas, de modo a ampliar sua aplicabilidade e robustez.

34 Modelo integrando economia circular, Lean Six Sigma e Indústria 4.0 (Skalli et. Al, 2022)

O estudo desenvolvido por Skalli et al. (2022) propõe um modelo integrador que avalia os efeitos combinados da economia circular, do Lean Six Sigma e das tecnologias da Indústria 4.0 sobre o desempenho sustentável da manufatura. A proposta parte de uma perspectiva prática baseada em evidências empíricas e visa demonstrar como a sinergia entre essas três abordagens pode potencializar os resultados ambientais, operacionais e produtivos nas organizações industriais.

O modelo contempla três grandes dimensões: práticas sustentáveis, que incluem ações voltadas à redução de resíduos e reuso de materiais; eficiência produtiva, relacionada à eliminação de desperdícios e à adoção de metodologias de melhoria contínua; e tecnologias digitais, representadas por ferramentas como IoT, automação industrial e análise de dados em tempo real (Big Data). As variáveis utilizadas na análise envolvem indicadores como produtividade, taxa de reaproveitamento de materiais, consumo energético e emissões de carbono.

Validado com base em estudos de caso em ambientes industriais reais, o modelo demonstra que a implementação conjunta de estratégias circulares, métodos lean e soluções tecnológicas avançadas tem potencial para amplificar significativamente os resultados sustentáveis das empresas. No entanto, os autores reconhecem que a principal limitação da proposta reside na complexidade da adoção simultânea dessas três abordagens, especialmente em contextos com menor maturidade técnica. Além disso, a implementação exige capacitação específica por parte das equipes operacionais e de gestão, o que pode representar um desafio para pequenas e médias empresas com recursos limitados.

Como diretriz para pesquisas futuras, o estudo recomenda a condução de investigações setoriais comparativas e o desenvolvimento de frameworks de implementação adaptados à realidade das PMEs, visando facilitar a transição para modelos produtivos mais sustentáveis e tecnologicamente integrados.

35 Identificação de desafios na manufatura sustentável em PMEs uruguaias (Tanco, 2021)

Tanco (2021) propõe um modelo qualitativo com o objetivo de identificar e analisar os principais desafios enfrentados por pequenas e médias empresas (PMEs) do Uruguai na adoção de práticas de manufatura sustentável. A pesquisa concentra-se em mapear barreiras contextuais

que dificultam a transição dessas organizações para modelos produtivos mais responsáveis do ponto de vista ambiental, social e econômico.

O modelo está estruturado em três dimensões principais de obstáculos: barreiras tecnológicas, como a escassez de infraestrutura digital e produtiva adequada; barreiras culturais, representadas pela resistência à mudança e pela ausência de cultura organizacional voltada à sustentabilidade; e barreiras de mercado, que incluem dificuldades de acesso a incentivos e pressão competitiva para redução de custos. Entre as variáveis analisadas destacam-se o investimento inicial necessário para a adoção de práticas sustentáveis, o nível de qualificação da mão de obra e a disponibilidade de recursos tecnológicos.

A investigação foi conduzida com base em entrevistas e análise documental, adotando uma abordagem qualitativa que permitiu captar percepções e experiências dos gestores e técnicos envolvidos no processo de transformação sustentável. Embora o estudo ofereça uma contribuição relevante ao destacar barreiras específicas do contexto uruguaio, sua principal limitação reside na restrição geográfica da amostra e na dificuldade de generalizar os resultados para outros países ou setores. O autor sugere que futuras pesquisas ampliem a análise comparativa com PMEs de outros países latino-americanos, de modo a identificar padrões regionais e propor diretrizes de políticas públicas mais abrangentes e eficazes.

36 Modelo empírico relacionando transformação digital, inovação e desempenho financeiro sustentável de PMEs mexicanas (Valdez-Juárez, 2022)

O estudo conduzido por Valdez-Juárez (2022) propõe um modelo quantitativo com o objetivo de investigar como a transformação digital, aliada à inovação e à sustentabilidade, influencia o desempenho financeiro de pequenas e médias empresas (PMEs) mexicanas. A pesquisa parte da premissa de que a incorporação de capacidades dinâmicas e tecnológicas pode fortalecer a competitividade das organizações, desde que alinhada a práticas sustentáveis.

O modelo proposto está estruturado em quatro dimensões principais: transformação digital, que contempla investimentos em tecnologia da informação; inovação contínua, medida por meio da introdução de novos produtos e serviços; desempenho financeiro, avaliado a partir de indicadores como margem líquida e retorno sobre investimento; e práticas sustentáveis, com ênfase em estratégias verdes de crescimento. As variáveis utilizadas envolvem tanto métricas de inovação quanto de performance financeira com foco em sustentabilidade.

A validação do modelo foi realizada por meio da técnica de modelagem de equações estruturais (SEM), aplicada a dados coletados em empresas mexicanas. Os resultados empíricos indicam que há uma correlação positiva significativa entre inovação digital sustentável e

melhoria do desempenho financeiro das organizações. No entanto, o estudo apresenta limitações relacionadas ao seu escopo geográfico e setorial, além do possível viés decorrente da composição da amostra.

Como recomendação para futuras pesquisas, o autor sugere a replicação do modelo em outras regiões e setores econômicos, bem como o aprofundamento da análise sobre barreiras internas à inovação sustentável, especialmente em contextos de economias emergentes da América Latina.

37 Modelo de relação entre digitalização, eco-inovação e desempenho sustentável (Xu, 2022)

O estudo desenvolvido por Xu (2022) propõe um modelo empírico que investiga os efeitos da transformação digital sobre a eco-inovação e o desempenho sustentável no setor industrial chinês. A proposta parte da premissa de que a digitalização organizacional pode atuar como um catalisador para práticas ecológicas inovadoras, contribuindo para a melhoria dos indicadores de sustentabilidade empresarial.

O modelo está estruturado em três dimensões analíticas: digitalização organizacional, entendida como a adoção de tecnologias digitais nos processos e na gestão; práticas ecológicas, relacionadas à incorporação de critérios ambientais no desenvolvimento de produtos e processos; e resultados sustentáveis, avaliados com base em indicadores de desempenho ambiental e produtivo. As variáveis consideradas incluem o número de patentes verdes registradas, o retorno ambiental obtido com a implementação de soluções ecoeficientes e a produtividade verde das operações industriais.

A validação do modelo foi realizada por meio da técnica de modelagem de equações estruturais (SEM), utilizando dados de empresas manufatureiras de grande porte na China. Os resultados indicam que a transformação digital tem impacto positivo direto sobre a capacidade das empresas de inovar com responsabilidade ambiental, fortalecendo, por consequência, sua performance sustentável. Contudo, o estudo apresenta como principal limitação a sua aplicabilidade restrita a grandes empresas de um único setor e contexto nacional, o que dificulta a generalização dos resultados para outras realidades produtivas.

Como sugestão para pesquisas futuras, o autor propõe a ampliação da análise para pequenas e médias empresas, bem como a inclusão de diferentes setores econômicos e regiões geográficas, com o objetivo de avaliar a robustez do modelo em contextos organizacionais mais diversos.

38 Uma estrutura para alcançar a sustentabilidade em organizações de manufatura. (Yadav, 2020)

Yadav et al. (2020) propõem um framework empírico para promover a adoção da sustentabilidade em organizações manufatureiras, com foco específico em economias em desenvolvimento, integrando os princípios da sustentabilidade às tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. O estudo parte do reconhecimento de que, apesar do avanço tecnológico global, a adoção efetiva da sustentabilidade permanece limitada nesses contextos, exigindo modelos estruturados que considerem simultaneamente fatores organizacionais, tecnológicos e institucionais. Nesse sentido, o framework é concebido como uma estrutura sistêmica capaz de orientar decisões gerenciais voltadas à transição sustentável.

O modelo organiza a adoção da sustentabilidade a partir de facilitadores multidimensionais, agrupados em categorias gerenciais, econômicas, ambientais, tecnológicas/informacionais e de cadeia de suprimentos. Entre os principais elementos destacam-se o comprometimento da alta gestão, políticas de apoio à sustentabilidade, alocação orçamentária adequada, adoção de sistemas ciberfísicos, otimização de processos, flexibilidade produtiva, métricas de desempenho sustentável e práticas colaborativas ao longo da cadeia de suprimentos. Essa abordagem reforça a sustentabilidade como resultado de interações entre tecnologia, organização e ambiente competitivo.

Metodologicamente, o estudo combina revisão sistemática da literatura com validação empírica, utilizando o Robust Best–Worst Method (RBWM) para mensurar a intensidade de influência relativa de cada facilitador na adoção da sustentabilidade. A aplicação empírica em uma organização manufatureira indiana permite hierarquizar os facilitadores e identificar aqueles com maior impacto na transição sustentável, conferindo robustez analítica e aplicabilidade prática ao framework proposto.

Embora a proposta apresente contribuições relevantes ao estruturar e priorizar os facilitadores da sustentabilidade associados à Indústria 4.0, ela não estabelece relações diretas com indicadores de desempenho organizacional, nem realiza validação estrutural por meio de modelagem de equações estruturais. Essas limitações justificam sua adaptação, expansão e integração na estrutura analítica discutida nesta tese, que sistematiza múltiplas dimensões organizacionais e oferece subsídios exploratórios para futuras validações empíricas.

APÊNDICE III - Instrumento de coleta de dados

CARTA DE APRESENTAÇÃO

Pesquisa sobre MANUFATURA SUSTENTÁVEL

Prezado(s) Senhor (es),

Atualmente, os desafios econômicos, ambientais e sociais se apresentam cada vez mais complexos, forçando as organizações a inovar, gerenciar mudanças e promover o surgimento de novas atividades. Neste contexto emerge a necessidade por sustentabilidade.

Considerando-se esse cenário, a presente pesquisa visa identificar a sustentabilidade em processos de manufatura com o objetivo final de propor direções analíticas e fundamentos teórico-empíricos para o desenvolvimento futuro de modelos de manufatura sustentável para MPMEs.

Este levantamento *survey* é parte de um projeto de pesquisa do Programa de Pós graduação em Administração da Universidade Paulista – UNIP.

A sua contribuição é de extrema importância para a pesquisa e para a de proposição do modelo teórico e empírico de manufatura sustentável para MPMEs. O questionário completo é constituído por oito blocos, conforme descrição a seguir:

Bloco 1: Manufatura sustentável 4.0 – Dimensão Organizacional

Bloco 2: Manufatura sustentável 4.0 – Dimensão Recursos humanos

Bloco 3: Manufatura sustentável 4.0 – Dimensão Estratégica

Bloco 4: Manufatura sustentável 4.0 – Dimensão Econômica

Bloco 5: Manufatura sustentável 4.0 – Dimensão Operacional

Bloco 6: Manufatura sustentável 4.0 – Dimensão Inovação tecnológica

Bloco 7: Manufatura sustentável 4.0 – Dimensão Ambiental

Bloco 8: Desempenho Organizacional – Dimensão Resultado da Gestão de Recursos Humanos

Bloco 9: Desempenho Organizacional – Dimensão Resultados Organizacionais

Bloco 10: Desempenho Organizacional – Dimensão Resultados Financeiros / Contábeis / Mercado

Bloco 11: Desempenho Organizacional – Dimensão Resultados Sustentáveis

Bloco 12: Caracterização do respondente e da organização;

São necessários aproximadamente 20 minutos de seu tempo, sendo que nenhuma informação sigilosa será solicitada. O nome da sua organização não será mencionado nas análises e conclusões deste estudo. Caso a empresa necessite de um documento de comprometimento de sigilo, por favor, solicite por e-mail para cleber@aventurabrasil.com.

É muito importante que todas as questões sejam respondidas. Se a empresa fizer parte de um grupo, responda com base na unidade de negócio onde você trabalha, e não com base no conglomerado como um todo.

Desde já agradecemos sua colaboração e nos comprometemos a enviar o sumário executivo do resultado da pesquisa, se for do seu interesse. Para que isso seja possível, indique seu e-mail no questionário.

Em caso de dúvidas, favor entrar em contato através dos contatos indicados abaixo:

Autor: Doutorando Cleber Gaspar Correa Duarte e-mail: cleber@aventurabrasil.com ;

Tel.: 55 11 98677-3378

Currículo: <https://lattes.cnpq.br/3078145164370599>

PPPG – Programa de Pós-Graduação em Administração - Universidade Paulista - UNIP

Endereço: R. Dr. Bacelar, 1212 - Vila Clementino, São Paulo - SP, 04026-002

Telefone: (11) 5586-4000

Atenciosamente,

Cleber Gaspar Correa Duarte

Doutorando PPGA/UNIP

Nas questões dos **Blocos de 1 a 11**, para cada item apresentado, solicitamos que você avalie o grau de utilização, o grau de importância relativos às práticas ou condições descritas em cada afirmação. Essas duas avaliações são totalmente independentes entre si.

1- Grau de utilização: Avalie, na escala de 0 a 10, o grau da utilização pela sua empresa das práticas ou condições descritas em cada afirmação. Por grau de utilização, entenda o quanto essas práticas ou condições estão incorporada nas rotinas, processos e estratégias da sua organização.

2- Grau de importância: Avalie, na escala de 0 a 10, o grau de importância que você atribui às práticas ou condições descritas para que sua empresa alcance o nível de manufatura sustentável 4.0 que julga adequado/necessário.

O **Bloco 12** destina-se ao **preenchimento de dados de identificação** da empresa respondente.

A aplicação do questionário demanda aproximadamente 15 minutos. Ressaltamos que nenhuma informação sigilosa será solicitada e que o nome da organização não será mencionado nas análises ou conclusões do estudo.

Ao prosseguir e responder ao questionário, entende-se que o(a) participante está ciente dos objetivos da pesquisa e autoriza, de forma voluntária, a utilização das informações fornecidas exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, assegurando-se o tratamento ético e confidencial dos dados.

Caso sua empresa necessite de um documento formal de confidencialidade, poderá solicitá-lo pelo e-mail: cleber@aventurabrasil.com.

Pedimos a gentileza de responder integralmente todas as questões. Se sua empresa fizer parte de um grupo empresarial, as respostas devem refletir a unidade de negócio onde você atua, e não o conglomerado como um todo.

Agradecemos imensamente sua colaboração e nos comprometemos a disponibilizar o sumário executivo dos resultados para os participantes que manifestarem interesse, bastando indicar seu e-mail no questionário.

BLOCO 1: MANUFATURA SUSTENTÁVEL 4.0 – DIMENSÃO ORGANIZACIONAL

As 04 questões deste bloco são referentes à dimensão organizacional.

A escala utilizada varia de 0 a 10, em que o valor 0 representa um grau muito baixo de utilização ou importância, enquanto o valor 10 indica o grau mais elevado. Os valores intermediários permitem captar diferentes níveis de percepção dentro da organização.

Assinale o grau com que as variáveis da dimensão organizacional na manufatura sustentável 4.0 são utilizadas na sua organização, bem como qual é o grau de importância.	Grau de Utilização	Grau de Importância
ORG-01 – Design e Manufatura Sustentável – A organização integra princípios de sustentabilidade em seus projetos e processos produtivos, priorizando materiais de baixo impacto, design circular e práticas que reduzem significativamente os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
ORG-02 – Modelagem Multifuncional de Fábrica – A empresa adota modelos organizacionais flexíveis e colaborativos, promovendo a integração entre produção, sustentabilidade, TI e logística, de modo a garantir maior eficiência, inovação e alinhamento das práticas sustentáveis em todas as áreas.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
ORG-03 – Capacitação e Treinamento – A organização investe de forma contínua na capacitação dos colaboradores, oferecendo treinamentos voltados à sustentabilidade, economia circular, tecnologias emergentes e práticas operacionais, visando ampliar competências e consolidar uma cultura sustentável.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
ORG-04 – Qualificação e Capacitação – A organização conta com profissionais devidamente qualificados em termos técnicos e comportamentais, preparados para implementar processos sustentáveis, tecnologias da Indústria 4.0 e princípios da economia circular de forma eficaz.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

BLOCO 2: MANUFATURA SUSTENTÁVEL 4.0 – DIMENSÃO RECURSOS HUMANOS

As 04 questões deste bloco são referentes à dimensão social e de recursos humanos.

