



Eduardo Augusto Machado

**Framework para integração da indústria 4.0 com
sustentabilidade (S-I4.0) em cadeias de suprimentos das
micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Luiz Felipe Roris Rodriguez Scavarda do Carmo

Coorientadores: Prof. Rodrigo Goyannes Gusmão Caiado /

Prof. Daniel Luiz de Mattos Nascimento

Rio de Janeiro

março 2025



Eduardo Augusto Machado

Framework para integração da indústria 4.0 com sustentabilidade (S-I4.0) em cadeias de suprimentos das micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luiz Felipe Roris Rodriguez Scavarda do Carmo
Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Prof. Rodrigo Goyannes Gusmão Caiado
Co-Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Prof. Daniel Luiz de Mattos Nascimento
Co-Orientador

Universidade de Barcelona - UB

Prof. André Cristiano Silva Melo
Universidade do Estado do Pará – UEPa

Prof. Renata Albergaria de Mello Bandeira
Exército Brasileiro

Prof. Paula Santos Ceryno
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro – UNIRIO

Prof. Soraida Aguilar Vargas
Universidade Federal Fluminense – UFF

Prof. Adauto Farias Bueno
Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT

Rio de Janeiro, 12 de março de 2025

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Eduardo Augusto Machado

Eduardo Augusto Machado graduou-se em Administração e possui mestrado em Metrologia, ambos pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Publicou recentemente nos periódicos Technological Forecasting and Social Change, Sustainability e Brazilian Journal of Operations & Production Management. Atua como Empresário/ Empreendedor em micro, pequenas e médias empresas (MPMEs) desde 1996, principalmente nas áreas da tecnologia a informação e serviços profissionais especializados, além de ser fornecedor de empresas de todos os portes com atuação estratégica em cadeias de suprimentos.

Ficha Catalográfica

Machado, Eduardo Augusto

Framework para integração da indústria 4.0 com sustentabilidade (S-I4.0) em cadeias de suprimentos das micro, pequenas e médias empresas (MPMEs) / Eduardo Augusto Machado. Orientador: Luiz Felipe Roris Rodriguez Scavarda do Carmo; Coorientadores: Rodrigo Goyannes Gusmão Caiado, Daniel Luiz De Mattos Nascimento. – 2025.

165 f. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2025.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Transformação digital. 3. Operações sustentáveis. 4. Gestão da cadeia de suprimentos. 5. Indústria 5.0. I. Carmo, Luiz Felipe Roris Rodriguez Scavarda do Carmo. II. Caiado, Rodrigo Goyannes Gusmão. III. De Mattos Nascimento, Daniel Luiz. IV. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. V. Título.

CDD: 658.5

Evoluí em todos os sentidos ao longo do Doutorado.
Só consegui com apoio técnico-científico, confiança e motivação.
Silvia Machado, Professores, vocês fazem toda a diferença para essa realização.

Agradecimentos

Primeiramente à minha esposa Silvia Machado, incansável em seu apoio ao longo de todas as etapas desse Doutorado, aos meus filhos Luis Eduardo, Maria Eduarda, Carlos Eduardo e Marianna que, cada um com sua idade, perceberam o grau de dedicação e dificuldade necessários, aos meus Pais Maria das Graças e Walter que orgulhosamente acompanharam muitos desses momentos, aos meus irmãos Marcelo e Walter que certamente torceram para tudo dar certo, aos meus familiares e inúmeros amigos que em diversos momentos perceberam meu esforço, dedicação e troca de momentos de lazer pela pesquisa. Por fim, as cobranças e orientações de alto nível dos meus orientadores Luiz Felipe Scavarda (orientador), Rodrigo Caiado (coorientador) e Daniel Nascimento (coorientador) que me apoiaram em todos os momentos nessa escalada em montanha rochosa e desafiadora que muitas vezes parecia de cume inalcançável. Ambos transformaram minha caminhada para muito melhor, sempre disponíveis mesmo com agendas apertadas que possuem, agregando valor em absolutamente todos os momentos, principalmente nos mais decisivos e críticos.

O trabalho de uma tese de doutorado é uma construção, um processo delicado que exige comprometimento e dedicação em alto nível. Saio desse processo muito melhor do que entrei em diversos aspectos. Difícil enumerá-los, só tenho a certeza de que fiz isso com a ajuda de muitas pessoas melhores que eu, que me fizeram melhor a cada passo dado. Perceber essa evolução como ser humano é uma das coisas mais gratificantes que a vida proporciona.

Por isso, além de reforçar meus agradecimentos aos meus orientadores Luiz Felipe Scavarda, Rodrigo Caiado e Daniel Nascimento, incansáveis em suas respectivas dedicações, quero deixar registrado meu muito obrigado a todos os professores que aprimoraram meu conhecimento, Márcio Thomé, Adriana Leiras, Lilian Menezes, Fernando Cyrino, Renan Silva Santos, entre outros que direta ou indiretamente contribuíram nessa jornada. Aos meus colegas de doutorado, com conversas que trouxeram ideias para aprimoramentos dos estudos.

Ao corpo editorial dos periódicos que submeti estudos como autor ou coautor. A cada um dos revisores que contribuíram diretamente na melhoria dos

artigos. Também gostaria de agradecer aos professores Paula Ceryno, Adauto Bueno, Francisco Gaudêncio Freires, André Cristiano Silva Melo, Renata Albergaria de Mello Bandeira e Soraida Aguilar Vargas que contribuíram nas diversas etapas desta jornada, como nos exames de qualificação e de defesa de proposta de tese.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) através do quadro efetivo de funcionários, corpo docente, departamentos e diretoria, a todos os mais efusivos agradecimentos são poucos pertos da grandeza de poder caracterizar essa instituição como uma das minhas casas.

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – 310578/2022-1, 307173/2022-4, 405734/2023–9 & 442384/2023–8, e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ - 30.495.394/0001-67) Códigos: E-26/201.363/2021, E-26/200.451.2023, E26/211.298/2021.

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

Resumo

Machado, Eduardo Augusto; Scavarda do Carmo, Luiz Felipe Roris Rodriguez (Orientador); Caiado, Rodrigo Goyannes Gusmão (Coorientador); Nascimento, Daniel Luiz De Mattos (Coorientador). **Framework para integração da indústria 4.0 com sustentabilidade (S-I4.0) em cadeias de suprimentos das micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)**. Rio de Janeiro, 2025. 165p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

São crescentes os impactos e transformações em cadeias de suprimentos como consequência da integração da Indústria 4.0 e sustentabilidade (S-I4.0) no contexto das micro, pequenas e médias empresas (MPMEs), dado que os métodos aplicados às grandes empresas não necessariamente funcionam para MPMEs. Mais recentemente, acadêmicos e profissionais dedicam considerável e crescente atenção ao assunto devido à importância da investigação do tema para preenchimento dessa lacuna. Nesse sentido da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs as barreiras funcionam como obstáculos e facilitadores precisam ser potencializados. Outrossim, sob a perspectiva do *triple bottom line* (TBL), a integração é realizada por mecanismos de pessoas, processos e tecnologia (PPT). Neste contexto, o objetivo desta tese de doutorado é o de desenvolver um Framework para integração da indústria 4.0 com sustentabilidade (S-I4.0) em cadeias de suprimentos das micro, pequenas e médias empresas (MPMEs). De forma a atingir este objetivo, adota-se uma abordagem de método misto, com revisões de escopo, painéis de especialistas, grupos focais, *Survey* e múltiplo estudo de casos (MEC), utilizando-se a lógica *fuzzy*, além dos métodos DEMATEL e ARAS. Como resultados, esse trabalho destaca oito barreiras, oito facilitadores, e suas respectivas relações de causa-efeito, além da apresentação de 32 indicadores-chave sendo dois para cada uma das barreiras e facilitadores. Na sequência, essas barreiras e facilitadores tem suas dominâncias identificadas nos eixos PPT e TBL, além dos mapeamentos das relações causais e de influência, que propiciam a elaboração de quatro *frameworks*, sendo dois para MPEs e dois para MEs separadamente para barreiras e facilitadores. Finalmente, tendo como lente as teorias da *Practice-Based View* (PBV) e da *Dynamic Capabilities Theory* (DCT), é realizado um MEC com seis empresas para aplicação dessas ferramentas e, principalmente, para gerar um guia prático na jornada de integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs. Esse estudo traz contribuições fundamentais ao comprovar a necessidade de tratar de forma diferente as MPEs e as MEs, além de oferecer valiosas informações e inovadoras ferramentas para acadêmicos, gestores, e práticos ao fornecer diretrizes para a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs.

Palavras-chave

Transformação digital; operações sustentáveis; gestão da cadeia de suprimentos; indústria 5.0.

Abstract

Machado, Eduardo Augusto; Carmo, Luiz Felipe Roris Rodriguez Scavarda do (Advisor), Rodrigo Goyannes Gusmão Caiado (Co-advisor), Daniel Luiz De Mattos Nascimento (Co-advisor). **Framework for Industry 4.0 and sustainability integration (S-I4.0) in the supply chains of Micro, Small, and Medium Enterprises (MSMEs)**. Rio de Janeiro, 2025. 165p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

There are increasing impacts and transformations in supply chains because of the integration of Industry 4.0 and sustainability (S-I4.0) in the context of micro, small, and medium-sized enterprises (MSMEs), given that the methods applied to large companies do not necessarily work for MSMEs. More recently, academics and professionals have devoted considerable and increasing attention to the subject due to the importance of investigating the topic to fill this gap. In this sense of integrating S-I4.0 in the supply chain of MSMEs, barriers act as obstacles, and enablers need to be enhanced. Furthermore, from the perspective of the triple bottom line (TBL), integration is carried out through mechanisms of people, processes, and technology (PPT). Within this context, this thesis aims to develop a Framework for Industry 4.0 and sustainability integration (S-I4.0) in the supply chains of Micro, Small, and Medium Enterprises (MSMEs). Towards achieving this goal, a mixed-method approach is adopted, with scope reviews, expert panels, focus groups, surveys, and multiple case studies (MCS), using fuzzy logic, in addition to the DEMATEL and ARAS methods. Eight barriers, eight facilitators, and their respective cause-effect relationships are the result of this study, in addition to the presentation of 32 key indicators, two for each of the barriers and enablers. Subsequently, these barriers and enablers have their dominance identified in the PPT and TBL axes, in addition to the mapping of causal and influence relationships, which allow the elaboration of four frameworks, two for MSEs and two for MEs separately for barriers and enablers. Finally, under the lens of *Practice-Based View* (PBV) and *Dynamic Capabilities Theory* (DCT), an MCS is carried out with six companies to apply these tools, mainly to create a practical guide on the journey to integrate S-I4.0 in the supply chains of MSMEs. This study makes fundamental contributions by proving the need to treat MPEs and MEs differently and offering valuable information and innovative tools for academics, managers, and practitioners by providing a practical guide to integrate S-I4.0 in the supply chains of MSMEs.