A escala utilizada varia de 0 a 10, em que o valor 0 representa um grau muito baixo de utilização ou importância, enquanto o valor 10 indica o grau mais elevado. Os valores intermediários permitem captar diferentes níveis de percepção dentro da organização.

Assinale o grau com que as variáveis de sustentabilidade ambiental na manufatura sustentável 4.0 são utilizadas na sua organização, bem como qual é o grau de importância.	Grau de Utilização	Grau de Importância
SOC-01 – Barreiras Regulatórias e Institucionais - A organização desenvolve e aplica mecanismos para superar barreiras legais, burocráticas e institucionais que limitam a adoção da manufatura sustentável, incluindo ausência de incentivos governamentais, regulamentações rígidas e políticas públicas insuficientes.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
SOC-02 – Barreiras Culturais e Organizacionais – A organização desenvolve e aplica mecanismos para superar resistências culturais e organizacionais, como mentalidade conservadora e baixo engajamento, que dificultam a consolidação de práticas de manufatura sustentável no ambiente corporativo.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
SOC-03 – Engajamento das Partes Interessadas - A organização promove o engajamento ativo de stakeholders clientes, fornecedores, colaboradores, comunidade e governo garantindo sua participação nos processos de implementação e desenvolvimento de práticas sustentáveis.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
SOC-04 – Indicadores Sociais - A organização adota indicadores sociais que monitoram bem-estar, diversidade, inclusão, segurança no trabalho, responsabilidade social corporativa e contribuição ao desenvolvimento comunitário sustentável.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

BLOCO 3: MANUFATURA SUSTENTÁVEL 4.0 – DIMENSÃO ESTRATÉGICA

As 05 questões deste bloco são referentes à dimensão estratégica.

A escala utilizada varia de 0 a 10, em que o valor 0 representa um grau muito baixo de utilização ou importância, enquanto o valor 10 indica o grau mais elevado. Os valores intermediários permitem captar diferentes níveis de percepção dentro da organização.

Assinale o grau com que as variáveis da dimensão estratégica na manufatura sustentável 4.0 são utilizadas na sua organização, bem como qual é o grau de importância.	Grau de Utilização	Grau de Importância
EST-01 – Indicadores de Eficiência de Recursos - A organização utiliza indicadores específicos para acompanhar a eficiência no uso de recursos naturais, como energia, água e materiais, garantindo ganhos ambientais e econômicos relevantes.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
EST-02 – Manufatura Sustentável - A organização adota práticas produtivas sustentáveis, incluindo redução de resíduos, uso eficiente de insumos e desenvolvimento de produtos circulares, alinhados a critérios ambientais e econômicos.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
EST-03 – Monitoramento e Indicadores de Desempenho Sustentável – A organização implementa sistemas de monitoramento contínuo para acompanhar indicadores ambientais, sociais e econômicos, assegurando alinhamento das metas de sustentabilidade aos objetivos organizacionais.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
EST-04 – Indicadores de Inovação Sustentável - A organização estabelece métricas para mensurar seus esforços de inovação sustentável, considerando desenvolvimento de novos processos, tecnologias limpas, modelos de negócio inovadores e produtos sustentáveis.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
EST-05 – Integração Digital, Economia Circular e Manufatura - A organização integra simultaneamente práticas de manufatura sustentável, economia circular e tecnologias digitais, promovendo rastreabilidade, eficiência produtiva e redução dos impactos socioambientais.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

BLOCO 4: MANUFATURA SUSTENTÁVEL 4.0 – DIMENSÃO ECONÔMICA

As 04 questões deste bloco são referentes à dimensão econômica.

A escala utilizada varia de 0 a 10, em que o valor 0 representa um grau muito baixo de utilização ou importância, enquanto o valor 10 indica o grau mais elevado. Os valores intermediários permitem captar diferentes níveis de percepção dentro da organização.

Assinale o grau com que as variáveis da dimensão econômica na manufatura sustentável 4.0 são utilizadas na sua organização, bem como qual é o grau de importância.	Grau de Utilização	Grau de Importância
ECO-01 – Barreiras Econômicas - A organização desenvolve e aplica mecanismos para superar barreiras econômicas, como altos custos de investimento inicial, retorno financeiro lento e acesso restrito a linhas de crédito e incentivos governamentais.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
ECO-02 – Desempenho Organizacional - A organização avalia como suas práticas sustentáveis impactam positivamente custos operacionais, produtividade, lucratividade e competitividade no mercado em que atua.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
ECO-03 – Indicadores Econômicos e Limitações Financeiras - A organização adota indicadores para medir o retorno econômico-financeiro de suas ações sustentáveis, ao mesmo tempo em que identifica desafios financeiros que limitam a implementação de projetos sustentáveis e tecnológicos.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
ECO-04 – Investimento em Pesquisa e Desenvolvimento - A organização investe em pesquisa e desenvolvimento para promover inovação em produtos, processos e tecnologias sustentáveis alinhadas aos princípios da economia circular.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

BLOCO 5: MANUFATURA SUSTENTÁVEL 4.0 – DIMENSÃO OPERACIONAL

As 05 questões deste bloco são referentes à dimensão operacional.

A escala utilizada varia de 0 a 10, em que o valor 0 representa um grau muito baixo de utilização ou importância, enquanto o valor 10 indica o grau mais elevado. Os valores intermediários permitem captar diferentes níveis de percepção dentro da organização.

Assinale o grau com que as variáveis da dimensão operacional na manufatura sustentável 4.0 são utilizadas na sua organização, bem como qual é o grau de importância.	Grau de Utilização	Grau de Importância
OPE-01 – Gestão de Fluxos de Materiais e Energia - A organização monitora e otimiza fluxos de materiais, energia e resíduos, reduzindo desperdícios e consumo, promovendo eficiência operacional, econômica e ambiental integrada.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
OPE-02 – Práticas de Economia Circular - A organização implementa práticas de economia circular, como reciclagem, reuso, remanufatura, design modular e extensão da vida útil de produtos.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
OPE-03 – Práticas Logísticas Sustentáveis - A organização adota práticas logísticas sustentáveis, incluindo rotas otimizadas, transporte de baixo impacto, uso de embalagens ecológicas e logística reversa de materiais.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
OPE-04 – Integração Lean Six Sigma, Economia Circular e Indústria 4.0 - A organização combina metodologias Lean e Six Sigma com princípios de economia circular e tecnologias da Indústria 4.0, aumentando eficiência produtiva e sustentabilidade corporativa.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
OPE-05 – Eficiência Operacional - A organização maximiza a eficiência dos processos operacionais ao reduzir custos, desperdícios e impactos ambientais, gerando simultaneamente valor sustentável para a organização.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

BLOCO 6: MANUFATURA SUSTENTÁVEL 4.0 – DIMENSÃO INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

As 04 questões deste bloco são referentes à dimensão inovação tecnológica.

A escala utilizada varia de 0 a 10, em que o valor 0 representa um grau muito baixo de utilização ou importância, enquanto o valor 10 indica o grau mais elevado. Os valores intermediários permitem captar diferentes níveis de percepção dentro da organização.

Assinale o grau com que as variáveis da dimensão inovação tecnológica na manufatura sustentável 4.0 são utilizadas na sua organização, bem como qual é o grau de importância.	Grau de Utilização	Grau de Importância
INO-01 – Design Sustentável - A organização desenvolve produtos considerando seu ciclo de vida, priorizando materiais sustentáveis, recicláveis e de baixo impacto, minimizando efeitos ambientais negativos.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
INO-02 – Integração de Tecnologia Verde e Inovação - A organização integra tecnologias limpas e de baixo impacto ambiental a seus processos de inovação, garantindo valor sustentável e competitivo ao negócio.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
INO-03 – Tecnologias da Indústria 4.0 - A organização adota tecnologias da Indústria 4.0, como IoT, inteligência artificial e blockchain, para promover automação, eficiência e sustentabilidade em seus processos.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
INO-04 – Barreiras Técnicas – A organização desenvolve mecanismos para enfrentamento e superação de barreiras técnicas e operacionais, como falta de infraestrutura tecnológica, obsolescência de equipamentos e suporte insuficiente, dificultando práticas sustentáveis.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

BLOCO 7: MANUFATURA SUSTENTÁVEL 4.0 – DIMENSÃO AMBIENTAL

As 05 questões deste bloco são referentes à dimensão ambiental.

A escala utilizada varia de 0 a 10, em que o valor 0 representa um grau muito baixo de utilização ou importância, enquanto o valor 10 indica o grau mais elevado. Os valores intermediários permitem captar diferentes níveis de percepção dentro da organização.

Assinale o grau com que as variáveis da dimensão ambiental na manufatura sustentável 4.0 são utilizadas na sua organização, bem como qual é o grau de importância.	Grau de Utilização	Grau de Importância
AMB-01 – Barreiras Economia Circular - A organização desenvolve e aplica mecanismos para superação dos desafios na adoção da economia circular, incluindo barreiras culturais, tecnológicas, financeiras, regulatórias e de integração com fornecedores e clientes.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
AMB-02 – Cadeia de Suprimentos Sustentável - A organização adota práticas sustentáveis na gestão de sua cadeia de suprimentos, considerando critérios socioambientais na escolha de fornecedores e colaboração para redução de impactos.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
AMB-03 – Conhecimento sobre Sustentabilidade e Cultura Sustentável - A organização promove cultura de sustentabilidade, incentivando conhecimento, sensibilização e engajamento de colaboradores e líderes em práticas e valores organizacionais sustentáveis.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
AMB-04 – Integração de Sustentabilidade e Digitalização - A organização utiliza tecnologias digitais, como IoT, Big Data e Blockchain, para aprimorar práticas sustentáveis, incluindo rastreabilidade de resíduos, monitoramento e otimização de recursos.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
AMB-05 – Integração Indústria 4.0 e Economia Circular - A organização integra tecnologias da Indústria 4.0 com princípios de economia circular, aplicando remanufatura, reciclagem, reutilização e gestão inteligente de resíduos.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

BLOCO 8: DESENVOLVIMENTO ORGANIZACIONAL – DIMENSÃO RESULTADOS DA GESTÃO DE RECURSOS HUMANOS

As 03 questões deste bloco são referentes à dimensão **Resultados da gestão de recursos humanos**.

A escala utilizada varia de 0 a 10, em que o valor 0 representa um grau muito baixo de utilização ou importância, enquanto o valor 10 indica o grau mais elevado. Os valores intermediários permitem captar diferentes níveis de percepção dentro da organização.

Assinale o grau com que as variáveis da dimensão Resultados da gestão de recursos humanos são utilizadas na sua organização, bem como qual é o grau de importância.	Grau de Utilização	Grau de Importância
RGH-01 – Satisfação dos acionistas e investidores , por meio de transparência, crescimento consistente e gestão equilibrada dos resultados financeiros e socioambientais é medida de desempenho em sua organização.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
RGH-02 – Satisfação e engajamento dos colaboradores bem como o comprometimento e o alinhamento dos colaboradores com os valores e metas da empresa é medida de desempenho em sua organização.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
RGH-03 – Retenção e desenvolvimento de talentos promovendo capacitação contínua, valorização profissional e aprendizagem organizacional é medida de desempenho em sua organização	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

BLOCO 9: DESENVOLVIMENTO ORGANIZACIONAL – DIMENSÃO RESULTADOS ORGANIZACIONAIS

As 03 questões deste bloco são referentes à dimensão **Resultados Organizacionais**.

A escala utilizada varia de 0 a 10, em que o valor 0 representa um grau muito baixo de utilização ou importância, enquanto o valor 10 indica o grau mais elevado. Os valores intermediários permitem captar diferentes níveis de percepção dentro da organização.

Assinale o grau com que as variáveis da dimensão Resultados Organizacionais são utilizadas na sua organização, bem como qual é o grau de importância.	Grau de Utilização	Grau de Importância
ROG-01 – Posição competitiva geral da organização, destacando-a pela inovação, qualidade de produtos e integração tecnológica é medida de desempenho em sua organização..	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
ROG-02 – Aumento do valor da empresa tornando-a mais atrativa para investidores, parceiros e stakeholders é medida de desempenho em sua organização.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
ROG-03 – Reputação e imagem institucional da organização, promovendo credibilidade, ética e responsabilidade socioambiental é medida de desempenho em sua organização.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

**BLOCO 10: DESENVOLVIMENTO ORGANIZACIONAL – DIMENSÃO RESULTADOS
FINANCEIROS / CONTÁBEIS / MERCADO**

As 03 questões deste bloco são referentes à dimensão **Resultados Financeiros/Contábeis/Mercado**

A escala utilizada varia de 0 a 10, em que o valor 0 representa um grau muito baixo de utilização ou importância, enquanto o valor 10 indica o grau mais elevado. Os valores intermediários permitem captar diferentes níveis de percepção dentro da organização.

Assinale o grau com que as variáveis da dimensão Resultados Financeiros/Contábeis/Mercado são utilizadas na sua organização, bem como qual é o grau de importância.	Grau de Utilização	Grau de Importância
FCM-01 – Margem de lucro sobre as vendas - por meio de eficiência produtiva, redução de desperdícios e precificação competitiva é medida de desempenho em sua organização.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
FCM-02 – Participação de mercado - O grau em que as práticas de manufatura sustentável impactam o aumento da participação da empresa no mercado, favorecendo a conquista de novos clientes e o fortalecimento da marca é medida de desempenho em sua organização.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
FCM-03 – Crescimento das vendas - refletindo a aceitação dos produtos/serviços e a eficácia das estratégias comerciais é medida de desempenho em sua organização. *	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

BLOCO 11: DESENVOLVIMENTO ORGANIZACIONAL – DIMENSÃO RESULTADOS SUSTENTÁVEIS

As 03 questões deste bloco são referentes à dimensão **Resultados Sustentáveis**

A escala utilizada varia de 0 a 10, em que o valor 0 representa um grau muito baixo de utilização ou importância, enquanto o valor 10 indica o grau mais elevado. Os valores intermediários permitem captar diferentes níveis de percepção dentro da organização.

Assinale o grau com que as variáveis da dimensão Resultados Sustentáveis são utilizadas na sua organização, bem como qual é o grau de importância.	Grau de Utilização	Grau de Importância
RES-01 – Retorno sobre o investimento (ROI) dado por retornos financeiros adequados, impulsionados pela inovação, modernização produtiva e eficiência operacional é medida de desempenho em sua organização.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
RES-02 – Redução de impactos ambientais e sociais negativos promovendo uma gestão responsável dos recursos e das operações é medida de desempenho em sua organização.operações.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
RES-03 – Crescimento da participação de mercado , demonstrando competitividade e capacidade de adaptação setorial é medida de desempenho em sua organização.	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

BLOCO 12: CARACTERIZAÇÃO DO RESPONDENTE E DA ORGANIZAÇÃO

Este bloco de questões visa encerrar a pesquisa com uma questão final aberta e caracterizar o perfil dos respondentes e das organizações que participam da pesquisa. Vale destacar que, se a empresa é diversificada, atua em diferentes setores e em vários países, deve responder pela unidade de negócio em que atua.

1) Descreva outras áreas, resultados ou impactos relevantes que, em sua percepção, foram gerados pelas iniciativas ou práticas de manufatura sustentável adotadas pela organização.

(Considere efeitos econômicos, operacionais, sociais, ambientais, tecnológicos ou de gestão que não tenham sido abordados nas questões anteriores.)