Keywords

Digital transformation; sustainable operations; supply chain management; industry 5.0.

Sumário

1. Introdução	14
1.1. Motivação, contextualização e lacunas da pesquisa	14
1.2. Perguntas e objetivos de pesquisa	17
1.3. Organização da Tese	21
2. Fundamentação Teórica	23
2.1. Indústria 4.0 (I4.0)	23
2.2. Sustentabilidade	25
2.3. Integração da I4.0 com Sustentabilidade (S-I4.0)	27
2.4. Mecanismos: Pessoas, Processos e Tecnologia (PPT)	28
2.5. S-I4.0 sob a perspectiva das Micro, Pequenas e Médias Empresas (MPMEs)	30
2.6. Lacunas endereçadas na pesquisa	32
3. Metodologia da pesquisa	34
3.1. Revisão de escopo (RE)	38
3.2. Painel com especialistas (P)	42
3.3. Grupo focal (GF)	45
3.4. Survey (S)	49
3.5. Múltiplo estudo de casos (MEC)	52
3.5.1 Seleção das MPMEs	54
3.5.2 Coleta de dados	57
3.5.3 Análise de conteúdo e triangulação dos dados	58
4. S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs: Resultados & Discussões	60
4.1. Principais barreiras e facilitadores, seus indicadores críticos, suas causalidades e dependências	60
4.2. Barreiras e facilitadores: relações de causa e efeito, relações de influência, e dominância para os mecanismos PPT e dimensões TBL	65
4.2.1. Avaliação consensual de escalas verbais	67
4.2.2. Discussão dos resultados (Di + Ri) e (Di-Ri) do mapa DEMATEL	77
4.2.3. Barreiras e facilitadores dominantes nos mecanismos PPT e dimensões TBL	79
4.3. Artefato gerencial para apoiar MPMEs na jornada da S-I4.0 – versão preliminar	85
4.4. Aplicação do framework via múltiplo estudo de casos	90
4.4.1. Introdução ao MEC	90
4.4.2. Micro e pequenas empresas (MPEs)	92
4.4.3. Médias empresas (MEs)	94
4.4.4. Análise combinada	96
4.4.5. Guia prático para integrar S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs	97
4.4.6. Discussão dos resultados do MEC	100
5. Conclusão	102

Referências bibliográficas	107
Apêndices	131
Apêndice A – Questionário do Painei de Especialistas	131
Apêndice B – DEMATEL	137
Apêndice C – Questionário Survey	139
Apêndice D – Notas dos especialistas	157
Apêndice E – Níveis de impacto para PPT e TBL	159
Apêndice F – Questionário do múltiplo estudo de caso	161

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Síntese da abordagem metodológica da pesquisa.	34
Tabela 2 – Experiência dos especialistas e pesos.	46
Tabela 3 – Correspondência de termos linguísticos e valores.	47
Tabela 4 – Empresas envolvidas no múltiplo estudo de caso.	55
Tabela 5 – Barreiras e facilitadores para integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs.	61
Tabela 6 – Seleção das principais barreiras e facilitadores em matriz 8 x 8 para integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs.	62
Tabela 7 – Principais indicadores críticos das barreiras para a integração da S-I4.0 nas cadeias de suprimentos sob a perspectiva das MPMEs.	63
Tabela 8 – Principais indicadores críticos dos facilitadores para a integração da S-I4.0 nas cadeias de suprimentos sob a perspectiva das MPMEs.	64
Tabela 9 – Resultados $D_i + R_i$ e $D_i - R_i$ para barreiras para MPEs.	71
Tabela 10 – Resultados $D_i + R_i$ e $D_i - R_i$ para facilitadores para MPEs.	72
Tabela 11 – Resultados $D_i + R_i$ e $D_i - R_i$ para barreiras para MEs.	73
Tabela 12 – Resultados $D_i + R_i$ e $D_i - R_i$ para facilitadores para MEs.	74
Tabela 13 – Resultados $D_i + R_i$ e $D_i - R_i$ para barreiras para MPMEs.	75
Tabela 14 – Resultados $D_i + R_i$ e $D_i - R_i$ para facilitadores para MPMEs.	76
Tabela 15 – Resultados mapa DEMATEL para barreiras e facilitadores.	77
Tabela 16 – Resultados $D_i + R_i$ e $D_i - R_i$ para barreiras e facilitadores para MPEs e MEs.	78
Tabela 17 – Resultado dominância (ARAS) para barreiras e facilitadores.	81

Lista de Figuras

Figura 1 – Fluxograma da metodologia de pesquisa da tese.	37
Figura 2 – PRISMA para Revisão de Escopo 1.	40
Figura 3 – PRISMA para Revisão de Escopo 2.	41
Figura 4 – Mapa DEMATEL.	49
Figura 5 – Correspondentes de termos linguísticos/valores para MPes.	66
Figura 6 – Correspondentes de termos linguísticos/valores para MEs.	66
Figura 7 – Principais influências para barreiras para MPes e MEs.	67
Figura 8 – Principais influências para facilitadores para MPes e MEs.	67
Figura 9 – Diagrama de causa-efeito para barreiras para MPes.	71
Figura 10 – Diagrama de causa-efeito para facilitadores para MPes.	72
Figura 11 – Diagrama de causa-efeito para barreiras para MEs.	73
Figura 12 – Diagrama de causa-efeito para facilitadores para MEs.	74
Figura 13 – Diagrama de causa-efeito para barreiras para resultado agregado para MPMEs.	75
Figura 14 – Diagrama de causa-efeito para facilitadores para resultado agregado para MPMEs.	76
Figura 15 – Esboço do <i>framework</i> para integração da S-I4.0 nas cadeias de suprimentos de MPMEs.	82
Figura 16 – Artefato das barreiras e facilitadores para MPes.	87
Figura 17 – Artefato das barreiras e facilitadores para MEs.	87
Figura 18 – Guia prático para integrar S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs.	99

Lista de Siglas / Glossário

ARAS – *Additive Ratio Assessment*

B – Barreira

BE – Barreira extra

DCT - *Dynamic Capabilities Theory*

FE – Facilitador extra

GF – Grupo focal

I4.0 – Indústria 4.0

I5.0 – Indústria 5.0

MADM – Método de decisão multiatributo

MEC – Múltiplo estudo de casos

MEs – Médias empresas

MPEs – Micro e pequenas empresas

MPMEs – Micro, pequenas e médias empresas

OE – Objetivo específico

OSCM – gestão de operações e de cadeia de suprimentos, em inglês *operations and supply chain management*

P – Painele de especialistas

PBV – *Practice-Based View*

P&D – Pesquisa e desenvolvimento

PP – Pergunta de pesquisa

PPT – Pessoas, processos e tecnologia

PRISMA – *Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis*

RE – Revisão de escopo

S – *Survey*

S-I4.0 – Integração da indústria 4.0 com sustentabilidade

SSCM – Gestão sustentável da cadeia de suprimentos, em inglês *Sustainable Supply Chain Management*

TBL – Tripé da sustentabilidade, em inglês *Triple bottom line*

1

Introdução

Esse primeiro capítulo é dedicado ao problema da pesquisa, motivação para compreensão dos fenômenos envolvidos, lacunas a serem preenchidas, questões e objetivos da pesquisa, sendo finalizado com uma descrição da organização da tese.

1.1

Motivação, contextualização e lacunas da pesquisa

Indústria 4.0 (I4.0) e sustentabilidade são conceitos atuais para a gestão de operações e cadeia de suprimentos (em inglês *Operations and Supply Chain Management* - OSCM) [Karmaker et al. (2023); van Erp et al. (2024)]. A ligação entre esses dois conceitos tem grande aceitação na literatura e oferece várias avenidas para serem percorridas em pesquisas futuras [Müller & Voigt (2018); Luthra et al. (2020); Bag et al. (2023)]. Por um lado, I4.0 impacta todas as indústrias, abrange suas cadeias de suprimentos e apresenta diversos desafios para organizações em todo o mundo [Sharma et al. (2021); Awan et al. (2022)]. Por outro lado, o tema da sustentabilidade apresenta-se como uma realidade permanente para as empresas, onde as práticas baseadas no conceito original do *triple bottom line* (TBL), ampliam seu significado e impactam diretamente no resultado e na competitividade [Elkington (1994); Magon et al. (2018); Daú et al. (2019); De et al. (2020); Silvestre et al. (2020); Waddod et al. (2023)]. Soma-se a isto a visão que unir práticas sustentáveis e tecnologias disruptivas melhora as cadeias de valor das organizações, sendo a I4.0 protagonista na implementação de novas tecnologias com impactos positivos na sociedade [Scavarda et al. (2019); Scavarda et al. (2020); Nascimento et al. (2024); Caiado et al. (2024)], com aumento da eficiência e, consequentemente, sustentabilidade da organização [Saha et al. (2022); Oláh et al. (2021); Kamble et al. (2018)].

A evolução da Indústria 4.0 (I4.0) acelera a transformação digital e sustentável, impactando o ambiente industrial globalmente e tornando-se um fator essencial para a competitividade [Pfaff (2023); Akbari et al. (2024)]. Essa integração traz desafios complexos para a sustentabilidade das cadeias de

suprimentos globais [Schilling & Seuring (2023)]. A sustentabilidade tornou-se intrínseca nesse processo (S-I4.0), com impactos positivos e duradouros no desempenho organizacional ao superar essas complexidades [Taqi et al. (2023); Mubarik & Khan (2024)]. Apesar dos avanços promovidos por acadêmicos e profissionais [Alonso et al. (2024)], ainda é necessário que organizações, especialmente micro, pequenas e médias empresas (MPMEs) [Vaezinejad et al. (2024)], reformulem suas estratégias para adotar modelos digitais S-I4.0 [Sundarakani et al. (2024)]. Estudos específicos devem considerar essas necessidades [Caiado et al. (2024), Maganga & Taifa (2024)].

Os desafios da implementação da S-I4.0 envolvem riscos e oportunidades e impactam todos os tipos de indústrias no mundo, atingindo as cadeias de suprimentos nas quais estão inseridas, apresentando desafios inovadores, e proporcionando oportunidades de ganhos ao longo das respectivas cadeias de valor [Schilling & Seuring (2024); Vidal et al. (2022); Caiado et al. (2021); Caiado et al. (2022)]. Por um lado, uma das principais consequências resultantes da transformação digital é o aumento do impacto nos modelos e estratégias de negócios existentes [Bueno et al. (2023); Scavarda et al. (2020)]. Se bem-sucedido, o complexo processo de transformação digital torna-se um diferencial competitivo no longo-prazo, com protagonismo dos princípios da sustentabilidade no desafio da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos [Lima et al. (2023)]. Por outro lado, a adoção pelas organizações da sustentabilidade baseadas no TBL, ou conceitos semelhantes como *People, Profit and Planet* [Slaper & Hall (2011)], faz com que sejam incorporadas as dimensões econômica, ambiental e social em seus processos decisórios, planos estratégicos, táticos e operacionais [Caiado et al. (2022); Azevedo et al. (2021); Agrawal et al. (2019); Nascimento et al. (2019); Bonn & Fisher (2011)], facilitando a busca pela excelência face aos desafios impostos pelas transformações digitais [Chavez et al. (2022)]. Recentemente, surge a corrente que aborda o conceito da Indústria 5.0 (I5.0), destacando o papel do ser humano na transformação digital da I4.0 [Olsson et al. (2025)]. Além disso, incorpora a sustentabilidade (S-I5.0), ampliando seu papel para o desenvolvimento social de maneira abrangente [Krokowski et al. (2025)].