2) Nome do profissional respondente (opcional):

3) Email:

4) Cargo / Função:

- | | | |
|--|-------------------------------------|----------------------------------|
| ☐ Proprietário(a) / Sócio(a)-administrador(a) | ☐ Diretor(a) | ☐ Gerente |
| ☐ Supervisor(a) / Coordenador(a) | ☐ Líder | ☐ Outros |

5) Departamento ou área de atuação:

- | | | |
|---|---|------------------------------------|
| ☐ Administração | ☐ Engenharia | ☐ Comercial |
| ☐ Tecnologia da Informação | ☐ Industrial / Operacional | ☐ Qualidade |

6) Tempo de Experiência Profissional

- | | | |
|--|---------------------------------------|---------------------------------------|
| ☐ Acima 20 Anos | ☐ 15 a 20 Anos | ☐ 10 a 15 Anos |
| ☐ 5 a Dez Anos | ☐ Até 5 anos | |

7) Nome da empresa (opcional):

8) CNPJ da empresa (opcional):

9) Tempo de existência da Empresa

- | | | | |
|--|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| ☐ Acima 20 Anos | ☐ 10 a 20 Anos | ☐ 5 a 10 Anos | ☐ Até 5 anos |
|--|---------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|

10) Marque apenas uma opção que melhor represente a principal atividade da empresa

- | | |
|--|--|
| ☐ Metalomecânico e Eletromecânico | ☐ Plástico, Borracha e Embalagens |
| ☐ Têxtil, Vestuário, Mobiliário e Madeira | ☐ Químico, Cosmético e de Alimentos |
| ☐ Eletroeletrônico, Automação e Tecnologias 4.0 | ☐ Ambiental, Energético e Sustentável |

11) Faixa de Faturamento Anual

- | | |
|---|--|
| ☐ Até R\$ 360 mil (ME) | ☐ R\$ 360 mil a R\$ 4,8 milhões (EPP) |
| ☐ R\$ 4,8 milhões a R\$ 50 milhões (Média empresa) | ☐ Acima de R\$ 50 milhões |
| ☐ Prefiro não informar | |

APÊNDICE VI – Revisão da literatura

A revisão da literatura desta pesquisa foi estruturada em três etapas principais: (i) definição de critérios e protocolos de busca, (ii) análise crítica da amostra de artigos e (iii) construção de quadros comparativos, que sintetizam pontos fortes e limitações da literatura revisada, seguindo as etapas metodológicas utilizadas descritas no (Quadro 10):

Quadro 10 - Etapas metodológicas utilizadas

Item	Descrição
Definição da questão de pesquisa	Quais modelos de implementação de manufatura sustentável foram propostos na literatura científica nos últimos 20 anos e quais são suas principais características, abordagens e limitações, bem como quais são as variáveis correlatas?
Bases de dados utilizadas	Scopus e Web of Science
Palavras-chave e operadores booleanos	Conforme apresentados no Quadro 2 do estudo, com a combinação de termos relacionados à sustainable manufacturing, Industry 4.0, frameworks, models, entre outros, utilizando operadores como AND, OR e truncamentos.
Critérios de inclusão	Artigos revisados por pares, Publicações com foco em modelos ou frameworks aplicáveis à manufatura sustentável e/ou Indústria 4.0, Estudos empíricos ou teórico-empíricos.
Critérios de exclusão	Estudos puramente conceituais, sem proposição de model, Documentos duplicados, Artigos não acessíveis na íntegra (paywall ou restrição institucional)
Análise dos dados	Extração das características principais dos modelos identificados, Categorização e agrupamento das variáveis proposta, Avaliação das contribuições teóricas e práticas, Identificação das lacunas de pesquisa para proposição futura

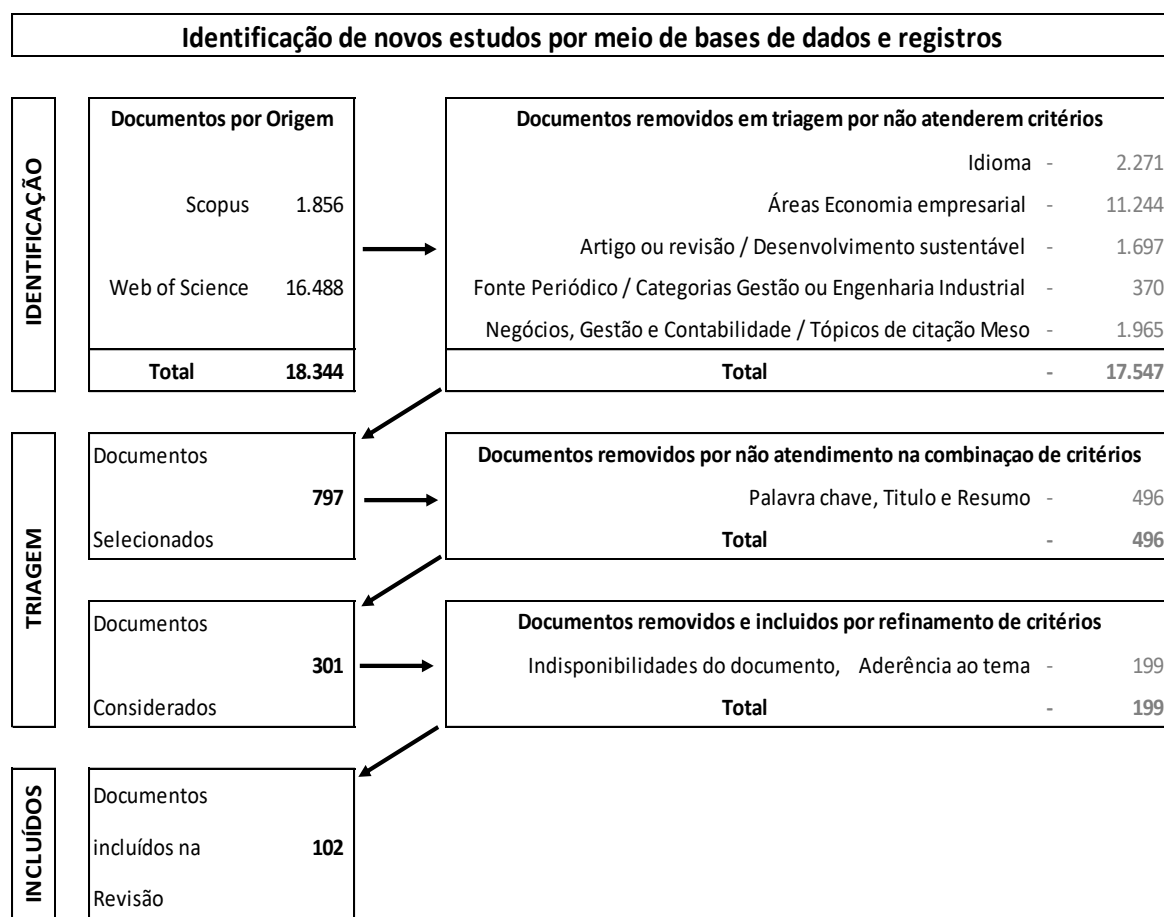
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para assegurar rigor metodológico e transparência, foi utilizado o protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), com base em sua versão atualizada, o PRISMA 2020 (Page et al., 2021). Embora o PRISMA tenha sido originalmente desenvolvido para revisões clínicas, sua estrutura versátil tem sido amplamente adotada em áreas como ciências sociais, engenharia e gestão, por oferecer diretrizes claras para condução e relato de revisões sistemáticas (Galvão, Pansani e Harrad, 2015).

O fluxograma do processo de triagem dos artigos utilizados é apresentado na (Tabela 16), conforme as etapas propostas pelo PRISMA: identificação, triagem, elegibilidade e

inclusão. A aplicação do protocolo permitiu estruturar todas as fases da pesquisa, desde a definição da pergunta até a extração e síntese dos dados.

Tabela 16 - Aplicação do fluxograma do método PRISMA 2020



Fonte: Fluxograma adaptado de PRISMA 2020.

Além disso, o estudo realiza uma descrição bibliométrica da amostra de publicações, abrangendo a distribuição temporal dos artigos, os países mais produtivos, os autores mais relevantes e as áreas do conhecimento predominantes. Essa etapa foi complementada pelo uso do software VOSviewer, ferramenta consolidada para a visualização de redes de coocorrência de termos, cocitação, coautoria e acoplamento bibliográfico, permitindo identificar os principais campos de estudo, tendências emergentes e redes colaborativas entre autores e instituições.

A análise qualitativa foi conduzida com apoio de tabelas, quadros e figuras explicativas, visando uma compreensão aprofundada dos modelos propostos para a implementação da manufatura sustentável e suas inter-relações com a economia circular e a Indústria 4.0. O PRISMA 2020 contempla tanto revisões com síntese estatística (meta-análise) quanto aquelas

de abordagem qualitativa, como esta, o que reforça sua adequação metodológica ao presente estudo (Page et al., 2021).

Dessa forma, a combinação da revisão da literatura com as técnicas bibliométricas e de visualização por redes garante uma análise abrangente, rigorosa e consistente da literatura científica recente, contribuindo para o avanço teórico e prático na área de manufatura sustentável.

A pergunta norteadora foi:

Quais modelos de implementação de manufatura sustentável foram propostos na literatura científica nos últimos 20 anos e quais são suas principais características, abordagens e limitações, bem como quais são as variáveis correlatas?

As buscas foram realizadas nas bases Scopus e Web of Science Apêndice IV. Utilizou-se a combinação dos termos, operadores e restrições ilustrados no (Quadro 11). Foram incluídos apenas artigos revisados por pares, publicados sem restrição de período para confirmar se existem publicações anteriores aos últimos 20 anos, limite estabelecido na pergunta norteadora para análise, que apresentassem modelos conceituais, empíricos ou aplicados à manufatura sustentável.

Quadro 11 - Chave final de busca

Bancos:	Scopus e WoS	Tipos:	Artigos e revisões
Período:	Sem restrição	Idioma:	Inglês
WoS	(ALL=("industry 4.0") OR ALL=("industrie 4.0") AND ALL=("digital transformation") AND ALL=(sustain* OR "circular econ*") AND ALL=(manufact*) AND ALL=(model* OR frame*)) AND (DT=("ARTICLE" OR "REVIEW") AND LA=("ENGLISH" OR "PORTUGUESE") AND SJ=("BUSINESS ECONOMICS") AND SDG=("09 INDUSTRY INNOVATION AND INFRASTRUCTURE") AND TASCA=("MANAGEMENT" OR "BUSINESS" OR "ENGINEERING INDUSTRIAL" OR "ENGINEERING MANUFACTURING" OR "INDUSTRIAL RELATIONS LABOR") AND TMSO=("6.3 Management"))		
Scopus	(TITLE-ABS-KEY ("industry 4.0") OR TITLE-ABS-KEY ("industrie 4.0") OR TITLE-ABS-KEY ("digital transformation") AND TITLE-ABS-KEY (sustain* OR "circular econ*") AND TITLE-ABS-KEY (manufact*) AND TITLE-ABS-KEY (model* OR frame*)) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "BUSI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cr")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English"))		

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Artigos duplicados, estudos sem acesso completo, que não abordassem diretamente a proposição ou avaliação de modelos, foram excluídos. Ao final, 102 artigos foram selecionados

e analisados conforme sete categorias: autores, tipo de modelo, variáveis consideradas, dimensões abordadas, objetivo do modelo, limitações e aplicação setorial.

Essa abordagem possibilitou uma análise crítica estruturada dos modelos existentes, fundamentando-se em métodos consagrados de revisão da literatura (Snyder, 2019), garantindo consistência entre os dados coletados e os objetivos do estudo.

Estratégia de análise de conteúdo da amostra de artigos

A análise de conteúdo realizada neste estudo teve como objetivo interpretar criticamente os 102 artigos selecionados por meio da revisão da literatura, a fim de extrair padrões, categorias e modelos relevantes para a formulação de um arcabouço teórico-empírico aplicável à manufatura sustentável 4.0 em MPMEs de economias emergentes. Para garantir sistematização e rigor, a análise foi dividida em cinco etapas metodológicas complementares, descritas a seguir:

a) Estruturação da base de análise

Inicialmente, os artigos foram organizados em uma planilha matriz com variáveis previamente definidas, contemplando: autores, título, ano, país de publicação, tipo e abordagem do modelo proposto, variáveis-chave, dimensões consideradas, aplicação setorial, e contribuições teóricas e práticas. Essa organização permitiu criar uma base estruturada para classificação e codificação dos dados.

b) Identificação de temas relevantes e agrupamentos (clusters)

Com base na planilha matriz, realizou-se uma codificação temática com apoio de análise de conteúdo qualitativa. Essa etapa buscou mapear afinidades entre os enfoques dos artigos, resultando na formação de sete agrupamentos temáticos (clusters) abaixo:

1. Transformação digital e sustentabilidade (Indústria 4.0);
2. Modelos baseados em indicadores de desempenho sustentável;
3. Integração entre lean manufacturing e economia circular;
4. Logística sustentável e cadeia de suprimentos digital;
5. Estratégias para adoção em MPMEs de economias emergentes;
6. Modelos baseados em inteligência artificial, machine learning e fuzzy logic;
7. Avaliação de maturidade sustentável e indicadores ESG.

A validade dos agrupamentos foi corroborada com apoio do software VOSviewer, por meio da visualização de coocorrência de termos e cocitação entre autores.

c) Extração e classificação de dimensões analíticas

A partir da análise detalhada dos modelos e variáveis presentes nos 102 artigos, foi realizada uma classificação das informações em sete dimensões analíticas recorrentes na literatura, que oferecem uma visão abrangente e sistêmica dos fatores que influenciam a adoção da manufatura sustentável 4.0, especialmente em contextos de MPMEs. São elas:

1. ***Dimensão Organizacional:*** refere-se à estrutura, governança, liderança, comunicação interna, mecanismos de coordenação, integração interfuncional e processos decisórios que suportam a implementação de práticas sustentáveis.
2. ***Dimensão Recursos Humanos:*** agrupa fatores ligados ao capital humano (capacitação, engajamento, bem-estar), cultura organizacional sustentável, responsabilidade social, pressões institucionais, apoio governamental, políticas públicas e contextos regulatórios.
3. ***Dimensão Estratégica:*** abrange elementos associados ao alinhamento entre sustentabilidade e posicionamento estratégico, gestão de riscos, visão de longo prazo, vantagem competitiva e resiliência organizacional.
4. ***Dimensão Econômica:*** contempla variáveis relacionadas à viabilidade financeira, redução de custos, desempenho econômico, retorno sobre investimento (ROI), competitividade e produtividade.
5. ***Dimensão Operacional:*** considera práticas de melhoria contínua, qualidade, lean manufacturing, indicadores de eficiência produtiva, manutenção, logística reversa e controle de processos sustentáveis.
6. ***Dimensão de Inovação / Tecnológica:*** inclui o uso e adoção de tecnologias da Indústria 4.0 (como IoT, IA, Big Data, impressão 3D), digitalização de processos, maturidade digital e capacidade de inovação tecnológica voltada à sustentabilidade.
7. ***Dimensão Ambiental:*** engloba aspectos como eficiência energética, gestão de resíduos, redução de emissões, uso de materiais renováveis, ecodesign e indicadores ambientais.

Essas dimensões foram fundamentais para agrupar as variáveis propostas nos diferentes modelos analisados, permitindo identificar convergências e lacunas entre os estudos, bem como oferecer uma base estruturada para o desenvolvimento de diretrizes analíticas para modelos futuros.

d) Tipologia dos modelos propostos

Os modelos identificados na amostra foram classificados em seis tipos predominantes, conforme a categorização apresentada na (Tabela 17), resultante da análise metodológica.

Tabela 17 - Modelos predominantes

TIPOS	DESCRIÇÃO	QTD
Modelos conceituais	Focados na construção teórica, sem aplicação empírica direta	26
Modelos empíricos	Baseados em estudos de caso, surveys ou análises estatísticas	32
Frameworks avaliativos	Voltados à mensuração e avaliação do desempenho sustentável em ambientes produtivos	18
Modelos híbridos	Integram abordagens qualitativas e quantitativas na proposição e validação dos modelos	10
Modelos com fuzzy/SEM	Utilizam lógica fuzzy, SEM (Structural Equation Modeling) ou outras técnicas quantitativas avançadas	11
Estruturas taxonômicas/classificadoras	Propõem classificações e categorizações de elementos, práticas ou dimensões conceituais	5

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Essa diversidade tipológica evidencia a evolução da área e a coexistência de diferentes estágios de maturidade científica nos estudos analisados.

e) Síntese final e integração dos resultados

A etapa final consistiu na consolidação dos resultados em quadros comparativos e tabelas-síntese, permitindo identificar regularidades, lacunas e oportunidades de pesquisa. Esse processo foi essencial para a construção de uma base analítica integradora, que combina variáveis ESG, tecnologias digitais, economia circular e adaptação institucional para MPMEs.