Contudo, é desafio global para as organizações a integração da S-I4.0 em OSCM [Sharma et al. (2021); Kumar, R. et al. (2020); Liu et al. (2023)], em particular para micro, pequenas e médias empresas (MPMEs) [Pandya et al. (2024);

Kumar et al. (2023)]. Também há carência de estudos sobre MPMEs [Mue et al. (2018); Müller & Voigt (2018)], uma vez que exigem soluções diferentes das grandes organizações [Birkel et al. (2019); Khanzode et al. (2021)], sendo essa necessidade mais explícita nos países em desenvolvimento onde seus ambientes de negócios são predominantemente constituídos por MPMEs com estruturas e legislações específicas para apoiar iniciativas de promoção do emprego e geração de atividades inovadoras [Jové-Llopis & Segarra-Blasco (2018); Qureshi et al. (2023)]. No apoio à superação das maiores dificuldades que as MPMEs enfrentam para a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos, surgem benefícios que proporcionam o aumento da produtividade e melhoria do desempenho organizacional no longo-prazo [Yazdi et al. (2019); Qureshi et al. (2023)]. É fato que existem poucos estudos sobre como as MPMEs podem escalar a transformação digital, aproveitando-se do crescimento das práticas de S-I4.0 e suas oportunidades relacionadas [Maheshwari & Kamble (2023); Qureshi et al. (2023); Bhatt & Kumar (2022); Mue et al. (2018); Müller & Voigt (2018)], portanto, faz sentido um recorte específico, dado que MPMEs exigem soluções diferentes das grandes empresas [Caiado et al. (2024); Khanzode et al. (2021); Birkel et al. (2019)].

Organizações enfrentam grandes desafios em relação à integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos nas quais estão inseridas [Caiado et al. (2022)], particularmente as MPMEs [Jamwal et al. (2021); Birkel & Müller (2021)]. De fato, estudos mostram que a adoção da S-I4.0 é considerada mais complexa e arriscada nas MPMEs [Pandya & Kumar (2023); Rojas-Berrio et al. (2022)], devido à menor capacidade comparativa frente às grandes empresas, e menor relevância da integração sustentável em cadeias de suprimentos [Mulchandani et al. (2023)]. Além disso, há também estudos sobre MPMEs no contexto da S-I4.0 que destacam o papel essencial de todos os grupos de interesse envolvidos em apoiar as MPMEs na superação dos desafios de implementar esse conceito e promover a transformação digital sustentável nas cadeias de suprimentos [Kumar et al. (2023); Rossi et al. (2022); Pandya et al. (2024)].

A dificuldade das MPMEs na integração da S-I4.0 comprova a importância e relevância da identificação das barreiras, facilitadores e respectivos indicadores, além da importância da compreensão das relações causais dentro dos constructos das barreiras e facilitadores [Ngepah et al. (2024); Cerne et al. (2023)]. As grandes organizações têm vantagens de escala, mas contrapõem que a integração da S-I4.0

em cadeias de suprimentos dá as MPMEs um impulso especial com o surgimento de novas oportunidades de desenvolvimento organizacional [Ali & Johl (2023)]. Outrossim, devido às particularidades das MPMEs, essa transformação digital sem precedentes faz necessária que ocorra uma mudança das atitudes e comportamentos dos líderes e gestores organizacionais, sendo fundamental o compartilhamento do conhecimento para o incremento da capacidade de inovação com impacto direto na melhoria do desempenho organizacional [Kolasani (2023)], mesmo com o enfrentamento das adversidades relacionadas a menor capacidade financeira das MPMEs para a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos [Qureshi et al. (2023); [Khanzode et al. (2021)]; Michna & Kmieclak (2020)]. Nesse cenário complexo, verifica-se carência de estudos sobre como as MPMEs podem escalar a transformação digital e aproveitar as oportunidades da S-I4.0 [Anatan & Nur (2024); Martínez-Peláez et al. (2023)]. O surgimento de guias práticos são desejáveis e importantes visando facilitar essa integração, e oferecendo ferramentas úteis para profissionais e acadêmicos [Ejsmont et al. (2020); Caiado et al. (2024). Alonso et al. (2024)]. Além disso, falta compreensão sobre as diferenças entre micro e pequenas empresas (MPEs) e médias empresas (MEs), e se devem ser tratadas em grupos separados [Passaro et al. (2023); Azis (2024); Hernández et al. (2024)].

1.2

Perguntas e objetivos de pesquisa

Acadêmicos e gestores têm dedicado uma crescente atenção às barreiras e facilitadores para a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos [Sharma et al. (2023); Belhadi et al. (2022)]. Contudo, existe ainda a necessidade da melhor compreensão das barreiras e facilitadores que impactam essa integração [Taqi et al. (2023); Abdullah et al. (2023); Gupta et al. (2020); Fawcett et al. (2008)]. As barreiras são obstáculos à realização das atividades [Kouhizadeh et al. (2021)], e os facilitadores potencializam as medidas necessárias para implantação de novos processos voltados para a evolução da organização [Rockart (1979)] e superação de barreiras [(Caiado et al., 2023)]. Tanto barreiras quanto facilitadores podem ser representados por indicadores, que são vistos como parâmetros, medidas, quantidades, propriedades de um fenômeno ou substâncias às quais uma magnitude

pode ser atribuída [Steg et al. (2022); Shamba et al. (2021); VIM (2012); Sharma et al. (2022); Ferris (1999)]. Outrossim, há dificuldade para as MPMEs identificarem barreiras e facilitadores, e suas respectivas relações causais, além da necessidade da identificação dos indicadores associados a cada uma das barreiras e dos facilitadores, para a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs [Gupta et al. (2020); Khanzode et al. (2021); Morella et al. (2023)].

As cadeias de suprimentos são naturalmente mais complexas conforme número de organizações participantes e quantidade de transações, sendo uma oportunidade para as MPMEs partícipes acelerarem suas respectivas jornadas para a integração da S-I4.0, com impactos imediatos nas cadeias de valor [Birkel et al. (2019); Pandya & Kumar (2023)]. No entanto, ainda existe uma lacuna entre a investigação e a prática localizada na maior dificuldade para as MPMEs, em termos de tornar essas barreiras e facilitadores mais perceptíveis através dos seus indicadores, bem como na melhor compreensão dos gestores quanto à pertinência da sua aplicação em contextos cotidianos das organizações [Joshi et al. (2022); Saabye et al. (2020)]. Neste contexto, chega-se a primeira pergunta de pesquisa (PP1):

- 1) PP1: Quais são as principais barreiras e facilitadores, seus indicadores críticos, suas causalidades e dependências, para a integração da I4.0 e sustentabilidade (S-I4.0) em cadeias de suprimentos na perspectiva das MPMEs?

As organizações também devem estar cientes dos aspectos relacionados às dificuldades da integração da S-I4.0 e tomar medidas para superá-las em suas respectivas cadeias de suprimentos [Ali & Johl (2024); Qureshi et al. (2023)]. No contexto das MPMEs, os líderes organizacionais desempenham um papel crucial na integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos, promovendo ambientes que incentivam o compartilhamento de informações e do conhecimento [Sayem et al. (2022)]. Mais recentemente, surge o conceito da Indústria 5.0 (I5.0) que enfatiza o papel fundamental das pessoas na I4.0, dando mais ênfase à importância do ser humano na jornada da transformação digital [Rojas et al. (2021); Breque et al. (2021); Carayannis et al. (2022); Bhattacharya et al. (2023), Lepore et al. (2023); Olsson et al. (2025)]. Além disso, ao inserir a sustentabilidade no contexto da I5.0 (S-I5.0), o papel da indústria vai além da sua eficiência e melhoria na produtividade,

pois na prática, fortalece seu protagonismo para o desenvolvimento da sociedade como um todo [Dieste et al. (2023); Krokowski et al. (2025)]. Soma-se ao exposto, o conceito dos mecanismos PPT - pessoas (P); processos (P); tecnologias (T) - que também desempenham um papel crucial para as organizações na jornada da transformação digital e busca pela excelência [Muhamad et al. (2021); Tortorella et al. (2022)]. Se bem aproveitada, a sinergia dos mecanismos PPT potencializa mais eficiência, inovação e competitividade impulsionando o potencial da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das organizações [Srhir et al. (2023); Khan et al. (2023); Corallo et al. (2024)]. Dentro do cenário atual e das tendências evolutivas expostas acima, há carência de estudos no contexto das MPMEs que contemplem para barreiras e facilitadores as perspectivas dos mecanismos PPT e das dimensões TBL, sendo que as MPMEs devem ter apoio na identificação das mesmas para cada mecanismo PPT e dimensão TBL com objetivo de facilitar a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos [Müller & Voigt (2018); Khanzode et al. (2021); Kumar et al. (2022)]. Portanto, há uma lacuna para estudos nesse contexto das MPMEs que contemplem barreiras e facilitadores relativos aos mecanismos de pessoas, processos e tecnologia (PPT) [Hahn (2020); Tortorella et al. (2022)] e as dimensões econômica, social e ambiental do triple bottom line (TBL) [Kahn et al. (2021); Taddei et al. (2022)]. Com isto, apresenta-se a segunda pergunta de pesquisa (PP2):

- 2) PP2: Quais são as barreiras e facilitadores dominantes, suas relações causais, de efeito, e relações de influência no que diz respeito aos mecanismos PPT e dimensões TBL para a integração da I4.0 e da sustentabilidade (S-I4.0) em cadeias de suprimentos das MPMEs?