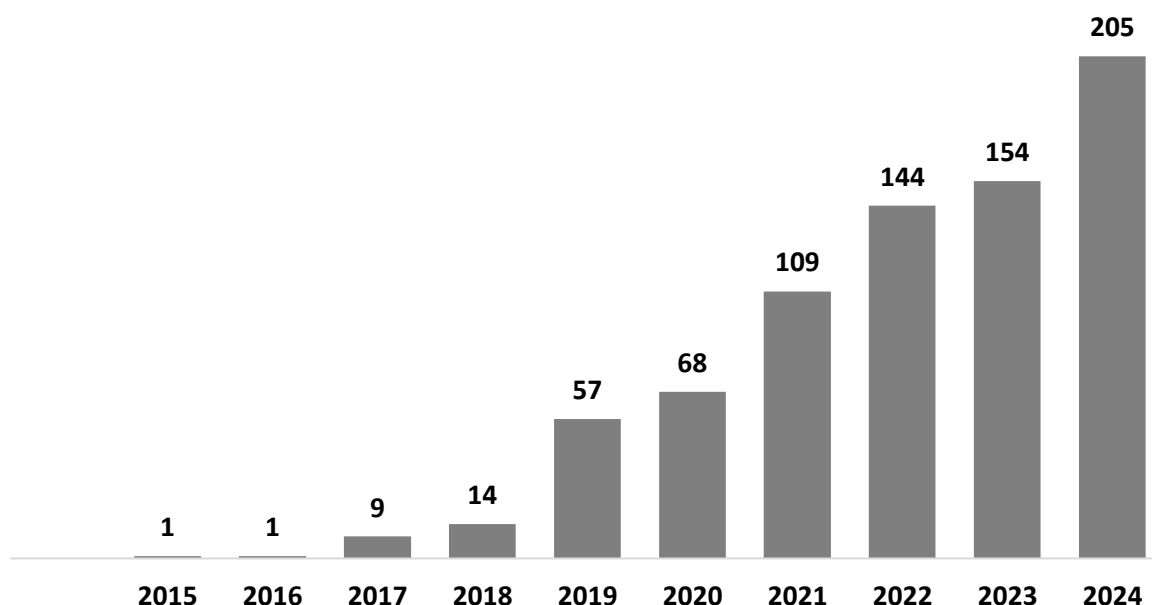
Essa abordagem analítica permitiu não apenas compreender a evolução da literatura, mas também construir uma base conceitual sólida e aplicável à realidade das economias em desenvolvimento, contribuindo para preencher as lacunas teóricas e oferecer diretrizes práticas.

Resultados da análise de conteúdo

A partir da sistematização dos estudos selecionados, observa-se uma tendência de ampliação do volume de publicações, indicando maior interesse acadêmico e desenvolvimento progressivo do campo. A distribuição anual dos artigos analisados na (Figura 3) revela um crescimento da produção científica relacionada à manufatura sustentável. Em 2015 e 2016,

apenas um artigo foi identificado em cada ano, representando uma fase ainda incipiente da discussão sobre o tema. A partir de 2017 verifica-se um leve aumento (9 artigos), seguido por crescimento gradual até 2018 (14 artigos).

Figura 3 - Evolução das publicações científicas



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Entretanto, a curva de crescimento se acentua a partir de 2019, com 57 artigos publicados, indicando uma consolidação da manufatura sustentável como área de interesse estratégico, fortemente impulsionada pelos debates sobre Indústria 4.0 e economia circular (Ghobakhloo, 2020; Bag et al., 2022). Em 2020, com 68 artigos, evidencia-se possível reflexo das mudanças industriais provocadas pela pandemia da COVID-19, que reforçou a busca por cadeias de suprimentos resilientes e sustentáveis.

Os anos seguintes demonstram uma aceleração ainda mais significativa: 109 publicações em 2021, 144 em 2022 e 154 em 2023. Em 2024, o número alcança 205 artigos, representando o ponto mais alto da série temporal. Esse aumento expressivo evidencia o fortalecimento da agenda de sustentabilidade na indústria, acompanhando os avanços regulatórios, tecnológicos e sociais que têm pressionado as organizações a repensarem seus modelos produtivos.

Em relação a participação de países, autores e áreas do conhecimento (Tabela 18), a Índia lidera com 139 contribuições, o que reflete seu forte engajamento na produção acadêmica

voltada à manufatura sustentável e Indústria 4.0, especialmente em contextos de países em desenvolvimento. Em seguida, aparecem Itália (119) e Reino Unido (118), com forte tradição em engenharia, gestão industrial e transição para a economia circular.

Tabela 18 - Participação de países, autores e áreas do conhecimento

PAISES		AUTORES		ÁREAS	
India	139	Garza-Reyes, J.A.	10	Business, Management and Accounting	35%
Italy	119	Kumar V	10	Management	18%
United Kingdom	118	Bag, S.	8	Engineering	13%
China	101	Agrawal, R.	6	Decision Sciences	5%
Brazil	61	Frank AG	6	Economics, Econometrics and Finance	5%
France	61	Ghobakhloo, M.	6	Social Sciences Interdisciplinary	5%
United States	59	Gupta, S.	6	Environmental Science	5%
Germany	52	Avella L	5	Computer Science	4%
Spain	50	Cerchione R	5	Energy	3%
Malaysia	42	Kumar, A.	5	Regional Urban Planning	2%

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Destaca-se também a China (101), com foco crescente em sustentabilidade e cadeias de suprimentos inteligentes, e o Brasil (61), com uma participação relevante que denota o avanço da pesquisa nacional em sustentabilidade aplicada à indústria (Frank et al., 2023).

Os autores mais recorrentes na amostra são Garza-Reyes, J. A. (10 artigos) – com ampla produção sobre modelos de implementação e qualidade sustentável; Kumar, V. (10 artigos) – com forte contribuição em temas de gestão sustentável; Bag, S. (8 artigos) – com ênfase em digitalização e sustentabilidade na cadeia de suprimentos.

Outros autores como Agrawal, R., Frank, A. G., Ghobakhloo, M. e Gupta, S. aparecem com seis publicações cada, reforçando sua relevância na interseção entre transformação digital e sustentabilidade.

A análise das áreas de conhecimento demonstra a natureza multidisciplinar da temática de manufatura sustentável:

- a) ***Business, Management and Accounting (35%) e Management (18%)*** formam o núcleo mais representativo, refletindo a ênfase em modelos estratégicos, operacionais e de gestão da sustentabilidade (Kumar, 2020; Garza-Reyes, 2022).
- b) ***Engineering (13%)*** confirma a base técnica e sistêmica dos modelos propostos.
- c) ***Decision Sciences, Economia, Ciências Ambientais e Ciências Sociais Interdisciplinares*** completam o escopo, indicando abordagens quantitativas, de impacto social e ambiental (Ghobakhloo, 2020; Gupta, 2021).

A presença de ***Computer Science, Energy e Urban Planning*** evidencia abordagens complementares ligadas à digitalização, eficiência energética e sustentabilidade urbana.

A concentração de publicações em países como Índia, China, Reino Unido e Itália evidencia a relevância global do tema e a maturidade de suas comunidades científicas. O Brasil, embora com menor volume, destaca-se pela qualidade e aplicabilidade dos estudos no contexto de PMEs e cadeias produtivas locais.

A diversidade de áreas evidencia que a manufatura sustentável não é apenas um desafio tecnológico, mas também organizacional, estratégico e institucional, exigindo abordagens integradoras, como evidenciado nos modelos analisados nesta revisão da literatura.

A revisão da literatura que resultou na identificação de 102 artigos científicos publicados que propõem modelos conceituais, empíricos ou frameworks para a implementação da manufatura sustentável em diferentes contextos industriais.

Os modelos foram organizados e analisados com base em critérios como:

- i. Tipo de modelo (conceitual, empírico, integrador, avaliativo),
- ii. Abordagem metodológica (quantitativa, qualitativa, mista),
- iii. Dimensões abordadas (ambiental, social, econômica, digital, operacional, institucional),
- iv. Variáveis-chave (tecnologias 4.0, práticas lean, economia circular, desempenho organizacional, maturidade digital, inovação, entre outras).

Foram identificadas tendências comuns nos modelos analisados:

- a. A integração entre Indústria 4.0 e economia circular como principal via para a sustentabilidade.
- b. O uso crescente de modelagem fuzzy, PLS-SEM e frameworks multicritério para avaliação.
- c. Ênfase em PMEs e setores específicos (automotivo, industrial, têxtil, agroindustrial).
- d. Lacunas relacionadas à validação prática dos modelos e à medição de impactos sociais.

A distribuição dos 102 artigos analisados conforme o tipo de modelo proposto é apresentada na (Tabela 19). Os dados revelam a predominância de modelos empíricos (32

artigos), o que evidencia um esforço crescente da comunidade científica em validar conceitos de manufatura sustentável por meio de estudos de caso, levantamentos e análises estatísticas aplicadas.

Destacam-se neste grupo os estudos de Rehman (2022), Dixit (2022) e Xi (2023), que investigam a relação entre práticas sustentáveis e desempenho organizacional, especialmente em países emergentes.

Tabela 19 - Frequência dos Modelos por Tipo Proposto

Tipo de Modelo/Framework	Artigos	Autores Representativos
Modelos Conceituais	26	Jaaron (2023), Sartal (2022), Khan (2023)
Modelos Empíricos	32	Rehman (2022), Dixit (2022), Xi (2023)
Frameworks Avaliativos	18	Joshi (2021), Gani (2022), Kumar (2023)
Modelos Híbridos (quantitativo + qualitativo)	10	Acquah (2023), Khanzode (2023)
Abordagens Baseadas em Métodos Fuzzy ou SEM	11	Jena (2021), Malek (2022), Bag (2023)
Estruturas Taxonômicas ou Classificatórias	5	Joung (2013), Hariyani (2022)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Na sequência, os modelos conceituais (26 artigos) representam uma parcela significativa da produção acadêmica. Esses modelos cumprem papel fundamental na construção teórica do campo, oferecendo fundamentos estruturais, frameworks e relações entre variáveis. Autores como Jaaron (2023), Sartal (2022) e Khan (2023) exploram a integração entre sustentabilidade, tecnologias digitais e abordagens estratégicas.

Os frameworks avaliativos (18 artigos) também apresentam forte presença, indicando uma tendência à criação de instrumentos para medir o grau de implementação ou maturidade de práticas sustentáveis. Estudos como os de Joshi (2021), Gani (2022) e Kumar (2023) contribuem ao propor critérios, escalas e indicadores aplicáveis a diferentes contextos industriais.

Um número menor de artigos propõe modelos híbridos (10 artigos), que combinam abordagens qualitativas e quantitativas, proporcionando maior robustez analítica. Esses estudos, como os de Acquah (2023) e Khanzode (2023), são valiosos por integrarem análise estatística com interpretação contextual.

Destaca-se ainda a presença de abordagens baseadas em métodos fuzzy ou SEM (11 artigos), como os trabalhos de Jena (2021), Malek (2022) e Bag (2023), que demonstram

maturidade metodológica e preocupação com a modelagem precisa de relações entre variáveis latentes.

Por fim, embora menos frequentes, aparecem as estruturas taxonômicas ou classificatórias (5 artigos), com destaque para Joung (2013) e Hariyani (2022). Essas contribuições são fundamentais para padronizar terminologias, categorias e indicadores relacionados à manufatura sustentável.

Esses resultados reforçam o caráter multidimensional do campo e apontam para a coexistência de diferentes maturidades metodológicas. A diversidade tipológica também evidencia que a área continua em expansão, com espaço para o desenvolvimento de modelos mais integradores, que considerem simultaneamente fatores ambientais, sociais, econômicos e tecnológicos.

A síntese dos principais agrupamentos temáticos emergentes a partir da análise dos 102 artigos selecionados, revelando sete clusters recorrentes na literatura recente sobre modelos de implementação da manufatura sustentável é demonstrada no (Quadro 12). Cada cluster reúne estudos que compartilham enfoques conceituais e aplicacionais semelhantes, evidenciando as múltiplas vertentes pelas quais a sustentabilidade tem sido abordada na produção industrial.

Quadro 12 - Modelos por cluster temático e tipo de aplicação

Cluster Temático	Foco Central	Autores	Aplicações Típicas
1. Digitalização e Sustentabilidade	Transformação digital, Indústria 4.0, IA, IoT	Ghobakhloo (2020), Palmié (2023), Jamwal et al. (2023), Xi (2023)	Avaliação de maturidade digital e inovação sustentável
2. Modelos baseados em Indicadores e Métricas	Avaliação quantitativa de desempenho sustentável	Abedini (2021), Ganjavi (2023), Acquah (2023), Vinodh (2022)	Monitoramento de KPIs ambientais, operacionais e econômicos
3. Estratégias Lean + Economia Circular	Integração de práticas lean com sustentabilidade e CE	Lim (2022), Ciliberto (2021), Cannas (2023), Khanzode (2023)	Redesenho de processos e redução de desperdício
4. Cadeias de Suprimentos e Logística Sustentável	Sustentabilidade logística, CE e Indústria 4.0	Yadav et al. (2021), Rajput (2022), Krishnan (2022)	Gestão de cadeia de suprimentos com tecnologias digitais
5. Modelos para PMEs em Economias Emergentes	Adoção sustentável em empresas de pequeno porte	Tanco (2021), Muller (2020), Valdez-Juárez (2022), Prause (2021)	Estratégias adaptativas e análise de barreiras contextuais
6. Avaliação Institucional e Social	Pressões institucionais, aceitabilidade social, governança	Zhu (2021), Kumar et al. (2023), Lopes de Sousa Jabbour (2022)	Sustentabilidade orientada por stakeholders e políticas públicas
7. Design e Ecodesign Sustentável	Estratégias de design circular e ecoefetivo	Dahmani (2023), Rosen (2020), Kristoffersen (2023)	Desenvolvimento de produtos sustentáveis e PSS (Product-Service Systems)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O Cluster 1 – Digitalização e Sustentabilidade reúne o maior volume de estudos, com foco em tecnologias habilitadoras como IoT, inteligência artificial e big data (Ghobakhloo, 2020; Palmié, 2023). Esses modelos priorizam a transformação digital como alavanca para práticas produtivas mais sustentáveis, com ênfase na avaliação de maturidade digital, automação inteligente e rastreabilidade operacional.

O Cluster 2 – Modelos baseados em Indicadores e Métricas concentra-se na mensuração do desempenho sustentável com uso de KPIs ambientais, operacionais e econômicos. Modelos como os de Abedini (2021) e Acquah (2023) oferecem estruturas avaliativas que auxiliam gestores a monitorar e comparar o progresso rumo à sustentabilidade.

O Cluster 3 – Estratégias Lean + Economia Circular destaca-se por integrar abordagens de eficiência operacional com práticas circulares, como redução de resíduos, reaproveitamento de materiais e produção enxuta (Lim, 2022; Cannas, 2023). Essa linha de pesquisa reforça a sinergia entre produtividade e sustentabilidade.

O Cluster 4 – Cadeias de Suprimentos e Logística Sustentável enfoca a gestão sustentável da cadeia de valor, utilizando tecnologias da Indústria 4.0 para integrar logística verde, rastreabilidade e práticas colaborativas (Yadav et al., 2021; Rajput, 2022). É particularmente relevante para setores que lidam com múltiplos elos produtivos.

O Cluster 5 – Modelos para PMEs em Economias Emergentes foca na adaptação de modelos sustentáveis à realidade das MPMEs, considerando suas limitações estruturais, financeiras e tecnológicas (Tanco, 2021; Valdez-Juárez, 2022). Esse grupo destaca a necessidade de abordagens escaláveis e flexíveis para esse segmento empresarial.

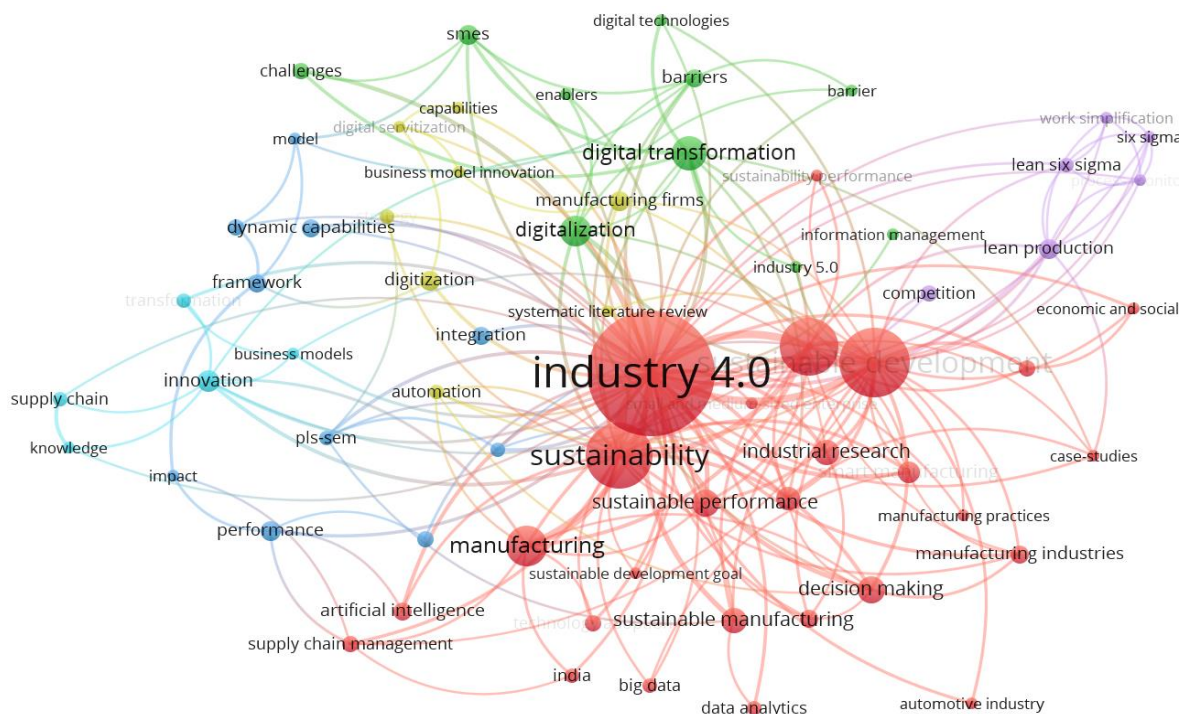
O Cluster 6 – Avaliação Institucional e Social reúne modelos que consideram pressões regulatórias, governança e aceitabilidade social, reforçando a importância de políticas públicas, regulamentações e engajamento de stakeholders (Zhu, 2021; Kumar et al., 2023). Ainda que menos frequente, essa abordagem é crítica para a consolidação de práticas sustentáveis em nível sistêmico.

Por fim, o **Cluster 7 – Design e Ecodesign Sustentável** agrupa estudos voltados à concepção de produtos circulares, modulares e sustentáveis, integrando princípios de ecodesign e sistemas produto-serviço (PSS) (Dahmani, 2023; Rosen, 2020). Tais modelos são essenciais para a sustentabilidade desde a origem do ciclo de vida do produto.

A análise de inter-relação de termos (Figura 4) revela a estrutura semântica da produção científica no campo da manufatura sustentável e digital no contexto da Indústria 4.0. O termo “industry 4.0” aparece como o nó central, demonstrando sua dominância e centralidade na literatura dos últimos anos. Essa centralidade é corroborada pela quantidade e força das

conexões com termos como sustainability, manufacturing, digital transformation e sustainable manufacturing o que indica que as discussões contemporâneas não tratam a digitalização de forma isolada, mas sim como um fator catalisador de transformações sustentáveis.

Figura 4 – Inter-relação de termos



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A presença de termos como “digital transformation”, “automation”, “integration” e “digitization” sugere uma forte ênfase em tecnologias disruptivas e processos de transformação digital dentro da manufatura. Esse foco se alinha com tendências globais de transição para fábricas inteligentes (smart factories), que integram sensores, dados em tempo real, machine learning e IoT para alcançar maior eficiência e menor impacto ambiental.

A formação de clusters distintos mostra a diversificação temática da literatura, conforme disposto a seguir:

O **cluster vermelho** integra conceitos fundamentais como industry 4.0, sustainability e decision making, revelando que as discussões principais orbitam em torno da integração entre inovação tecnológica e sustentabilidade organizacional, reforçando a ideia de que tecnologias 4.0 não são um fim, mas um meio para a sustentabilidade estratégica.

O **cluster verde**, com foco em barriers enablers em MPMEs, revela uma preocupação com a viabilidade de implementação dessas tecnologias em realidades mais frágeis, como as de MPMEs especialmente nas economias emergentes. Este ponto é ratificado por estudos como os

de Kamble et al. (2020), que destacam a falta de infraestrutura e capacitação como grandes entraves.

Já o **cluster azul claro** se aproxima de uma abordagem mais analítica e prescritiva, ao abordar termos como framework, PLS-SEM e dynamic capabilities. Isso indica a presença de uma produção acadêmica voltada ao desenvolvimento de modelos teóricos e ferramentas quantitativas para medir a performance ou avaliar a maturidade digital.

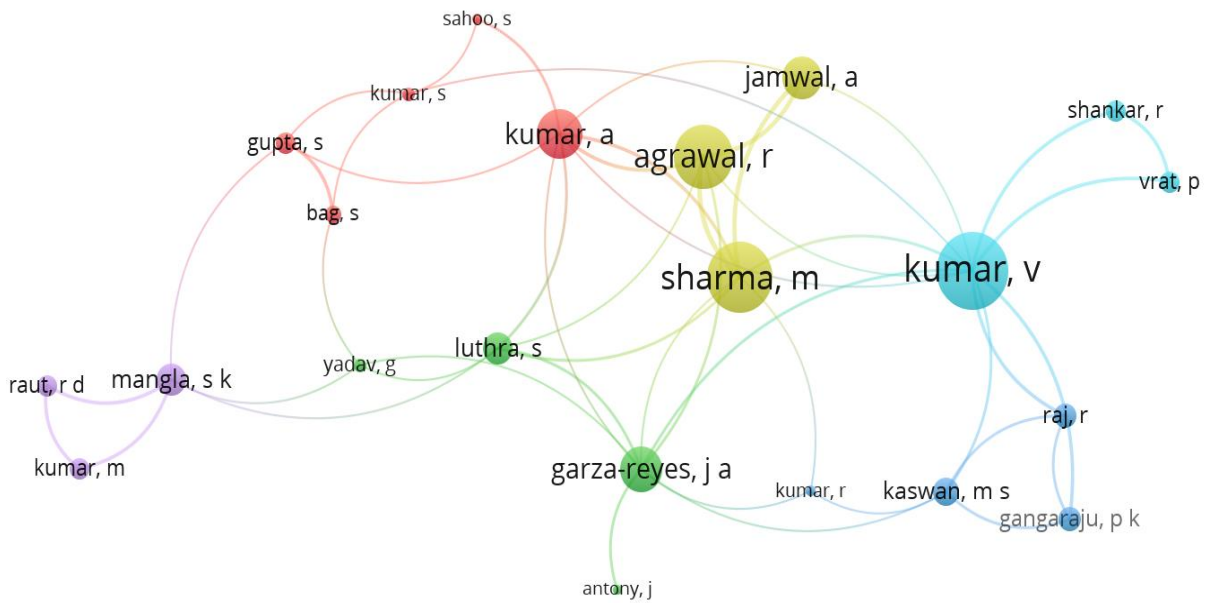
O **cluster lilás**, que conecta lean production, six sigma e economic and social effects, demonstra uma intersecção entre abordagens tradicionais de excelência operacional e os novos paradigmas sustentáveis. Isso revela uma tentativa de compatibilizar métodos consolidados com os objetivos contemporâneos de sustentabilidade e inovação.

A análise revela uma literatura dinâmica, em consolidação e com forte interdisciplinaridade, centrada na relação entre tecnologias 4.0, sustentabilidade e manufatura. A complexidade dos temas emergentes como barreiras institucionais, desempenho organizacional, lean sustentável, tecnologias digitais e cadeia de suprimentos aponta para a necessidade de modelos integrativos, capazes de lidar com múltiplas dimensões simultaneamente.

Essa taxonomia temática permite compreender a diversidade de enfoques que vêm sendo utilizados para promover a manufatura sustentável, oferecendo uma base analítica útil tanto para pesquisadores quanto para gestores interessados em identificar o modelo mais adequado a seu contexto de aplicação.

A análise de coautoria (Figura 5) permite visualizar como os pesquisadores estão organizados em comunidades acadêmicas, destacando os principais polos de produção científica colaborativa. O autor Kumar, V aparece como o nó mais central da rede, o que sugere sua posição como pesquisador influente e integrador, conectando diferentes subáreas e contribuindo significativamente para a construção teórica sobre Indústria 4.0 e sustentabilidade.

Figura 5 - Rede de Coautoria (Conexão entre Autores)



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A rede mostra seis clusters de autores, o que indica grupos de pesquisa bem definidos com temáticas específicas, mas com certo grau de conexão entre si. Por exemplo:

O grupo de Kumar, V, Kaswan, M. S. e Shankar, R. atua fortemente na interface entre tecnologia digital e sustentabilidade organizacional, com produções voltadas para modelos de maturidade, frameworks e estratégias para implementação de tecnologias em PMEs.

O cluster de Garza-Reyes, J. A. e Luthra, S. aparece como uma força no campo da sustentabilidade em operações e cadeias de suprimentos, apresentando estudos aplicados em 7 países emergentes como Índia e México — o que reflete uma preocupação com adaptações contextuais dos modelos globais.

Autores como Sharma, M. e Agrawal, R. também formam um núcleo ativo, cujo foco parece estar mais orientado ao desenvolvimento de modelos conceituais e análises empíricas usando PLS-SEM, especialmente em estudos sobre transformação digital e performance sustentável.

Os clusters e redes de autores demonstram que há núcleos ativos de pesquisa, com diferentes abordagens, desde estudos teóricos e frameworks até aplicações empíricas em PMEs e contextos industriais reais, evidenciando que a literatura tem se estruturado em núcleos especializados com interconexões, refletindo uma maturidade crescente do campo, onde há tanto integração interdisciplinar quanto segmentação temática.

A frequência de incorporação das diferentes dimensões nos modelos de manufatura sustentável analisados é apresentada na (Tabela 20). Os dados evidenciam uma forte

predominância da dimensão tecnológica, presente em 84 artigos, refletindo o papel central das tecnologias digitais no avanço da sustentabilidade industrial. Estudos como os de Ghobakhloo (2020) e Palmié (2023) mostram como a digitalização, automação e sistemas ciberfísicos são tratados como pilares da manufatura inteligente e sustentável.

Tabela 20 - Frequência de Dimensões dos modelos de manufatura sustentável

Dimensão Considerada	Nº de Artigos	Autores Representativos
Tecnológica	84	Ghobakhloo (2020), Palmié (2023)
Ambiental	67	Lim (2022), Rehman (2022)
Organizacional	60	Muller (2021), Ludbrook (2022)
Econômica	37	Ganjavi (2023), Rahman (2023)
Social	18	Kumar (2023), Lopes de Sousa Jabbour (2022)
Institucional/Política	14	Zhu (2021), Moktadir (2021)
Logística	12	Yadav (2021), Rajput (2022)
Cultural/Comportamental	9	Prause (2021), Hossain (2023)
Design	5	Dahmani (2023), Rosen (2020)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Em segundo lugar, a dimensão ambiental aparece em 67 artigos, consolidando-se como um dos fundamentos da manufatura sustentável. Trabalhos como os de Lim (2022) e Rehman (2022) destacam práticas voltadas à redução de emissões, uso eficiente de recursos e gestão de resíduos. A dimensão organizacional também se destaca (60 artigos), evidenciando a relevância da cultura interna, gestão da mudança, competências e governança, conforme abordado por Muller (2021) e Ludbrook (2022).

A dimensão econômica, presente em 38 artigos, é tratada como aspecto estratégico para viabilidade e competitividade, com enfoque em custos, retorno sobre investimento e valor percebido (Ganjavi, 2023; Rahman, 2023). Já as dimensões sociais (18 artigos) e institucional/política (14 artigos) são menos recorrentes, ainda que essenciais. Estudos como os de Kumar (2023) e Zhu (2021) apontam questões como bem-estar do trabalhador, aceitabilidade social e impacto de regulamentações e políticas públicas.

Outras dimensões importantes, porém, menos exploradas, incluem a logística (12 artigos), voltada à cadeia de suprimentos verde e logística reversa (Yadav, 2021; Rajput, 2022), e a cultural/comportamental (9 artigos), que aborda resistências internas, mentalidade organizacional e barreiras à inovação (Prause, 2021; Hossain, 2023). Por fim, a dimensão do

design foi observada em apenas 5 artigos, apesar de seu papel fundamental na promoção do ecodesign e de produtos sustentáveis (Dahmani, 2023; Rosen, 2020).

Esses resultados indicam a necessidade de ampliação dos estudos sobre aspectos sociais, culturais e institucionais da manufatura sustentável, os quais permanecem subexplorados em comparação às dimensões tecnológica e ambiental. Isso reforça o potencial de futuras pesquisas voltadas à construção de modelos mais integradores, inclusivos e aderentes à realidade das MPMEs.

Resultados da revisão da literatura

A análise da literatura realizada neste capítulo evidenciou que a manufatura sustentável evoluiu de abordagens predominantemente reativas e ambientalmente orientadas para modelos sistêmicos, estratégicos e integrados, especialmente a partir da incorporação das tecnologias da Indústria 4.0. Essa trajetória demonstra uma convergência crescente entre sustentabilidade, digitalização e desempenho organizacional, consolidando o conceito de Manufatura Sustentável 4.0 como um novo paradigma produtivo.

Os estudos analisados indicam que, embora existam diversos modelos e frameworks voltados à integração entre sustentabilidade, economia circular e tecnologias digitais, ainda persistem lacunas relevantes, especialmente no que se refere à validação empírica estruturada, à mensuração integrada multidimensional e à adequação desses modelos ao contexto específico das MPMEs.

Conforme detalhado no Apêndice I, muitos modelos apresentam limitações como elevada complexidade metodológica, baixa generalização ou ausência de instrumentos quantitativos robustos que permitam sua aplicação prática.

Perspectivas para manufatura sustentável em MPMEs

A proposição apresentada neste estudo fundamenta-se na integração sistemática de evidências teóricas e empíricas identificadas na literatura especializada. Conforme evidenciado na revisão da literatura conduzida, diferentes modelos e frameworks têm buscado estruturar a incorporação da sustentabilidade nos sistemas produtivos, articulando dimensões organizacionais, tecnológicas, econômicas, operacionais e ambientais. No entanto, tais abordagens, embora relevantes, tendem a apresentar limitações quanto à integração multidimensional, à validação empírica estruturada e à aplicabilidade em contextos específicos, como o das MPMEs.