Por fim, existe ainda uma outra centralidade relacionada ao fato que a S-I4.0 coloca novos desafios para as MPMEs que, por sua vez, devem se cercar de cuidados para criarem uma jornada de transformação sólida em seus ambientes organizacionais [Rossi et al. (2022); Pandya et al. (2024)]. Para exemplificar, a implementação bem-sucedida pelas MPMEs de Lean 4.0 (Lean + I4.0) promove melhorias de produtividade, redução de resíduos, vantagem competitiva e sistema de produção sustentável [Qureshi et al. (2023)]. Existem poucos estudos sobre como as MPMEs podem escalar a transformação digital, aproveitando-se do crescimento das práticas de S-I4.0 e suas oportunidades ofertadas [Bhatt & Kumar (2022)]. Além disso, ainda existe muito a ser feito para que as organizações

reformulem as suas estratégias de negócios e adotem modelos digitais da S-I4.0 [Sundarakani et al. (2024)]. É fundamental que um framework que contemple I4.0 e sustentabilidade (S-I4.0) seja uma ferramenta compreensível para práticos e acadêmicos, além de levarem os mesmos a processos reflexivos sobre suas organizações [Ejsmont et al. (2020); Alonso et al. (2024)].

A literatura acadêmica reforça as dificuldades que MPMEs têm encontrado em suas jornadas para integração da S-I4.0 (Caiado et al., 2024), sendo este fato verificado tanto em países desenvolvidos como a Itália [Orazi & Sofritti (2024)], quanto em países em desenvolvimento como a Malásia [Wei et al. (2024)] e Índia [Pulicherla et al. (2022); Gahlaut & Dwivedi (2023)]. Estes estudos apontam para uma carência de ferramentas que apoiam estas empresas em suas jornadas de integração da S-I4.0 em suas cadeias de suprimentos. Chega-se, portanto, a terceira e última pergunta de pesquisa (PP3) desta tese.

3) PP3: Como apoiar MPMEs na jornada da integração da indústria 4.0 com sustentabilidade (S-I4.0) em suas cadeias de suprimentos?

Sendo assim, o objetivo geral desta pesquisa é o de desenvolver um *framework* para integração da indústria 4.0 com sustentabilidade (S-I4.0) em cadeias de suprimentos das micro, pequenas e médias empresas (MPMEs).

A partir do objetivo geral, foram elaborados objetivos específicos (OEs) fundamentais para a obtenção dos resultados, realização das análises, e por fim formulação das conclusões e recomendações, sendo eles:

OE (i) - Identificar e validar as principais barreiras e facilitadores para a integração da I4.0 e da sustentabilidade nas cadeias de suprimentos das MPMEs.

OE (ii) - Identificar e validar os indicadores críticos para cada uma das principais barreiras e facilitadores, tornando-os mais tangíveis e mensuráveis para as MPMEs.

OE (iii) - Identificar e analisar as causalidades e dependências entre as barreiras e facilitadores, identificando os mais proeminentes/importantes.

OE (iv) - Constatar e analisar a dominância (níveis de impacto mais elevados) das barreiras e facilitadores identificados, suas relações causais, de efeito, e de influência no que diz respeito aos mecanismos PPT e dimensões TBL, no

tocante a integração de I4.0 e sustentabilidade nas cadeias de suprimentos das MPMEs.

OE (v) - Desenvolver um artefato gerencial (*framework*) que possa apoiar a jornada de implementação da integração S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs.

OE (vi) - Validar e aplicar o *framework* em MPMEs para verificar sua aderência como um guia para acompanhar as jornadas de integração da S-I4.0.

Como resultado, esta pesquisa busca um aprofundamento científico que está ausente na literatura atual ao trazer múltiplas contribuições, como na identificação e análise das barreiras e facilitadores para integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos no contexto das MPMEs. Outro resultado relevante é comprovação da necessidade de tratar diferentemente as MPEs e as MEs. Além disso, esta análise apresenta de maneira estruturada e visual os grupos de causa e efeito das barreiras e facilitadores, oferecendo informações para acadêmicos e gestores com diretrizes que auxiliam diretamente as MPMEs na integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos. Permite também, a geração de impacto imediato ao apresentar caminhos para aceleração da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs através dos mecanismos PPT e dimensões do TBL. Finalmente, aprofunda a dinâmica do processo de integração ao fornecer um artefato gerencial abrangente para as MPMEs integrarem S-I4.0 em cadeias de suprimentos, sendo que o *Framework* para S-I4.0 e o consequente guia prático são aplicados em MPEs e MEs, através da realização de múltiplo estudo de casos (MEC), permitindo assim conclusões relevantes em ambientes organizacionais existentes em um país em desenvolvimento. O MEC utilizou duas teorias consolidadas como lentes, sendo elas a *Practice-Based View* (PBV) – [Foss & Ishikawa (2007)] e a *Dynamic Capabilities Theory* (DCT) – [(Teece et al. (1997))].

1.3

Organização da Tese

A Tese está organizada em cinco capítulos, sendo este primeiro o introdutório. O segundo capítulo oferece a fundamentação teórica, onde são introduzidos os conceitos de I4.0 e de sustentabilidade (S-I4.0) pela perspectiva do TBL e a integração destes dois conceitos. Adicionalmente, o capítulo oferece as

visões dos mecanismos de pessoas, processos e tecnologias (PPT) e da S-I4.0 sob a perspectiva das MPMEs. O segundo capítulo oferece as lacunas de pesquisa endereçadas na pesquisa. Na sequência, o terceiro capítulo descreve a metodologia adotada nas diversas etapas da pesquisa. O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões obtidos, organizado de acordo com as três perguntas de pesquisa. O quinto e último capítulo oferece as conclusões elaboradas pelo autor desta tese de doutorado, as implicações teóricas, metodológicas e práticas para acadêmicos e colaboradores das organizações (os chamados gestores e *practitioners*), além de recomendações para pesquisas futuras.

Ao longo da condução da pesquisa de doutorado, resultados preliminares foram sendo apresentados e divulgados à comunidade. Sendo assim, diversas passagens desta tese são complementadas com informações disponíveis em [Machado et al. (2021); Machado et al. (2024), Caiado et al., (2024); Machado et al. (2025)].

2

Fundamentação teórica

Este capítulo oferece o arcabouço teórico para sustentar a condução da pesquisa em todas suas etapas, estando o mesmo organizado em seis seções.

2.1

Indústria 4.0 (I4.0)

Para falar de I4.0, também conhecida como a quarta revolução industrial, cabe apresentar as três fases anteriores à mesma, são elas: (i) A primeira revolução industrial começou no final do século XVIII e estendeu-se até o início do século XX, com a mecanização e geração da energia baseada na energia da água e do vapor. Trouxe a transição do trabalho manual para as primeiras manufaturas, sendo utilizado principalmente na indústria têxtil com impactos diretos na intensa melhoria da qualidade de vida; (ii) A segunda revolução industrial aconteceu do final do século XIX ao início dos anos 1970, baseado na produção em massa e na divisão do trabalho com base na geração de energia elétrica, resumida pela implantação da montagem em linha em 1870 cujo maior expoente é a produção do automóvel Ford modelo-T, onde não existia a possibilidade de personalização pelo comprador; (iii) A terceira revolução industrial nasceu no início dos anos 1970 até a presente data, sendo caracterizada pela digitalização com a introdução da microeletrônica e automação. Possibilita-se a variedade de produtos em linhas de produção flexíveis com máquinas programáveis (*programmable logic controller – PLC* em inglês) [Rojko (2017); Yülek (2018); Aceto et al. (2019)].

O termo I4.0 surge em um artigo escrito pelo governo da República Federal da Alemanha em 2011 como parte de um projeto estratégico do governo para promover a informatização da manufatura, em contexto de discussões sobre a quarta revolução industrial, que representa a integração de tecnologias digitais avançadas no ambiente organizacional. O objetivo principal é a transformação da indústria através da digitalização e exploração das novas tecnologias em um ambiente altamente flexível que viabiliza a personalização pelos mercados compradores. O conceito que impulsiona o termo são novas fábricas inteligentes,

onde há interconexão e interoperação de máquinas, sistemas e processos, com capacidade de realizarem tarefas de maneira autônoma e descentralizada, permitindo assim maior eficiência e competitividade para as organizações, alterando significativamente suas operações, transformando os modelos tradicionais de produção, e criando oportunidades para inovação nas organizações que adotam a I4.0. [Rojko (2017); Aceto et al. (2019); Yaqub & Alsaban (2023)].

Desde a iniciativa do governo alemão outros países de expressão no cenário mundial seguiram caminho similar, como por exemplo a França com os termos *Industrie du Futur* e *New Industrial France*, a Itália com *Piano Industria 4.0*, os Estados Unidos da América com *Manufacturing USA (MUSA)*, China com *Made in China 2025*, Japão com *Society 5.0*, Portugal com mesmo termo *Industria 4.0*, entre outros, o que demonstra ampla aderência à visão, estratégia, objetivos e conceitos inerentes ao conceito lançado em 2011 [Tiraboschi & Seghezzi (2016); Li (2018); Santos et al. (2018); Barcellini (2019); Holroyd (2019); Oztemel & Gursev (2020)].

Esta quarta revolução industrial baseia-se principalmente em sistemas que integram computação, comunicação e controle (*cyber-physical systems* – CPS em inglês) e análise de grandes dados para extração de valor em grandes quantidades de dados (*big data analytics* – BDA em inglês), baseados na chamada internet das coisas (IoT em inglês) que por sua vez é caracterizada pela ampla quantidade e variedade de objetos interconectados como telefones celulares, sensores, relógios, e diversas tecnologias/produtos associados (inteligência artificial - IA, realidade aumentada, impressão 3D, entre outras, que são fundamentais para impulsionar processos industriais inovadores). Desde a sua criação, a I4.0 tem se ramificado em todo o planeta, assumindo importante e crescente relevância, ocupando cada vez mais protagonismo nas discussões sobre o futuro das indústrias/organizações e das economias mundiais [Aceto et al. (2019); Sima e al. (2020); Abdelmajied (2022); Nakayama et al. (2023)]. Na I4.0, a integração de dados com comunicação rápida e confiável é muito importante na tomada de decisões, e apoio da alta administração é necessário para realização do processo de compras de ferramentas e equipamentos habilitados para o ambiente da I4.0 [Kalssoom et al. (2021); Gottge et al. (2020)]. Além disso, a I4.0 exige uma mudança de paradigma em processos com a adoção das novas tecnologias inerentes, com alteração significativa da forma com que os colaboradores trabalhadores lidam adequadamente com elas. Portanto, qualificação, treinamento, habilidade, motivação e moral adequados são

necessários para criar um ambiente multitarefa com compreensão interdisciplinar. A I4.0 exige integração humana em ambientes com a arquitetura necessária para um maior desenvolvimento [Gorecky et al. (2014); Sparrow et al. (2022)].

Cabe destacar que os impactos da adoção da I4.0 ultrapassam as fronteiras das indústrias, onde recomenda-se o envolvimento da sociedade e outros grupos de interesse pertinentes desde os estágios iniciais com objetivo maior de que essa adoção seja realizada de maneira responsável [De Giovanni (2023)]. A coexistência das tecnologias já estabelecidas com novas tecnologias é inevitável, como exemplo as implicações de big data e análise preditiva, com impactos transformadores nas industriais globais, sob pena de isolamento do cenário produtivo global àquelas que não aderirem [Jabbour et al. (2020); Kumar, P. et al. (2020); Kumar, S. et al. (2020)].

Com olhar mais abrangente, o conceito da I4.0 pode ser percebido como um compromisso declarado dos governos no sentido da promoção, orientação, e desenvolvimento conjunto de tecnologias e recursos necessários para o melhor aproveitamento do potencial inerente ao conceito. Em contrapartida, esse avanço traz desafios relacionados à sustentabilidade econômica, ambiental e social [Wu et al. (2018); de Oliveira et al. (2023)], tema este que é abordado na seção a seguir.

2.2

Sustentabilidade

A definição de sustentabilidade mais citada é a dada em 1987 no relatório “Nosso Futuro Comum” (*Our Common Future*) da Comissão Mundial das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (WCED - sigla em inglês). A sustentabilidade é um conceito relacionado à capacidade de satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de contemplarem às suas próprias [Brundtland (1987); Hajian & Kashani (2021)].

Em outras palavras, visa garantir o bem-estar das futuras gerações através do equilíbrio entre as dimensões econômica, ambiental e social, considerando o conceito do *triple bottom line* (TBL/3BL, também conhecida por *people, profit, planet*). Antes do surgimento do TBL a dimensão econômica era o pilar central do desempenho organizacional globalmente, com o surgimento do TBL as organizações passaram a avaliar seus desempenhos com base em três dimensões

conectadas entre si: (i) Dimensão econômica: saúde financeira da organização, sua capacidade de gerar lucro e manter-se sustentável ao longo do tempo numa perspectiva de longo prazo. Isso envolve a organização em seu todo em receitas, custos, eficiência operacional, valor para os acionistas e relacionamento com demais grupos de interesse, entre outros aspectos organizacionais; (ii) Dimensão ambiental: relacionada aos impactos ambientais oriundos das operações da organização (consumo de recursos, emissões de gases, geração de resíduos e poluição). Contempla a adoção de práticas sustentáveis, mitigação das mudanças climáticas, preservação da biodiversidade e práticas relacionadas a economia circular; (iii) Dimensão social: impacto da organização sobre pessoas e comunidades, além de funcionários, fornecedores, clientes e demais grupos de interesse. Contempla a responsabilidade social corporativa, diversidade e inclusão, direitos humanos, saúde e segurança no trabalho, práticas transparentes, privacidade, entre outros. Ao adotarem práticas sob a ótica do TBL, as organizações contemplam simultaneamente as dimensões econômica, ambiental e social, reconhecendo que o desempenho saudável no longo prazo depende da sustentabilidade não somente na criação de valor para os acionistas, mas também para o meio ambiente e sociedade [Elkington (1994); Kuhlman & Farrington (2010); Purvis et al. (2019); Santos et al. (2023); Abraham (2024)].

O conceito da sustentabilidade promove uma visão holística e responsável do papel das organizações para a sociedade. No mundo real, engloba a adoção de práticas e tecnologias que visam minimizar o impacto negativo das atividades humanas sobre o meio ambiente e sociedade, com a garantia da viabilidade econômica no longo prazo [Jain et al. (2024); Eyo-Udo et al. (2024)].

Planejar e executar a sustentabilidade tornou-se fundamental para superação de problemas globais urgentes, como mudanças climáticas, escassez de recursos, degradação do meio ambiente e aumento das desigualdades sociais [Muchunguzi (2023); Türkes (2024)].

Para muitos autores, a sustentabilidade pode ser rotulada mais que um conceito, como sendo de maneira mais ampla um princípio orientador para a sociedade, desde indivíduos e organizações, até governos e instituições locais, regionais ou globais. Ao contemplar a sustentabilidade como princípio, é possível projetar o futuro mais equitativo e próspero [Raymond et al. (2023)].

2.3

Integração da I4.0 com Sustentabilidade (S-I4.0)

A integração da S-I4.0 é crucial para garantir que a transformação digital nas indústrias também se alinhe com práticas sustentáveis. Ao combinar os princípios da I4.0 com objetivos de sustentabilidade, as empresas podem aumentar a eficiência, reduzir o desperdício e minimizar os impactos ambientais. As organizações podem criar operações mais resilientes e responsáveis que não só beneficiam seus resultados financeiros, mas também contribuam para o futuro mais sustentável do planeta [Rocha et al. (2022); Tang et al. (2022); Behl et al. (2023); Nascimento (2024)]. Isto traz alguns benefícios fundamentais para as organizações, conforme listados a seguir:

- Eficiência de recursos: A S-I4.0 ajuda as organizações na otimização do uso de recursos, propiciando a redução das perdas e do consumo de energia [Javaid et al. (2022)].
- Transparência e Rastreabilidade: Através de tecnologias da I4.0 (e.g.: blockchain) aplicadas de maneira sustentável (S-I4.0) em cadeias de suprimentos, as organizações podem aumentar a transparência, com a inclusão de práticas éticas de produção [Gazzola et al. (2023)].
- Manufatura Inteligente: A S-I4.0 permite o desenvolvimento de sistemas de manufatura inteligentes sustentáveis que são adaptados às condições dinâmicas de mercado, permitindo assim incremento da produtividade com redução dos impactos ambientais e sociais [Singh et al. (2023); Atieh et al. (2023)].
- Economia Circular: A integração da S-I4.0 apoia a transição para uma economia circular, melhorando o acompanhamento do ciclo de vida dos produtos, processos de reutilização, reuso e refabricação, além da concepção de novas e mais eficazes estratégias para redução de resíduos [Kazancoglu et al. (2023); Nascimento (2024)].
- Manutenção Preditiva: Os sistemas de manutenção preditiva baseados em IoT e IA contribuem diretamente para a S-I4.0, pois auxiliam as organizações na redução do tempo inoperante, com benefícios diretos como

o prolongamento da vida útil dos equipamentos e a otimização dos ciclos de manutenção [Nagaty (2023); Abbas (2024)].

- Capacitação dos colaboradores: Ao investir na formação e na qualificação dos colaboradores para trabalharem com tecnologias avançadas, as organizações promovem a cultura da inovação e na integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos [Sharma & Kohli (2023); Ajayi & Udeh (2024)].
- Conformidade regulatória: A integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos pode ajudar no monitoramento e na elaboração de relatórios com indicadores que comprovam o adequado desempenho da organização no tocante à conformidade com requisitos exigidos [Tripathi & Gupta (2021); Hajoary (2022)].

Em resumo, a integração da S-I4.0 nas cadeias de suprimentos representa uma abordagem estratégica para as organizações alinharem os avanços tecnológicos com as dimensões da sustentabilidade [Qureshi et al. (2023); Mackiewicz & Götz (2024)]. Por fim, uma abordagem holística para a S-I4.0 impacta positivamente o desempenho operacional e a competitividade da organização, abrindo caminho para um cenário mais responsável e ético, alinhado com os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) [Varela et al. (2022); Caiado et al. (2022); Kluczek et al. (2022); Mubarik & Khan (2024)].

2.4

Mecanismos: Pessoas, Processos e Tecnologias (PPT)

Os mecanismos PPT - pessoas (P), processos (P) e tecnologias (T) - vêm recebendo grande destaque nas pesquisas de OSCM (Kreuter et al. (2022), Kalla et al. (2025)). Isso é refletido na forma como a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos desempenha um papel crucial na jornada da transformação digital e da excelência das organizações [Muhamad et al. (2021); Tortorella et al. (2022)]. A seguir estão elencados cada um dos mecanismos:

⇒ **Mecanismo: Pessoas (P)**

- Desenvolvimento e treinamento de habilidades: Capacitar os colaboradores para trabalhar com tecnologias avançadas como internet das coisas (IoT), inteligência artificial (IA) e automação [Chuang (2024)].
- Colaboração Homem-Máquina: Incentivar a sinergia entre humanos e máquinas em fábricas inteligentes para operações otimizadas [Zafar et al. (2024)].
- Mentalidade da inovação: Promover uma cultura voltada para a inovação e aprendizagem contínua para cada vez mais velozes adaptações aos avanços tecnológicos [AlSaied & Alkhoraif (2024)].
- Equipes multifuncionais: Reunir e desenvolver habilidades para solução de problemas complexos e aumento da eficiência organizacional [Scarlat & Barar (2023)].

⇒ **Mecanismo: Processos (P)**

- Implementação de gêmeo digital (*digital twin*): Réplicas digitais de sistemas físicos para otimizar, simular e prever [Javaid et al. (2023); Zafar et al. (2024)].
- Manufatura Ágil: Responder com velocidade às mudanças do mercado e personalizar a produção com eficiência [Ding et al. (2023); Zafar et al. (2024)].
- Manutenção Preditiva: Implementação de técnicas de manutenção preditiva e análise de dados para reduzir o tempo de inatividade e aumentar a confiabilidade do equipamento [Nagaty (2023); Abbas (2024); Ochuba et al. (2024)].
- Manufatura Enxuta: Eliminar desperdícios, otimizar processos e melhorar a eficiência operacional como um todo [Rizki (2023); Rahardjo et al. (2023)].

⇒ **Mecanismo: Tecnologias (T)**

- Integração com a Internet das Coisas (IoT): Conectar máquinas, sensores e dispositivos para coletar dados em tempo real e permitir a tomada de decisões mais assertivas [Hu et al. (2024)].

- Aplicativos de Inteligência Artificial (IA): Utilizar algoritmos de IA para análise preditiva, controle de qualidade e otimização de processos na fabricação [Plathottam et al. (2023); Chuang (2024)].
- Robótica e Automação: Implementar robôs e tecnologias de automação para agilizar processos de produção e melhorar a produtividade [Khang et al. (2023); Zafar et al. (2024)].
- Computação em nuvem e Big Data: Armazenar, processar e analisar grandes quantidades de dados para obter informações utilizáveis [AL-Jumaili et al. (2023)].
- Interoperabilidade: Crucial em tecnologia, pois permite que diferentes sistemas se comuniquem e funcionem juntos de forma eficaz, economizando tempo das empresas, reduzindo custos e proporcionando experiências aprimoradas para os usuários [Chowdhury (2024); Stefan et al. (2024)].

Ao aproveitar as sinergias entre os mecanismos PPT dentro na jornada da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos, as organizações podem alcançar maior eficiência, inovação e competitividade no cenário digital em acelerada evolução. A integração eficaz destes elementos é fundamental para aproveitar todo o potencial da integração S-I4.0 e impulsionar o crescimento organizacional sustentável [Srhir et al. (2023); Khan et al. (2023); Corallo et al. (2024)].