Nesse sentido, a proposta de direcionamento neste estudo não emerge como uma construção isolada, mas como resultado de um processo de consolidação e síntese teórico-

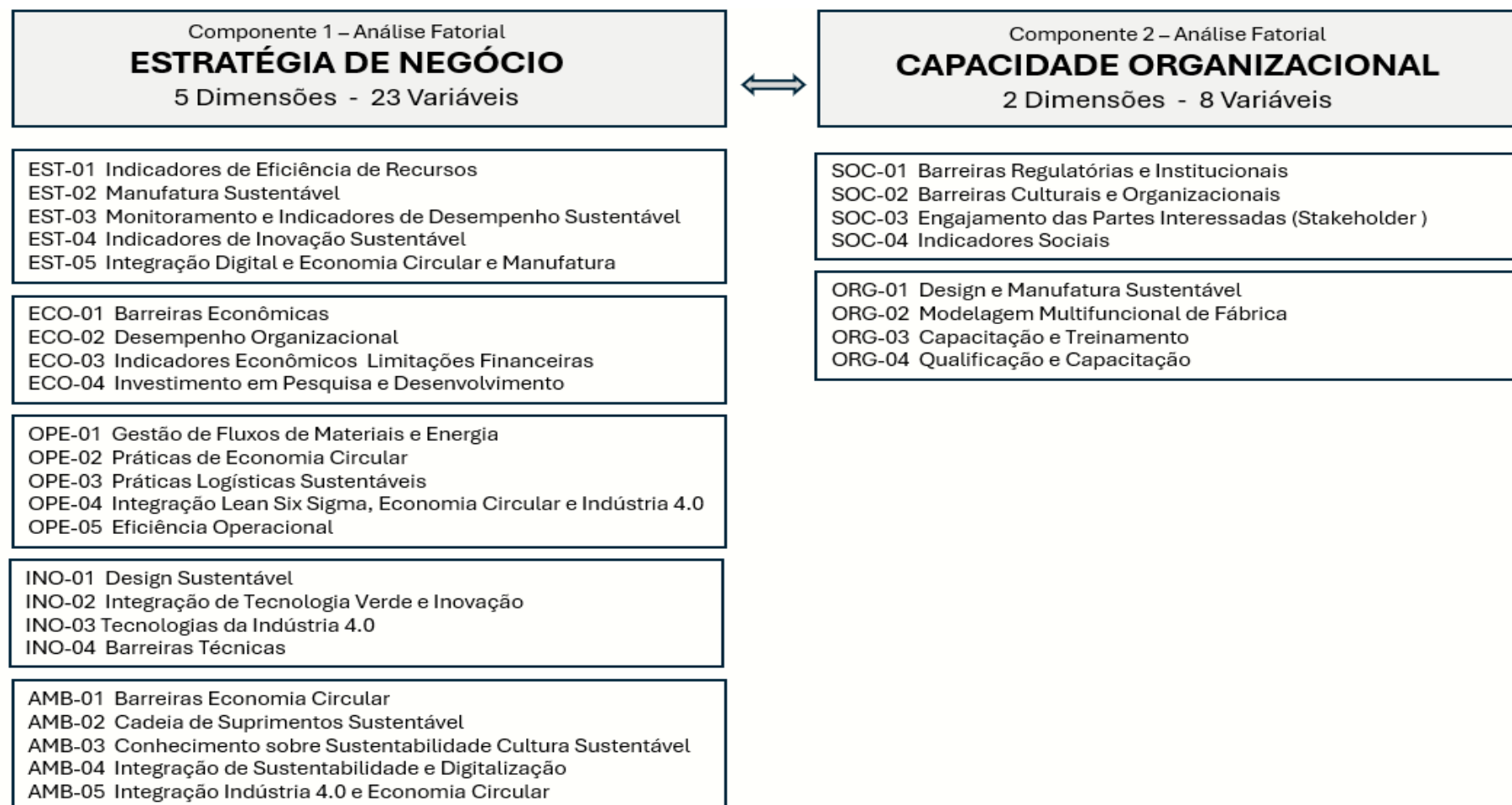
empírica, no qual as dimensões e variáveis que o compõem foram derivadas de contribuições recorrentes na literatura científica, conforme sistematizado na tabela de fundamentação dos modelos analisados Apêndice V. Essa abordagem permite assegurar aderência conceitual ao estado da arte do campo, ao mesmo tempo em que busca avançar na superação das lacunas identificadas.

A estrutura proposta organiza-se em sete dimensões: Organizacional, Recursos humanos, Estratégica, Econômica, Operacional, Inovação tecnológica e Ambiental, operacionalizadas por meio de um conjunto de variáveis que refletem práticas, capacidades e condicionantes associados à manufatura sustentável. Essas dimensões não devem ser compreendidas de forma isolada, mas como elementos interdependentes de um sistema organizacional, cuja interação contribui para a formação da proposição preliminar de diretrizes para futura construção de índice.

A proposição apresentada na Figura 6 apoia-se na premissa de que a adoção da manufatura sustentável ocorre de forma multidimensional e contingencial, sendo influenciada por fatores internos e externos às organizações. Ao incorporar variáveis oriundas de diferentes correntes teóricas detalhadas no Apêndice V, o modelo busca oferecer uma estrutura analítica capaz de capturar a complexidade do fenômeno, ao mesmo tempo em que possibilita sua operacionalização por meio de métricas mensuráveis.

Dessa forma, as perspectivas apresentadas no (Quadro 13) pretende contribuir tanto para o avanço teórico da área, ao integrar diferentes perspectivas em uma estrutura coerente, quanto para a prática organizacional, ao disponibilizar um instrumento que permita diagnosticar, comparar e orientar a adoção de práticas de manufatura sustentável 4.0 em MPMEs.

Quadro 13- Perspectivas para manufatura sustentável em MPMEs



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Dimensão organizacional

É a dimensão que se concentra na estrutura interna das empresas, na gestão de pessoas, na cultura organizacional e nos processos de governança, conforme variáveis no (Quadro 14). Variáveis como capacitação e treinamento, desempenho organizacional e modelagem multifuncional indicam que a implementação da manufatura sustentável exige não apenas recursos técnicos, mas também alinhamento interno, flexibilidade estrutural e desenvolvimento contínuo das equipes.

Quadro 14 - Variáveis da dimensão organizacional

Variável	Descrição da Variável	Referencial Teórico
ORG-01 - Design e Manufatura Sustentável	Avalia a integração dos princípios de sustentabilidade desde o projeto até a produção, considerando materiais, processos produtivos e design para economia circular e redução de impactos.	Cannas, V. G (2021); Khanzode, A. G. (2021); Rosen, M. A. (2019); Sartal, A (2020); Sajadieh, S. M. M (2022).
ORG-02 - Modelagem Multifuncional de Fábrica	Reflete a capacidade da empresa em adotar modelos organizacionais flexíveis e colaborativos, integrando diferentes setores (produção, sustentabilidade, TI, logística) para suportar práticas sustentáveis	Despeisse, M. (2020); Khanzode, A. G. (2021); Sajadieh, S. M. M (2022).
ORG-03 - Capacitação e Treinamento	Mede os esforços da organização em promover capacitação dos colaboradores em temas relacionados à sustentabilidade, economia circular, tecnologias emergentes e práticas operacionais sustentáveis.	Malek, J. (2021-22-23); Tanco, M. (2021); Valdez-Juárez, L. E. (2022).
ORG-04 - Qualificação e Capacitação	Avalia se os profissionais possuem as competências técnicas e comportamentais necessárias para implementar processos sustentáveis, tecnologias 4.0 e práticas de economia circular na organização.	Prause, Martin (2021); Tanco, M. (2021); Malek, J. (2021-22-23); Bhanot, Neeraj (2019-20).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Desafios como barreiras culturais e resistências organizacionais demonstram a necessidade de transformação do mindset corporativo, promovendo novos valores alinhados à sustentabilidade em estreita conexão com as dimensões social e estratégica. Além disso, a recorrência de variáveis originalmente ligadas aos campos ambiental e operacional, como design sustentável, logística verde e cadeia de suprimentos sustentável, evidencia que a dimensão organizacional atua como elemento integrador, articulando estratégia, inovação e execução dentro de um mesmo sistema.

Dimensão recursos humanos

Dimensão que também abrange aspectos de cultura organizacional, políticas públicas e institucionalidade, destaca-se como um eixo fundamental para a efetividade da manufatura sustentável, conforme (Quadro 15). Variáveis como engajamento dos stakeholders, indicadores sociais e incentivos governamentais demonstram que a sustentabilidade vai além dos limites internos da empresa, exigindo legitimidade social, participação comunitária e apoio regulatório para alcançar seus objetivos de forma ampla e duradoura.

Quadro 15 - Variáveis da dimensão recursos humanos

Variável	Descrição da Variável	Referencial Teórico
SOC-01 - Barreiras Regulatórias e Institucionais	Identifica entraves legais, burocráticos ou institucionais que dificultam a adoção de práticas de manufatura sustentável, como falta de incentivos, regulamentações rígidas ou ausência de políticas públicas.	Bhanot, Neeraj (2019-20); Malek, J. (2021-22-23); Bai, C (2020); Sartal, A (2020).
SOC-02 - Barreiras Culturais e Organizacionais	Reflete as resistências internas, culturais ou comportamentais que impedem a adoção da manufatura sustentável, como falta de engajamento, mentalidade conservadora ou baixa priorização da sustentabilidade,	Bag, S. (2021-22); Bhanot, Neeraj (2019-20); Khanzode, A. G. (2021).
SOC-03 - Engajamento das Partes Interessadas (Stakeholders)	Mede o grau de participação e envolvimento de stakeholders como clientes, fornecedores, colaboradores, comunidades e governo na implementação e desenvolvimento de práticas sustentáveis na organização.	Lopes de Sousa Jabbour, A. B. (2021); Malek, J. (2021-22-23); Rahman, A. U. (2022); Bag, S. (2021-22); Gupta, H (2021); Joung, Che B. (2013); Rajput, S. (2021).
SOC-04 - Indicadores Sociais	Avalia os indicadores sociais adotados pela empresa, incluindo bem-estar dos colaboradores, diversidade, inclusão, condições de trabalho, segurança, desenvolvimento comunitário e responsabilidade social corporativa.	Gupta, H (2021); Joung, Che B. (2013); Sartal, A (2020); Acquah, I. S. K. (2022); Chourasiya, R (2021); Lopes de Sousa Jabbour, A. B. (2021); Malek, J. (2021-22-23).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Além disso, fatores como capacitação, treinamento e disseminação do conhecimento sobre sustentabilidade são decisivos para preparar a força de trabalho frente às exigências da Indústria 4.0 e à adoção de práticas sustentáveis. Apesar de muitas vezes subvalorizada em abordagens técnico-operacionais, essa dimensão revela-se estratégica em contextos de economias emergentes, onde a cultura institucional, o comprometimento social e o desenvolvimento humano são tanto obstáculos quanto alavancas para a transformação sustentável.

Dimensão estratégica

A dimensão estratégica, assume papel central na consolidação da manufatura sustentável 4.0, ao direcionar esforços para o planejamento de longo prazo, a inovação contínua e a vantagem competitiva, sempre em sintonia com os objetivos organizacionais. Essa dimensão e suas variáveis, (Quadro 16), estabelece conexões relevantes com as esferas tecnológica e ambiental, refletidas em variáveis como integração digital, economia circular aplicada à manufatura, design sustentável e uso intensivo das tecnologias da Indústria 4.0.

Quadro 16 - Variáveis da dimensão estratégica

Variável	Descrição da Variável	Referencial Teórico
EST-01 - Indicadores de Eficiência de Recursos	Mede como a empresa acompanha a utilização eficiente de recursos naturais, como água, energia e materiais, além de avaliar os ganhos ambientais e econômicos resultantes dessa gestão eficiente.	Acquah, I. S. K. (2022); Gupta, H (2021); Joung, Che B. (2013); Bag, S. (2021-22); Huang, C.-H. (2022); Lim, Ming K. (2021); Rosen, M. A. (2019).
EST-02 - Manufatura Sustentável	Reflete o grau de integração da sustentabilidade no modelo produtivo, incluindo práticas de redução de resíduos, uso eficiente de recursos, circularidade e desenvolvimento de produtos mais sustentáveis.	Bhanot, Neeraj (2019-20); Cannas, V. G (2021); Chourasiya, R (2021); Del Giudice, M. (2022); Khanzode, A. G. (2021); Lim, Ming K. (2021); Malek, J. (2021-22-23); Rosen, M. A. (2019); Sartal, A (2020); Skalli, D. (2022).
EST-03 - Monitoramento e Indicadores de Desempenho Sustentável	Avalia a existência de sistemas para monitoramento contínuo de indicadores ambientais, sociais e econômicos, garantindo que as metas de sustentabilidade estejam alinhadas com os objetivos organizacionais.	Khanzode, A. G. (2021); Gaddekar, R (2021); Malek, J. (2021-22-23); Rajput, S. (2021); Xu, J. (2022).
EST-04 - Indicadores de Inovação Sustentável	Representa as métricas adotadas para avaliar os esforços da empresa em inovação voltada à sustentabilidade, considerando novos processos, tecnologias, modelos de negócio e produtos sustentáveis	Huang, C.-H. (2022); Joung, Che B. (2013); Xu, J. (2022); Bag, S. (2021-22); Joung, Che B. (2013); Lim, Ming K. (2021); Malek, J. (2021-22-23).
EST-05 - Integração Digital, Economia Circular e Manufatura	Avalia como a empresa consegue integrar simultaneamente práticas de manufatura sustentável, economia circular e tecnologias digitais, promovendo eficiência, rastreabilidade e redução de impactos.	Bag, S. (2021-22); Rajput, S. (2021); Khanzode, A. G. (2021); Luu, T. V (2021-23); Malek, J. (2021-22-23).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Destaca-se ainda a variável que combina Lean Six Sigma, economia circular e Indústria 4.0, representando uma abordagem integrada que alia eficiência operacional a metas ambientais, um diferencial competitivo para organizações que buscam otimização com responsabilidade. Além disso, os modelos de negócios circulares inteligentes reforçam a lógica estratégica da inovação orientada por dados e tecnologias emergentes, promovendo um posicionamento proativo diante das demandas do mercado e das pressões por sustentabilidade.

Dimensão econômica

No contexto da sustentabilidade industrial, a dimensão econômica, (Quadro 17), ganha destaque ao contemplar aspectos como a viabilidade financeira, o retorno sobre investimento e a redução de custos operacionais ao longo do tempo. Para muitas MPMEs, no entanto, barreiras econômicas e limitações financeiras dificultam a adoção de práticas sustentáveis. Como alternativas estratégicas, destacam-se o investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e os modelos de negócios circulares baseados em inovação e uso eficiente de recursos.

Quadro 17 - Variáveis da dimensão econômica

Variável	Descrição da Variável	Referencial Teórico
ECO-01 - Barreiras econômicas	Engloba os desafios financeiros que dificultam a adoção da manufatura sustentável, como altos custos iniciais, retorno demorado sobre investimentos, acesso restrito a linhas de crédito e incentivos.	Bhanot, Neeraj (2019-20); Malek, J. (2021-22-23); Niewiadomski, P. (2021); Rosen, M. A. (2019); Sartal, A (2020).
ECO-02 - Desempenho Organizacional	Mede os impactos das práticas sustentáveis no desempenho financeiro, produtivo e competitivo da organização, considerando custos operacionais, produtividade, lucratividade e posicionamento no mercado.	Harikannan, N (2021); Malek, J. (2021-22-23); Rehman, M. A. (2022); Bag, S. (2021-22); Lim, Ming K. (2021).
ECO-03 - Indicadores Econômicos e Limitações Financeiras	Avalia se a empresa possui métricas econômicas bem definidas para monitorar os impactos da sustentabilidade e se enfrenta limitações financeiras para implementação de projetos sustentáveis e tecnológicos.	Joung, Che B. (2013); Tanco, M. (2021); Khan, S. (2022); Malek, J. (2021-22-23); Rajput, S. (2021).
ECO-04 - Investimento em Pesquisa e Desenvolvimento	Analisa o nível de investimento da empresa em inovação, desenvolvimento de produtos e processos sustentáveis, bem como o desenvolvimento de tecnologias alinhadas aos princípios da economia circular.	Ghobakhloo, Morteza (2020); de Mattos Nascimento, D. L. (2022); Malek, J. (2021-22-23); Rehman, M. A. (2022)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Entre os elementos que reforçam essa dimensão está o desempenho organizacional, que aparece de forma transversal em outras áreas, como a estratégica e a organizacional, evidenciando sua importância para os resultados financeiros e operacionais. Além disso, ações voltadas à logística verde e à cadeia de suprimentos sustentável, embora associadas ao campo ambiental, também demonstram capacidade de gerar ganhos econômicos, ao promover eficiência e reduzir desperdícios em toda a cadeia produtiva.

Dimensão operacional

Essa dimensão representa a concretização das estratégias sustentáveis no ambiente produtivo, com foco na eficiência, integração de processos e gestão direta do chão de fábrica, conforme variáveis apresentadas no (Quadro 18). É nessa esfera que as diretrizes das demais dimensões ganham forma prática, por meio de variáveis como eficiência operacional, modelagem multifuncional da fábrica e gestão dos fluxos de materiais — elementos essenciais para a aplicação efetiva dos princípios da manufatura sustentável.

Quadro 18 - Variáveis da dimensão operacional

Variável	Descrição da Variável	Referencial Teórico
OPE-01 - Gestão de Fluxos de Materiais e Energia	Capacidade da empresa em monitorar, controlar e otimizar os fluxos de materiais, energia e resíduos ao longo de toda a cadeia produtiva. Envolve a utilização de sistemas e práticas operacionais voltados à redução do consumo de energia, materiais e insumos, bem como à diminuição de desperdícios, buscando eficiência operacional, econômica e ambiental,	Chourasiya, R (2021); Ciliberto, C (2022); Jamwal, A. (2021-22-23); Schnellbach, P. (2022); Cannas, V. G (2021); Ghobakhloo, Morteza (2020); Lim, Ming K. (2021); Malek, J. (2021-22-23).
OPE-02 - Práticas de Economia Circular	Refere-se à aplicação prática de estratégias circulares como reciclagem, reuso, remanufatura, design modular e extensão da vida útil dos produtos dentro dos processos operacionais,	Cannas, V. G (2021); Khanzode, A. G. (2021); Lim, Ming K. (2021); Luu, T. V (2021-23); Skalli, D. (2022); Ghobakhloo, Morteza (2020); Lim, Ming K. (2021); Luu, T. V (2021-23); Malek, J. (2021-22-23).
OPE-03 - Práticas Logísticas Sustentáveis	Avalia a adoção de práticas logísticas sustentáveis, como rotas otimizadas, uso de transporte de baixo impacto, embalagens ecológicas e logística reversa para reaproveitamento de materiais e produtos,	Bag, S. (2021-22); Luu, T. V (2021-23); Rajput, S. (2021); Joung, Che B. (2013); Lim, Ming K. (2021); Malek, J. (2021-22-23); Skalli, D. (2022).
OPE-04 - Integração Lean Six Sigma, Economia Circular e Indústria 4.0	Mede a capacidade da empresa em combinar ferramentas de melhoria contínua (Lean, Six Sigma) com princípios da economia circular e tecnologias da Indústria 4.0 para aumentar a eficiência e sustentabilidade,	Cannas, V. G (2021); Ghobakhloo, Morteza (2020); Skalli, D. (2022); Jamwal, A. (2021-22-23); Joung, Che B. (2013); Malek, J. (2021-22-23); Tanco, M. (2021)
OPE-05 - Eficiência Operacional	Reflete o nível de eficiência dos processos operacionais, considerando não apenas produtividade e custos, mas também redução de desperdícios, impacto ambiental e geração de valor sustentável.	Lim, Ming K. (2021); Skalli, D. (2022); Bag, S. (2021-22); Luu, T. V (2021-23); Malek, J. (2021-22-23).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Além disso, fatores externos como parcerias ao longo da cadeia de suprimentos e o apoio de políticas públicas demonstram que a operação industrial não ocorre de maneira isolada, dependendo da cooperação entre atores e do estímulo institucional. A recorrência de variáveis como manufatura sustentável e integração entre Lean Six Sigma, economia circular e Indústria 4.0 evidencia o papel técnico dessas abordagens, aplicadas diretamente aos processos produtivos, reforçando sua relevância para a otimização operacional com responsabilidade socioambiental.

Dimensão inovação tecnológica

Concentra-se na adoção de tecnologias habilitadoras, no fortalecimento da pesquisa e desenvolvimento (P&D) e na transformação digital da indústria tradicional. Elementos como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, big data e outras tecnologias da Indústria 4.0 atuam como pilares centrais, conectando-se a variáveis essenciais como a integração entre sustentabilidade e digitalização, bem como à própria manufatura sustentável.

Entretanto, essa dimensão, com suas variáveis descritas no (Quadro 19), também revela obstáculos práticos, como barreiras técnicas relacionadas à obsolescência de equipamentos, à ausência de interoperabilidade entre sistemas e à escassez de qualificação tecnológica. Tais desafios demonstram forte ligação com as dimensões organizacional e social, evidenciando a necessidade de uma abordagem integrada.

Além disso, o uso de indicadores de inovação sustentável se mostra fundamental para converter os avanços tecnológicos em vantagens competitivas, frequentemente associados a iniciativas de P&D e à melhoria do desempenho organizacional.

Quadro 19 - Variáveis da dimensão inovação tecnológica

Variável	Descrição da Variável	Referencial Teórico
INO-01 - Design Sustentável	Refere-se ao desenvolvimento de produtos considerando todo seu ciclo de vida, desde a escolha de materiais até a possibilidade de reciclagem, remanufatura e redução do impacto ambiental.	de Mattos Nascimento, D. L. (2022); Despeisse, M. (2020); Rosen, M. A. (2019); Cannas, V. G (2021); Ghobakhloo, Morteza (2020); Luu, T. V (2021-23).
INO-02 - Integração de Tecnologia Verde e Inovação	Mede a adoção de tecnologias limpas e de baixo impacto ambiental, além de avaliar como essas tecnologias estão integradas à inovação para gerar valor sustentável à empresa.	Ghobakhloo, Morteza (2020); Luu, T. V (2021-23); Malek, J. (2021-22-23); Skalli, D. (2022).
INO-03 - Tecnologias da Indústria 4.0	Avalia o nível de adoção de tecnologias como IoT, inteligência artificial, blockchain, manufatura aditiva e digital twin para promover automação, eficiência e sustentabilidade nos processos, Compreende os desafios tecnológicos e operacionais que dificultam a implementação da manufatura sustentável, como obsolescência de equipamentos, falta de infraestrutura tecnológica ou suporte técnico insuficiente.	Cannas, V. G (2021); Ghobakhloo, Morteza (2020); Khan, S. (2022); Luu, T. V (2021-23); Skalli, D. (2022); Bai, C (2020); Malek, J. (2021-22-23); Skalli, D. (2022)
INO-04 - Barreiras Técnicas		Bai, C (2020); Khanzode, A. G. (2021); Niewiadomski, P. (2021); Skalli, D. (2022); Tanco, M. (2021)

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Dimensão ambiental

A dimensão ambiental composta pelas variáveis demonstradas e descritas no (Quadro 20) foca na mitigação dos impactos ecológicos, na otimização do uso de recursos e na adoção de práticas sustentáveis ao longo das operações industriais. Um núcleo essencial dessa dimensão é formado por variáveis como gestão dos fluxos de materiais e energia, indicadores de eficiência de recursos e monitoramento contínuo do desempenho sustentável, que viabilizam a mensuração precisa dos impactos ambientais

Quadro 20 - Variáveis da dimensão ambiental

Variável	Descrição da Variável	Referencial Teórico
AMB-01 - Barreiras Economia Circular	Refere-se aos desafios enfrentados na adoção de práticas de economia circular, incluindo limitações tecnológicas, culturais, financeiras e regulatórias, além da dificuldade de integração com fornecedores e clientes.	Bag, S. (2021-22); Gaddekar, R (2021); Jamwal, A. (2021-22-23); Moktadir, Md Abdul (2020); Ghobakhloo, Morteza (2020); Moktadir.
AMB-02 - Cadeia de Suprimentos Sustentável	Avalia o grau de sustentabilidade na gestão da cadeia de suprimentos, considerando práticas de fornecedores, critérios socioambientais na seleção e colaboração para redução de impactos ambientais e sociais.	Cannas, V. G (2021); Jamwal, A. (2021-22-23); Khanzode, A. G. (2021); Luu, T. V (2021-23); Malek, J. (2021-22-23); Sartal, A (2020).
AMB-03 - Conhecimento sobre Sustentabilidade e Cultura Sustentável	Mede o nível de conhecimento, sensibilização e engajamento dos colaboradores e líderes em relação à sustentabilidade, incluindo práticas internas, valores organizacionais e desenvolvimento de cultura sustentável.	Joung, Che B. (2013); Khan, S. (2022); Jamwal, A. (2021-22-23); Khanzode, A. G. (2021); Luu, T. V (2021-23); Niewiadomski, P. (2021).
AMB-04 - Integração de Sustentabilidade e Digitalização	Representa o uso de tecnologias digitais (IoT, Big Data, Blockchain) para melhorar práticas sustentáveis, como rastreabilidade de resíduos, otimização de recursos e monitoramento de indicadores ambientais.	Bag, S. (2021-22); Sartal, A (2020); Tanco, M. (2021); Ghobakhloo, Morteza (2020); Luu, T. V (2021-23); Skalli, D. (2022).
AMB-05 - Integração Indústria 4.0 e Economia Circular	Avalia como a organização integra tecnologias da Indústria 4.0 para implementar princípios de economia circular, como remanufatura, reciclagem, reutilização e gestão inteligente de resíduos.	Acquah, I. S. K. (2022); Gaddekar, R (2021); Jamwal, A. (2021-22-23); Schnellbach, P. (2022); Luu, T. V (2021-23); Rajput, S. (2021).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Além disso, práticas como logística sustentável e uma cadeia de suprimentos orientada à sustentabilidade ampliam a visão sistêmica da gestão ambiental, promovendo a integração entre processos internos e externos. Essa dimensão reconhece que a competitividade industrial, sobretudo no contexto das MPMEs, está intrinsecamente ligada à capacidade de mitigar

impactos ambientais, integrar tecnologias digitais e promover práticas regenerativas e de baixo carbono.

A dimensão ambiental transcende práticas isoladas, ao buscar uma visão sistêmica e interconectada da gestão sustentável. A logística verde e a cadeia de suprimentos sustentável ampliam a capacidade de articulação entre processos internos e externos, fortalecendo redes colaborativas entre empresas, governos e sociedade civil.

A articulação entre Indústria 4.0 e economia circular, apoiada pelo uso de tecnologias verdes e digitais, evidencia a necessidade de interoperabilidade entre sistemas e setores, garantindo que a sustentabilidade não seja tratada como função periférica, mas como estratégia central do negócio. Assim, reforça-se a ideia de que a sustentabilidade depende diretamente da conexão entre inovação tecnológica, responsabilidade ambiental e engajamento humano.

Proposição preliminar de diretrizes para futura construção de índice

A análise da manufatura sustentável no contexto das MPMEs demanda mecanismos de mensuração capazes de contribuir para a compreensão do grau de adoção de práticas sustentáveis e de sua integração aos processos organizacionais. Nesse contexto, a proposição de um índice de adoção de manufatura sustentável apresenta-se como uma alternativa teórico-analítica voltada à sistematização e operacionalização de dimensões observáveis relacionadas à sustentabilidade industrial.

Sob essa perspectiva, a mensuração não se limita a uma etapa operacional, mas constitui um elemento de suporte à análise empírica, permitindo traduzir construtos conceituais em indicadores passíveis de observação, comparação e acompanhamento. Conforme argumentam Ackoff e Sasieni (1971), modelos simbólicos ampliam sua utilidade científica quando associados a instrumentos quantitativos capazes de apoiar a interpretação e o monitoramento de fenômenos organizacionais.

Assim, a proposição de um índice busca contribuir como referência conceitual inicial para futuras aplicações, aperfeiçoamentos metodológicos e desenvolvimento de modelos dedicados às especificidades das micro, pequenas e médias empresas. Essa perspectiva reforça a necessidade de que modelos teóricos sejam acompanhados de mecanismos de mensuração que assegurem sua aplicabilidade prática.

Complementarmente, Robert Dubin (1978) e Samuel Bacharach (1989) argumentam que a validade de um modelo científico está diretamente associada à sua capacidade de ser empiricamente testado e mensurado. Dessa forma, a testabilidade e a mensurabilidade deixam

de ser atributos secundários e passam a constituir critérios fundamentais de rigor científico, especialmente em estudos aplicados ao contexto organizacional.

Na literatura contemporânea, observa-se um movimento crescente no sentido de integrar sustentabilidade e Indústria 4.0 por meio de frameworks de maturidade aplicados às MPMEs. Estudos como os de Surajit Bag (2021) e Mehdi Ghobakhloo (2020) evidenciam que a adoção de métricas objetivas é essencial não apenas para avaliar a implementação de tecnologias, mas também para mensurar seus impactos econômicos, sociais e ambientais. Tais abordagens reforçam a necessidade de instrumentos capazes de capturar a natureza multidimensional da manufatura Sustentável, especialmente em contextos caracterizados por restrições de recursos e heterogeneidade estrutural, como o das MPMEs.

Nesse contexto, propõe-se o Índice de Adoção de Manufatura Sustentável como um indicador composto e multidimensional, concebido como instrumento diagnóstico e analítico. A integração das dimensões associadas à sustentabilidade e à Indústria 4.0, permite mensurar o nível de maturidade sustentável-digital das MPMEs de forma estruturada e comparável.

Sua construção estaria fundamentada na necessidade de alinhar rigor teórico e aplicabilidade prática, possibilitando que organizações avaliem seu estágio atual, monitorem sua evolução ao longo do tempo e orientem a tomada de decisão com base em evidências empíricas sendo baseada em dois princípios fundamentais:

I. Analiticidade, ao consolidar variáveis em dimensões a analiticidade refere-se à organização das variáveis em dimensões temáticas. No Índice de Adoção de Manufatura Sustentável sete dimensões compõem a estrutura analítica (Organizacional, Recursos Humanos, Estratégica, Econômica, Operacional, Inovação Tecnológica e Ambiental). Esse agrupamento traduz tanto fundamentos teóricos (Stakeholder, Contingência, Redes e Sistemas) quanto evidências empíricas que podem ser validadas via análise fatorial exploratória (AFE). Esse processo permite comparar dimensões, destacar áreas fortes e frágeis e orientar decisões estratégicas.

Exemplo: uma empresa pode se destacar na dimensão Operacional (gestão de resíduos), mas ser frágil na dimensão Estratégica (ausência de metas formais), revelando prioridades de intervenção.

II. Sinteticidade, ao gerar um índice único comparável entre empresas, setores e ciclos temporais a sinteticidade consiste em consolidar todas as informações em um índice global único, em escala 0–10. Esse valor sintetiza a maturidade sustentável-digital, permitindo comparações temporais (evolução de uma mesma empresa) e setoriais (benchmarking entre diferentes empresas ou setores). Segundo Dubin (1978), a síntese de constructos complexos em

indicadores simples é essencial para a aplicabilidade de modelos teóricos. Assim, a estrutura analítica da manufatura sustentável se torna inteligível para gestores, formuladores de políticas e pesquisadores.

Exemplo: ao aplicar o Índice de Adoção de Manufatura Sustentável em empresas fabricantes de embalagens de papelão, uma organização pode alcançar 4,2 (Emergente) e outra 7,1 (Intermediário), gerando parâmetros objetivos para análises e decisões de investimentos, correções, ajustes e mudanças.

Em conjunto, a analiticidade e sinteticidade configuram a lógica do Índice de Adoção de Manufatura Sustentável. A analiticidade assegura coerência estrutural e a sinteticidade oferece uma visão consolidada e comparável. Esses princípios permitem que o Índice de Adoção de Manufatura Sustentável transite da microanálise (critérios) à macroavaliação (índice global), constituindo um quadro robusto para orientar gestores e pesquisadores na evolução rumo à manufatura sustentável.