2.5

S-I4.0 sob a perspectiva das Micro, Pequenas e Médias Empresas (MPMEs)

Primeiramente, é importante apresentar as características das MPMEs no Brasil regidas pela Lei Complementar 123/2006 (Estatuto da Microempresa e da Empresa de Pequeno Porte), lembrando que cada país tem legislações ou Normas específicas para essa caracterização, que neste estudo trata de micro e pequenas empresas agrupadas em MPEs. As médias empresas (MEs) são caracterizadas pela Lei Complementar 123 [BRASIL (2006)]. As características de cada agrupamento são: Microempresas: Faturamento bruto anual até R\$ 360.000,00 (Trezentos e sessenta mil reais). Possuem número reduzido de colaboradores e estrutura

simplificada [Sebrae (2024)]. Pequenas empresas: Faturamento bruto anual entre R\$ 360.000,00 (Trezentos e sessenta mil reais) e R\$ 4.800.000,00 (Quatro milhões e oitocentos mil reais). São organizações que possuem mais estrutura e colaboradores que as microempresas, porém ainda são de porte reduzido [Sebrae (2024)]. Médias empresas: Faturamento anual entre R\$ 4.800.000,00 (Quatro milhões e oitocentos mil reais) e R\$ 300.000.000,00 (Trezentos milhões de reais). São organizações de estrutura mais complexa, com número maior de colaboradores e operações mais robustas em comparação com as MPes [Sebrae (2024)]. Para efeito comparativo com o passar do tempo cabe informar a paridade da moeda real frente ao dólar americano no câmbio oficial brasileiro em 06 de fevereiro de 2025: US\$ 1,00 = R\$ 5,785 [Banco Central do Brasil (2025)]. As MPMEs podem ser definidas de diferentes formas internacionalmente. Esse estudo segue a definição da União Europeia conforme a Recomendação 2003/361/EC [European Commission (2003)], adotada pelos países membros para garantir tratamento uniforme às MPMEs. Os critérios são baseados no número de empregados e no faturamento (receita/balanço anual), conforme segue: (i) Microempresas: menos de 10 empregados e faturamento ou balanço anual de até 2 milhões de euros; (ii) Pequenas empresas: menos de 50 empregados e faturamento ou balanço anual de até 10 milhões de euros; (iii) Médias empresas: menos de 250 empregados, faturamento de até 50 milhões de euros ou balanço anual de até 43 milhões de euros. Essa distinção é relevante devido às práticas adotadas, como o acesso a fundos e financiamentos direcionados a cada porte de empresa, com foco no desenvolvimento econômico, inovação e sustentabilidade. Neste estudo, as MPMEs foram agrupadas em dois blocos: um para MPes e outro para MEs.

A integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos é uma demanda crescente e cada vez mais veloz para as organizações, sendo a investigação sobre a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos ainda concentrada em organizações de grande porte [Gusmão et al. (2023); Da Roit & Iannuzzi (2023)]. Em contrapartida, a investigação centrada nas MPMEs é escassa, embora todas as cadeias de suprimentos existentes dependam consideravelmente da contribuição das MPMEs como fornecedores, principalmente em países com extensos territórios e diversidades [Mue et al. (2018); Černe et al. (2023); Hurdawaty & Tukiran (2024)].

Um dos pontos relacionados à importância das MPMEs está na capacidade pulverizada de geração de empregos em larga escala, tornando seu papel

fundamental nas economias modernas na era da transformação digital [Sharma (2021); Sutrisno (2023)]. Resultados de estudos empíricos mostram que a adoção do S-I4.0 é considerada mais difícil e mais arriscada pelas MPMEs devido à sua menor capacidade de adoção das tecnologias da I4.0 em comparação com organizações de maior porte [Rojas-Berrio et al. (2022); Pandya & Kumar (2023); Xu et al. (2023)].

Estimular a adoção da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos no contexto das MPMEs, ajuda que elas superem barreiras e utilizem facilitadores, com implicações diretas em suas cadeias de valor [Tortora et al. (2021)]. Como exemplos, tem-se:

(i) Em um país desenvolvido como a Itália, onde há uma estrutura produtiva caracterizada pela presença generalizada de MPMEs, confirma-se a importância do fortalecimento dos ecossistemas de inovação da S-I4.0 [Orazi & Sofritti (2024)];

(ii) No contexto de países em desenvolvimento como a Malásia, as MPMEs se deparam com motivações e restrições para a implementação de práticas sustentáveis. Avanços nessa jornada impulsionam as MPMEs no aumento da capacidade de negócios, criação e retenção de mais valor em suas competências, com impacto positivo na competitividade [Wei et al. (2024)];

(iii) Em outro exemplo de países em desenvolvimento tem-se a Índia, onde as MPMEs que não podem suportar custos como as grandes empresas estão numa encruzilhada entre gerar soluções criativas ou adotar novas tecnologias da S-I4.0, sendo ambas essenciais para a competitividade empresarial. As necessidades das MPMEs e a urgência relacionada aos processos de inovação não estão alinhadas [Pulicherla et al. (2022)]. Como resultado, é fato que as MPMEs indianas não podem ser ignoradas no tocante ao impacto transformador na sociedade que a correta implementação da integração da S-I4.0 nas cadeias de suprimentos existentes no país trará em termos de maior eficiência e melhores resultados [Gahlaut & Dwivedi (2023)].

2.6

Lacunas endereçadas na pesquisa

Esta subseção é destinada à consolidação das lacunas de pesquisa abordadas e referenciadas nos capítulos 1 (Introdução) e 2 (Fundamentação teórica). Com o

intuito de endereçar estas lacunas, a pesquisa desta tese conduziu uma abordagem de métodos mistos, conforme detalhado no próximo capítulo 3 (Metodologia de pesquisa).

Uma lacuna dessa pesquisa está na escassez de estudos voltados para a superação dos desafios da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs. O contexto das MPMEs é abrangente às organizações do mundo todo independentemente do estágio de desenvolvimento do país onde está e atua a organização, exige tratamento diferente em relação às grandes organizações, o que aumenta a complexidade para a integração da S-I4.0 em suas cadeias de suprimentos [Birkel et al. (2018); Yazdi et al. (2019); Kumar et al. (2020); Sharma et al. (2021); Liu et al. (2023) Kumar et al. (2023); Pandya et al. (2024)].

Outra lacuna é a dificuldade que as MPMEs enfrentam para a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos, mais especificamente voltada para a importância da assertividade da identificação (inclusive das relações causais) das barreiras e dos facilitadores inerentes ao tema, além dos respectivos indicadores para cada uma dessas barreiras e facilitadores, tornando-as assim mensuráveis e mais compreensíveis para os gestores das MPMEs [Joshi et al. (2022); Abdullah et al. (2023); Taqi et al. (2023), Morella et al. (2023)]. Nesse cenário de lacunas de pesquisa sobre a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs traz-se as perspectivas dos mecanismos PPT e das dimensões TBL tanto para as barreiras quanto para os facilitadores [Müller & Voigt (2018); Khanzode et. al. (2021); Kumar et al. (2022)].

Por fim, são notáveis as dificuldades encontradas pelas MPMEs na jornada da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos, sendo que estudos apontam para a carência de ferramentas que apoiem as MPMEs nessa jornada [Pulicherla et al. (2022); Gahlaut & Dwivedi (2023); Wei et al. (2024); Orazi & Sofritti (2024)]. Pelo conjunto dessas lacunas, essa pesquisa objetiva aprofundar a dinâmica do processo de integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs ao produzir e aplicar um *framework* e um guia prático em MPEs e MEs, gerando resultados que permitem conclusões relevantes em ambientes organizacionais das MPMEs em países em desenvolvimento.

Metodologia da pesquisa

Esta pesquisa adota uma abordagem de métodos mistos (*Mixed-method approach*) - [Creswell & Creswell (2017)], combinando métodos qualitativos e quantitativos, convergindo dados na busca da compreensão mais profunda do fenômeno pesquisado estudado. A abordagem é baseada em cinco etapas: (i) Revisão de Escopo (RE); (ii) Painel de especialistas (P); (iii) Grupo Focal (GF); (iv) *Survey* (S); e (vi) MEC. Os métodos são organizados em duas partes, sendo a primeira voltada para as etapas de desenvolvimento do artefato gerencial (*framework*) proposto pela tese e a segunda voltada para a sua aplicação e validação. A Tabela 1 sintetiza esta abordagem, destacando o propósito de cada etapa e sua associação com um objetivo específico (OE) da pesquisa. A última coluna da Tabela 1 associa as etapas metodológicas com os três principais artigos associados a esta tese.

Tabela 1 – Síntese da abordagem metodológica da pesquisa.

Parte	Método	Etapas	Propósito	OE	Artigos associados
Parte 1 Desenvolvimento do artefato gerencial	Revisão de Escopo (RE)	RE1	Identificação na literatura das principais barreiras e facilitadores para integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos.	OE (i) p.1	Machado et al. (2021)
		RE2	Identificação na literatura dos indicadores críticos para cada uma das principais barreiras e facilitadores obtidos.	OE (ii) p.1	Machado et al. (2024)
	Painel c/ especialistas (P)	P1	Ajuste das barreiras e facilitadores dos identificados RE-1 para a perspectivas das MPMEs	OE (i) p.2	Machado et al. (2021)
		P2	Ajuste dos indicadores identificados em RE-2 para a perspectivas das MPMEs.	OE (ii) p.2	Machado et al. (2024)
	Grupo Focal (GF)	GF1	Obtenção do consenso e validação das principais barreiras, facilitadores identificados em P1	OE (i) p. 3	Machado et al. (2021)

Parte	Método	Etapas	Propósito	OE	Artigos associados
		GF2	Obtenção do consenso e validação dos indicadores identificados em P2	OE (ii) p.3	Machado et al. (2024)
		GF3	Aplicação <i>Fuzzy logic</i> e DEMATEL (F-DEMATEL) para obter as causalidades, dependências (efeito) e influências entre as barreiras e facilitadores obtidos em OE (i), e identificar os mais proeminentes/importantes.	OE (iii)	Machado et al. (2024)
	Survey (S)	S1	Condução da <i>Survey</i> (partes 3 e 4) para obtenção do nível de concordância dos respondentes para cada um dos indicadores críticos obtidos em RE-2, onde os respondentes podiam compreender melhor as bases de formação de cada barreira e facilitador, facilitando assim a continuidade da <i>Survey</i> .	OE (ii) p.4	Machado et al. (2024)
		S2	Condução da <i>Survey</i> (parte 5) para identificar a dominância das barreiras e facilitadores obtidos em OE (i) associada aos mecanismos PPT e as dimensões TBL revelando também suas reações de causa, de efeito e de influência relacionadas com S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs [utilizando o método de Additive Ratio Assessment (ARAS)].	OE (iv)	Machado et al. (2024)
		Combinação das etapas anteriores		Artefato gerencial para apoiar a jornada da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs.	OE (v)
Parte 2 Aplicação e validação do artefato	Múltiplo Estudo de Casos	MEC	Aplicação e validação do artefato gerencial em MPMEs para verificar sua aderência como um guia para apoiar a jornada da integração da S-I4.0.	OE (vi)	Machado et al. (2025)

Fonte: Autor.