Diretrizes de mensuração e maturidade da manufatura sustentável

Para facilitar a interpretação prática e analítica dos resultados obtidos, o Índice de Adoção de Manufatura Sustentável é estruturado em quatro níveis de maturidade, definidos por faixas numéricas conforme apresentado no (Quadro 21). A classificação por intervalos transforma o resultado quantitativo do índice em enquadramento evolutivo do estágio organizacional, conferindo aplicabilidade gerencial e comparabilidade analítica à estrutura proposta.

A estruturação em níveis encontra respaldo na literatura de modelos evolutivos organizacionais, notadamente no Capability Maturity Model (PAULK et al., 1993) e nos princípios para desenvolvimento de modelos de maturidade (BECKER; KNACKSTEDT; PÖPPELBUSS, 2009). No âmbito desta tese, maturidade é compreendida como o grau de convergência entre legitimidade estratégica conforme a Teoria dos Stakeholders (Freeman, 1984) e consolidação de capacidades organizacionais à luz da Resource-Based View (Wernerfelt, 1984; Barney, 1991). Assim, os níveis de manufatura sustentável refletem não apenas intensidade de adoção tecnológica, mas o grau de alinhamento sistêmico entre estratégia, governança, processos, recursos humanos, inovação, desempenho econômico e sustentabilidade ambiental distribuído em quatro níveis:

Nível 1 – Inicial (0 a 4,0) – Tradicional

Organizações posicionadas na faixa de 0 a 4,0 apresentam baixa utilização e baixa importância percebida das práticas associadas à Manufatura Sustentável 4.0. Predominam

modelos produtivos tradicionais, com uso limitado de tecnologias digitais, ausência de integração entre processos e baixa formalização de indicadores.

Sob a perspectiva dos stakeholders, evidencia-se reduzida internalização das expectativas estratégicas relacionadas à sustentabilidade e à digitalização. Sob a RBV, há fragilidade na consolidação de recursos e capacidades estruturadas. Esse estágio apresenta convergência com a predominância de variáveis no Quadrante 3 da matriz importância–utilização, caracterizando baixa maturidade gerencial e operacional.

Nível 2 – Emergente (4,1 a 7,0) – Em Transição

Na faixa de 4,1 a 7,0, identifica-se elevada importância percebida associada à utilização ainda parcial ou moderada das práticas de manufatura sustentável. As organizações reconhecem o valor estratégico da sustentabilidade e da digitalização, porém enfrentam barreiras técnicas, financeiras ou organizacionais para sua implementação sistêmica.

Esse estágio caracteriza-se por lacuna entre legitimidade estratégica e capacidade operacional, com concentração típica de variáveis no Quadrante 2 da matriz importância–utilização. Sob a Teoria dos Stakeholders, há internalização crescente das demandas externas; sob a RBV, evidencia-se processo de construção progressiva de capacidades organizacionais. Trata-se de fase de consolidação estrutural em curso.

Nível 3 – Intermediário (7,1 a 9,0) – Consolidando

Organizações classificadas entre 7,1 e 9,0 apresentam elevada importância e utilização em parte significativa das práticas de manufatura sustentável. Observa-se integração parcial ou avançada entre tecnologias da Indústria 4.0 e práticas sustentáveis, refletindo ganhos consistentes em eficiência operacional, desempenho econômico e resultados socioambientais.

Nesse estágio, há redução das lacunas estruturais identificadas nos quadrantes anteriores, com migração progressiva das variáveis para posições de maior alinhamento. Sob a RBV, consolida-se base de capacidades organizacionais mais robustas; sob a Teoria dos Stakeholders, verifica-se maior integração estratégica das demandas ambientais, sociais e competitivas. Persistem, contudo, oportunidades de expansão sistêmica e aprofundamento da maturidade digital e sustentável.

Nível 4 – Avançado (9,1 a 10,0) – Referência

A faixa de 9,1 a 10,0 representa o estágio de maior maturidade sustentável e digital. Nesse nível, há elevada importância e elevada utilização consolidadas em todas as dimensões do modelo manufatura sustentável. As práticas encontram-se plenamente institucionalizadas, orientadas por dados e alinhadas à estratégia organizacional.

Quadro 21 - Níveis de maturidade para análise da manufatura sustentável

NÍVEIS DE MATURIDADE	CONCEITO	DESCRIÇÃO	PROPOSTAS PARA EVOLUIR O INDICADOR
Inicial 1 0 a 4,0	Tradicional	As organizações posicionadas neste nível apresentam baixa utilização e baixa importância percebida das práticas associadas à Manufatura Sustentável 4.0. Predominam modelos produtivos tradicionais, com uso limitado de tecnologias digitais, ausência de integração entre processos, baixa formalização de indicadores e ações sustentáveis pontuais, reativas ou motivadas apenas por exigências legais. As dimensões organizacional, ambiental e de inovação encontram-se pouco desenvolvidas, com forte dependência de conhecimento tácito e baixa maturidade gerencial.	Iniciar digitalização básica (coleta de dados operacionais, controles eletrônicos simples); Implementar práticas iniciais de economia circular (redução de desperdícios, reaproveitamento de materiais); Promover capacitação introdutória em sustentabilidade e Indústria 4.0; Sensibilizar a liderança para a importância estratégica das práticas de manufatura sustentável; Estabelecer indicadores operacionais simples (eficiência, perdas, consumo de recursos).
Emergente 2 4,1 a 7,0	Em Transição	Neste estágio, identifica-se alta importância percebida, porém ainda baixa ou moderada utilização prática das iniciativas de manufatura sustentável. As empresas reconhecem o valor estratégico da sustentabilidade e da digitalização, mas enfrentam barreiras técnicas, financeiras ou organizacionais para sua plena implementação. As práticas são adotadas de forma pontual e não integrada, com lacunas entre estratégia e execução. O posicionamento típico concentra-se no Quadrante Q2 da matriz importância-utilização, indicando potencial de ganho não explorado.	Integrar sistemas digitais existentes (ERP, planilhas, sensores básicos); Definir e monitorar KPIs sustentáveis estruturados (econômicos, ambientais e sociais); Iniciar governança da sustentabilidade (políticas, responsáveis, metas); Buscar certificações iniciais (ISO 9001, 14001, programas setoriais); Priorizar investimentos em práticas com maior impacto no desempenho organizacional.
Intermediário 3 7,1 a 9,0	Consolidando	As organizações classificadas neste nível apresentam alta importância ou alta utilização em parte significativa das práticas de manufatura sustentável. Há integração parcial das tecnologias da Indústria 4.0 com práticas sustentáveis, refletindo ganhos consistentes em eficiência operacional, desempenho econômico e resultados sociais. Observa-se maior alinhamento entre estratégia, processos e indicadores, com fortalecimento das dimensões operacional, econômica e ambiental. Entretanto, ainda existem oportunidades de expansão sistêmica e aprofundamento da maturidade digital e sustentável.	Expandir rastreabilidade digital de materiais, energia e processos; Reforçar mecanismos de governança corporativa e sustentabilidade; Ampliar programas estruturados de treinamento e capacitação contínua; Integrar práticas de inovação aberta e colaboração em redes; Evoluir de indicadores operacionais para indicadores estratégicos de desempenho organizacional (DO).
Avançado 4 9,1 a 10,0	Referência	Este nível representa elevada maturidade sustentável e digital, caracterizada por alta importância e alta utilização consolidadas em todas as dimensões do modelo de manufatura sustentável. As práticas são plenamente integradas, orientadas por dados e alinhadas à estratégia organizacional. A empresa atua como referência setorial, liderando iniciativas de inovação, economia circular, digitalização avançada e sustentabilidade sistêmica. O desempenho organizacional reflete impactos positivos consistentes nas dimensões financeira, social, ambiental e competitiva.	Realizar benchmarking ativo com líderes globais; Estimular inovação contínua e disruptiva em produtos e processos; Liderar projetos colaborativos em cadeias de suprimentos sustentáveis; Atuar como hub de difusão de boas práticas para MPMEs; Aprimorar modelos preditivos e analíticos para suporte à decisão estratégica.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), adaptação PAULK, Mark C. et al. Capability maturity model, version IEEE software, v. 10, n. 4, p. 18-27, 1993

Análise dos resultados

A aplicação de um índice de adoção de manufatura sustentável possibilita a realização de análises em múltiplos níveis de agregação, contribuindo para uma compreensão mais abrangente e estruturada do estágio de adoção das práticas associadas à Manufatura Sustentável, conforme composições a seguir:

- a) Por variáveis: Cálculo do valor médio de cada variável, permitindo identificar de forma objetiva os pontos fortes (variáveis já consolidadas) e pontos fracos (variáveis deficitárias) em relação à sustentabilidade e Indústria 4.0.
- b) Por dimensão: Análise agrupada por dimensões (organizacional, social, estratégica, econômica, operacional, inovação e ambiental), revelando quais dimensões estão mais avançadas e quais necessitam maior reforço e priorização.
- c) Consolidado: Obtenção do valor global do Índice de Adoção de Manufatura Sustentável, que permite posicionar a empresa nos quadrantes de maturidade, funcionando como um índice comparativo entre organizações, setores ou períodos.
- d) Extremos: Identificação das variáveis e dimensões que apresentam maiores e menores pontuações, fornecendo um mapa de prioridades para ações gerenciais e decisões de investimento em sustentabilidade e tecnologia.
- e) Composições específicas: Realização de análises direcionadas para temas particulares, como novos projetos, investimentos estratégicos ou áreas críticas. Esse formato torna o Índice de Adoção de Manufatura Sustentável um instrumento dinâmico de gestão, adaptável a diferentes contextos e necessidades da organização

Propostas de relatórios conceituais-analíticos

Os resultados também poderão ser consolidados em relatórios conceituais-analíticos, elaborados de forma a atender tanto necessidades gerenciais imediatas quanto finalidades estratégicas de longo prazo. Esses relatórios poderão ser apresentados em diferentes formatos (sumário executivo, relatório técnico completo ou dashboard digital), de acordo com o perfil da organização e a finalidade da avaliação, onde os principais elementos sugeridos são:

- a) Resumo executivo: Exposição sintética do valor consolidado do Índice de Adoção de Manufatura Sustentável, acompanhado do enquadramento da empresa nos quadrantes de maturidade (Inicial, Emergente, Intermediário ou Avançado). Essa seção tem caráter introdutório e facilita a comunicação com gestores de alto nível, conselhos administrativos ou investidores.

- b)** Análise por dimensão: Apresentação detalhada do desempenho em cada uma das sete dimensões (organizacional, recursos humanos, estratégica, econômica, operacional, inovação tecnológica e ambiental). Essa análise evidencia fortalezas e fragilidades específicas, permitindo identificar áreas que necessitam de maior atenção e aquelas que já apresentam boas práticas consolidadas.
- c)** Análise por variáveis: Desagregação dos resultados para cada variável, destacando as de maior pontuação (boas práticas e diferenciais competitivos) e as de menor pontuação (lacunas e prioridades de melhoria). Esse nível é essencial para orientar ações práticas em processos, projetos e políticas organizacionais.
- d)** Recomendações práticas: Proposição de caminhos de melhoria em quatro frentes principais: estratégica, operacional, tecnológica e ambiental. Essa seção terá caráter aplicado, apresentando planos de ação sugeridos para a empresa avançar em cada dimensão, com base nas lacunas identificadas.
- e)** Projeção longitudinal: Análise comparativa da evolução da empresa em diferentes ciclos de aplicação do instrumento de pesquisa. Essa perspectiva temporal permite monitorar o progresso das ações implementadas, avaliar o impacto de novos investimentos ou iniciativas e acompanhar a trajetória de maturidade sustentável-digital da organização.
- f)** Painel comparativo (benchmarking): Possibilidade de comparar os resultados de uma empresa com médias setoriais ou com empresas de mesmo porte, permitindo identificar posicionamentos relativos e oportunidades de benchmarking.
- g)** Relatórios temáticos opcionais: Dependendo da demanda da organização, poderão ser desenvolvidos relatórios específicos, como:
- h)** Relatórios de inovação tecnológica, priorizando análise das variáveis relacionadas à Indústria 4.0 ou de circularidade com foco em práticas ambientais e de economia circular. Relatórios de competitividade, destacando impactos econômicos e de produtividade ou de recursos humanos e governança, orientado à análise de competências, engajamento e alinhamento organizacional.

Em síntese, o relatório conceitual-analítico não se limita a um diagnóstico estático, mas constitui um instrumento dinâmico de gestão, capaz de apoiar diversos direcionamentos:

- a.** Decisões estratégicas (investimentos, posicionamento competitivo, inovação).
- b.** Aperfeiçoamentos operacionais (eficiência de processos, práticas lean/circulares).
- c.** Gestão de pessoas e cultura organizacional (capacitação, engajamento, governança).
- d.** Práticas ambientais e sociais (circularidade, ecoeficiência, responsabilidade social).

Dessa forma, o Índice de Adoção de Manufatura Sustentável consolida-se como um mecanismo de apoio à formulação de planos de ação estruturados, viabilizando a evolução contínua das organizações rumo à Manufatura Sustentável. Essa abordagem garante que o Índice de Adoção de Manufatura Sustentável seja não apenas um índice acadêmico, mas também uma ferramenta aplicada de diagnóstico, monitoramento e apoio à tomada de decisão.

Adicionalmente, a literatura reforça que as MPMEs, apesar de sua relevância econômica e social, enfrentam restrições estruturais significativas como limitações financeiras, tecnológicas e gerenciais que dificultam a adoção sistemática de práticas sustentáveis e digitais. Esse cenário evidencia a necessidade de modelos que sejam simultaneamente teoricamente consistentes, empiricamente mensuráveis e operacionalmente aplicáveis, respeitando as especificidades desse segmento empresarial.

Nesse contexto, a fundamentação teórica construída, ancorada nas contribuições de autores clássicos e contemporâneos, bem como nas perspectivas da Teoria dos Stakeholders, Teoria da Contingência e Teoria das Redes, fornece sustentação para a proposição de um modelo que transcende abordagens fragmentadas e fornece bases para uma visão integrada, sistêmica e adaptativa da manufatura sustentável.

Dessa forma, como resposta às lacunas identificadas na literatura e às demandas práticas das MPMEs, a proposta de um índice de manufatura sustentável estruturado, pode integrar, de forma dinâmica, os elementos críticos da sustentabilidade e da transformação digital no ambiente industrial.

A proposta apresenta sete dimensões interdependentes: Organizacional, Recursos Humanos, Estratégica, Econômica, Operacional, Inovação Tecnológica e Ambiental que, em conjunto, representam os pilares estruturantes da manufatura sustentável no contexto das MPMEs. Cada dimensão incorpora variáveis específicas, fundamentadas na literatura e operacionalizadas em indicadores mensuráveis, permitindo a avaliação do grau de adoção e maturidade das práticas sustentáveis e digitais.

A lógica da proposição de um indicador baseia-se em uma abordagem dual:

- (i) analítica, ao estruturar variáveis em dimensões que refletem os principais constructos teóricos identificados; e
- (ii) sintética, ao consolidar essas dimensões em um índice global de maturidade, possibilitando comparações entre organizações, setores e períodos.

Além disso, o caráter adaptativo decorre de sua capacidade de considerar as condições contingenciais das MPMEs como nível de maturidade, disponibilidade de recursos e contexto institucional permitindo sua aplicação em diferentes realidades organizacionais e econômicas.

Portanto, a proposição de caminhos para um indicador de manufatura sustentável para MPMEs não apenas sistematiza e integra os avanços teóricos da área, mas também oferece uma contribuição original ao propor um instrumento capaz de traduzir conceitos complexos em métricas operacionais, viabilizando sua aplicação prática e validação empírica. Assim, o a proposição constitui a base estruturante desta pesquisa, sendo detalhado em suas dimensões, variáveis e relações conceituais.