A Figura 1 apresenta o fluxograma de interação entre as diferentes etapas apresentadas na Tabela 1, destacando a relação entre elas com suas entradas e saídas.

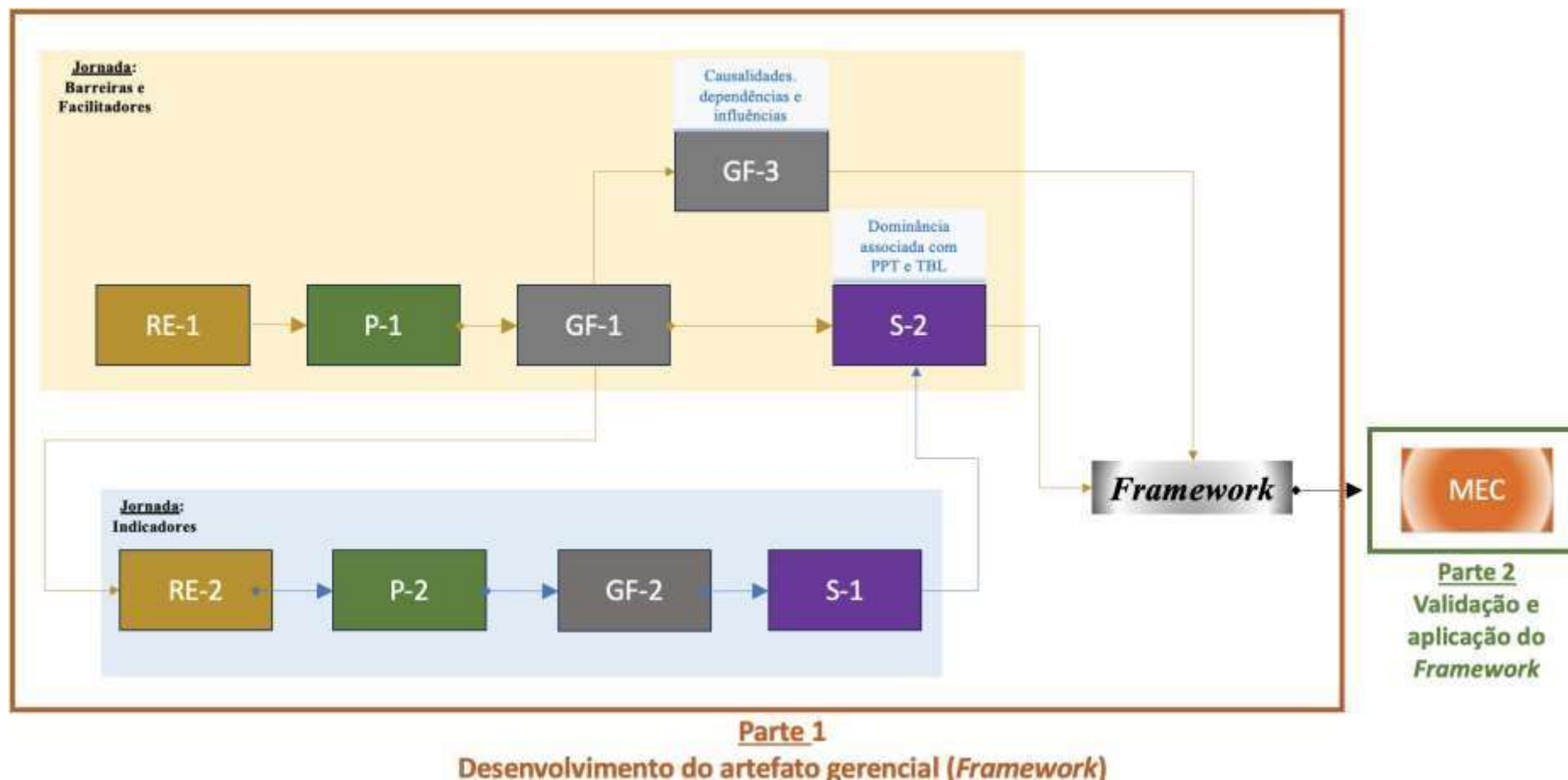


Figura 1 - Fluxograma da metodologia de pesquisa da tese.
Fonte: Autor.

3.1

Revisão de escopo (RE)

A revisão de escopo (RE) visa mapear os conceitos-chave da área pesquisada, as principais fontes, e evidências disponíveis em termos de sua natureza, características e volume, concentrando-se em itens mais abrangentes com múltiplas aplicações de estudo [Arksey & O'Malley (2005); Peters et al. (2015)]. A RE é aplicável quando a literatura ainda não foi revisada de forma abrangente ou apresenta uma natureza ampla, complexa ou heterogênea, como no caso desta pesquisa. De acordo com [Munn et al. (2018)] é mais geral do que a revisão sistemática da literatura desde sua concepção.

Nesta pesquisa conduziram-se duas revisões de escopo (RE-1 e RE-2) de acordo com as cinco etapas oferecidas por [Arksey & O'Malley (2005)]: (i) definir objetivo; (ii) identificar os documentos apropriados (por exemplo, artigos e estudos); (iii) selecionar estudos; (iv) mapear dados; e (v) agrupar e sumarizar resultados.

Em RE-1 e RE-2 adotaram-se duas bases de dados Web of Science (WoS) e Scopus para seleção de estudos relevantes devido às suas características complementares, por cobrirem domínios de pesquisa semelhantes [Mongeon & Paul-Hus (2016)] e, pelas suas relevâncias para tópicos de pesquisa em OSCM [Magon et al., (2018); Kreuter et al. (2022)].

A base e combinações das principais palavras-chave de busca adotadas para identificar estudos nas duas bases de dados basearam-se em [(“Industry 4.0” or “Smart Manufacturing”) AND (“sustainab*” or “green”) AND (“supply chain” or “SCM”)]. Faz-se importante observar que, no caso do RE-2 (indicadores), foram acrescentadas palavras-chave associadas a cada uma das barreiras e facilitadores gerando um acréscimo no número de artigos da amostra (OR “indicators”). Essas buscas foram aplicadas aos títulos, resumos e palavras-chave dos conteúdos dessas duas bases de dados, sem considerar o porte das empresas devido à escassez de estudos específicos no contexto das MPMEs.

Os critérios de exclusão para seleção dos estudos consistiram em estudos revisados por pares, não publicados em periódicos e sem associação com barreiras e facilitadores (RE-1) e indicadores (RE-2) associados à integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos.

Ambas as revisões de escopo (RE-1 e RE-2) utilizaram o modelo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis*) desenvolvido por [Moher et al. (2009)] para apresentação transparente da identificação e processo completo de seleção dos estudos [Page et al. (2021); Tricco et al. (2018)].

A primeira revisão de escopo (RE-1) examinou a literatura disponível para selecionar as barreiras e facilitadores relacionados a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos, como em [Saroja et al. (2021)]. A partir da identificação e análise das lacunas do conhecimento e das evidências disponíveis, o objetivo dessa RE-1 foi centrado na identificação das barreiras e dos facilitadores [Munn et al. (2018)] relacionadas ao conceito da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs. Na RE-1 a seleção de estudos contou somente com publicações na língua inglesa e o recorte temporal selecionado até setembro de 2020, sendo a abordagem ‘*snowball*’ [Thomé et al. (2016)], com novo corte até janeiro de 2021.

A Figura 2 apresenta as etapas de identificação e seleção dos estudos para RE-1. O processo começa com a identificação de 202 estudos (sendo 93 da base Scopus e 109 da base WoS). Foram removidos 33 estudos em duplicidade. Outros 100 retirados devido aos critérios de exclusão aplicados aos resumos, e outros 49 excluídos da amostra após análise dos textos completos. Seguindo [Thomé et al. (2016)], uma ‘*snowball*’ foi conduzida com pesquisas para frente e para trás (*backward and forward*), recuperando sete estudos adicionais. O processo completo resulta na seleção de 27 publicações.

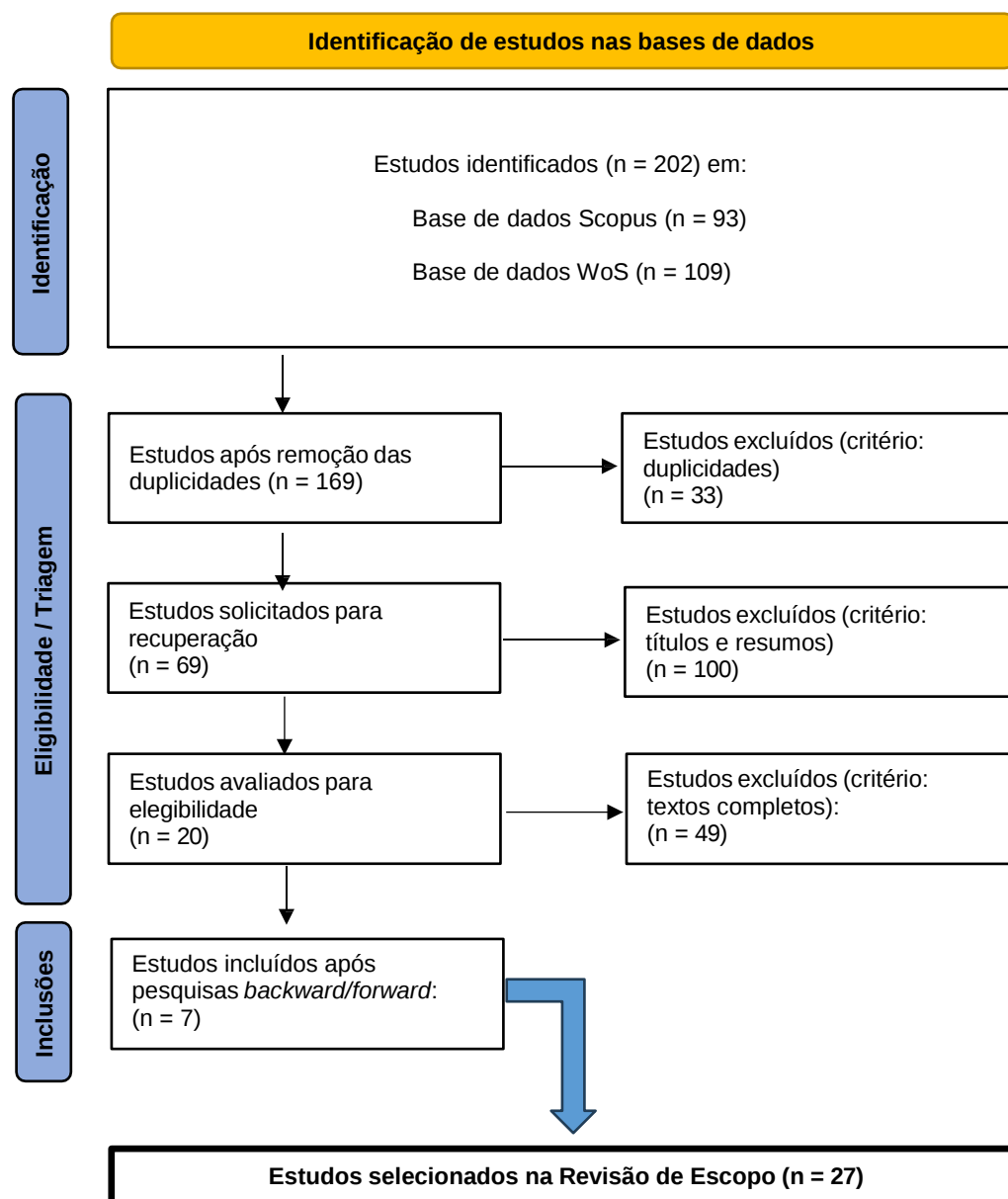


Figura 2 – PRISMA para Revisão de Escopo 1.
Fonte: Adaptado de Page et. al. (2021).

Na RE-2 a seleção de estudos também contou somente com publicações na língua inglesa. O recorte temporal selecionado foi o período entre 2015 e 2022. A primeira triagem da literatura foi realizada em julho de 2022 e a última triagem visando atualização da amostra foi realizada em janeiro de 2023.

A Figura 3 apresenta as etapas de identificação e seleção dos estudos para o RE-2, também fundamentado no PRISMA. O processo começa com a identificação de 569 estudos (sendo 268 da base Scopus e 391 da base WoS). Foram removidos 120 estudos em duplicidade. Outros 365 foram retirados devido aos critérios de exclusão aplicados aos resumos, e outros 82 excluídos da amostra após análise dos textos completos. A bola de neve (*snowball*) foi novamente conduzida com

pesquisas para frente e para trás, recuperando 55 estudos adicionais. O processo completo resulta na seleção de 147 publicações.

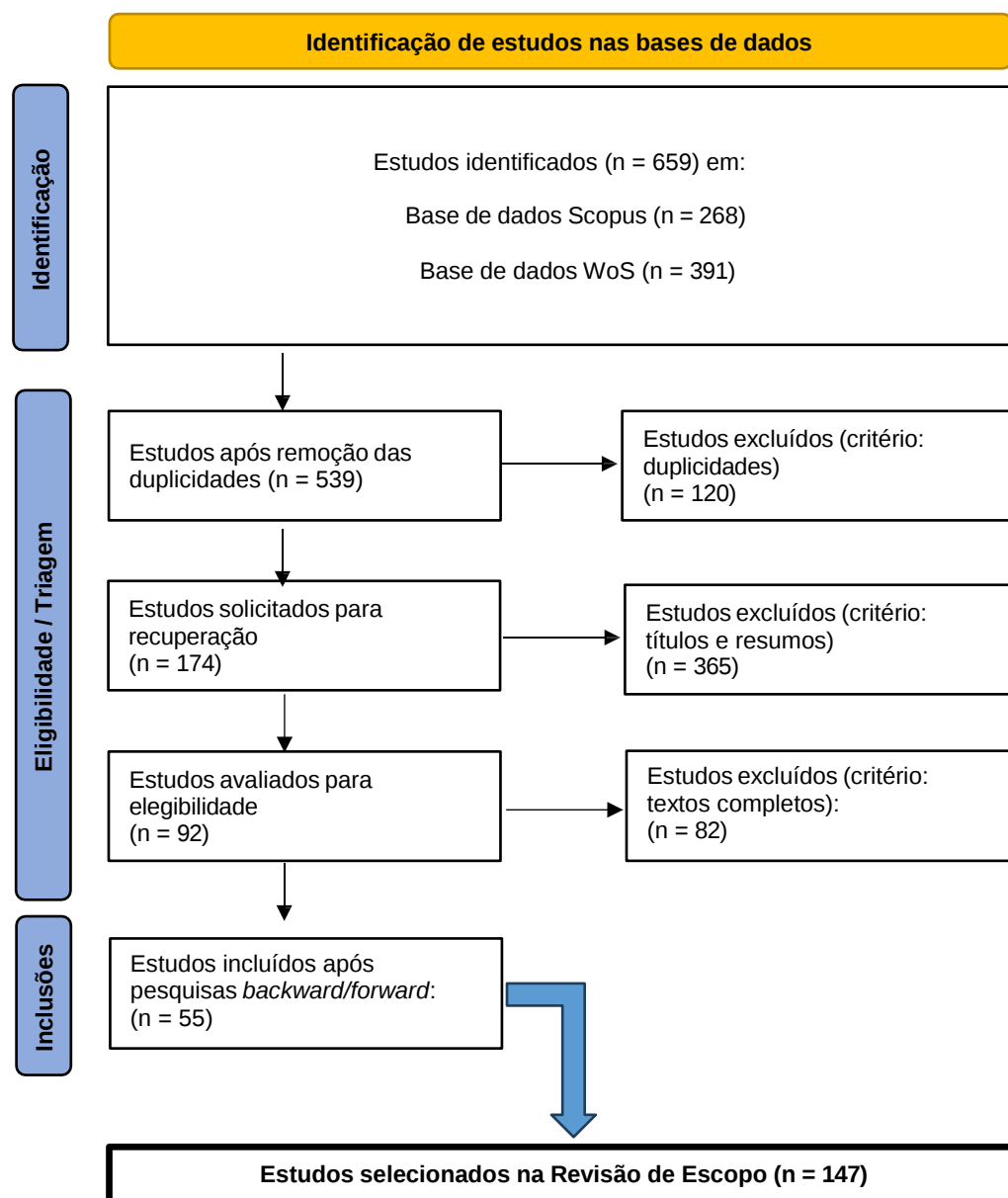


Figura 3 – PRISMA para Revisão de Escopo 2.
Fonte: Adaptado de Page et. al. (2021).

Os resultados obtidos em RE-1 e RE-2 foram agrupados e resumidos, auxiliados por uma síntese narrativa e análise de conteúdo [Thomé et al. (2016); Ceryno et al. (2013)] desenvolvendo categorias para as principais barreiras, facilitadores e, conseqüentemente contemplaram seus respectivos indicadores, a partir do exame detalhado de todos os estudos selecionados.

3.2

Painel com especialistas (P)

Nesta etapa metodológica, pós RE-1 e RE-2, foram envolvidos especialistas com experiência simultaneamente em I4.0, Sustentabilidade/SSCM, e MPMEs, buscando ajustar os resultados obtidos anteriormente à perspectiva das MPMEs. Dois painéis foram realizados, conforme apresentado na Tabela 1, sendo o primeiro focado na jornada das barreiras e facilitadores (P-1) e o segundo na jornada dos indicadores destas barreiras e facilitadores (P-2).

A escolha dos especialistas se deu no contexto de países em desenvolvimento, dada sua criticidade latente, pois seus ambientes de negócios são significativamente constituídos por MPMEs, com legislações específicas para fomento do emprego, renda e geração de atividades inovadoras, sendo as MPMEs fundamentais na matriz econômica devido à sua capacidade como geradoras de emprego e renda pulverizada [Martinez-Olvera & Mora-Vargas (2019); Jovel·lopi·s & Segarra-Blasco (2018)]. É importante ressaltar que em diversos momentos essa pesquisa abrange o contexto de países em desenvolvimento, o que é uma limitação de escopo que poderá ser endereçada em pesquisas futuras. Os especialistas escolhidos são do Brasil, sendo esse um país em desenvolvimento importante e significativo no cenário regional e mundial [Scavarda et al. (2010); Azevedo et al. (2019); Azevedo et al. (2021)].

Cada especialista indicou o predomínio de experiência própria em MPMEs nas opções ‘micro e pequenas empresas’, ‘médias empresas’ ou ‘Todas (micro e pequenas e médias empresas)’. Como as MPMEs geralmente possuem um modelo de negócios particular e focado, elas permitem declarações generalizáveis para toda a organização a partir de um único especialista para cada organização [Müller & Voigt (2018); Kull et al. (2018); Flynn et al. (1990)]. Isto é difícil ocorrer em organizações maiores, pois as declarações são limitadas à perspectiva de um informante que não consegue captar plenamente os aspectos organizacionais.

A condução dos painéis contou com o autor desta tese como moderador, de forma a ampliar a probabilidade de sucesso de sua condução [Plummer (2017)].

No painel de especialistas P-1 as listas de barreiras e facilitadores obtidas na RE-1 foram utilizadas como base para uma primeira rodada de entrevistas individuais por meio de questionário. O questionário foi distribuído com garantia

de anonimato para os especialistas, sendo possível a revisão das próprias respostas em rodadas subsequentes até que o consenso fosse alcançado [Flynn et al. (1990)], com objetivo de ajustar as barreiras e facilitadores identificados em RE-1 para integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos sob a perspectiva das MPMEs. Esta etapa foi apoiada por especialistas para ajustar as listas de barreiras e facilitadores, sendo possível encontrar novas barreiras e facilitadores em consenso, baseado em opiniões e experiências profissionais [Saroja et al. (2021)].

Assim, as barreiras e os facilitadores identificados foram discutidos em painéis de especialistas [Jassbi et al. (2011)] visando gerar uma lista final das barreiras e facilitadores aderentes à realidade das MPMEs. Adotou-se um questionário (Apêndice A) com escala *Likert*, aplicado em duas rodadas, seguindo o conjunto de cinco diretrizes para construção de instrumentos da escala *Likert* de [Nemoto et al. (2014)]: (i) compreender construto; (ii) desenvolver itens; (iii) determinar o espaço de resultados; (iv) especificar o modelo de classificação; (v) coletar feedback e teste piloto do questionário. O objetivo ao seguir essas diretrizes foi desenvolver o questionário utilizando a escala *Likert*, no caso, uma escala de sete itens, para produzir dados conformes e, conseqüentemente, quais interpretações válidas, possibilitando indicar tanto as barreiras quanto os facilitadores classificados nas seguintes opções: () Nenhuma () Muito Baixa () Baixa () Média () Alta () Muito Alta () Totalmente.

Antes de responder ao questionário, cada especialista reuniu-se com o autor desta tese para esclarecer o escopo, os procedimentos e tirar dúvidas. A duração média da primeira rodada do painel de especialistas foi de 1h15min (Apêndice A1 contém o questionário utilizado) e a segunda rodada durou em média 15min (Apêndice A2 contém o questionário utilizado). Todos os especialistas participam das duas rodadas. A primeira seção do questionário inclui o termo de consentimento, objetivos, procedimentos e glossário. A segunda seção diz respeito ao perfil do especialista, enquanto a terceira seção diz respeito às barreiras e a quarta aos facilitadores. Inicialmente, são elencados barreiras e facilitadores desde a aplicação do questionário primário até a primeira rodada de entrevistas individuais. É importante ressaltar que este questionário continha perguntas abertas para barreiras e facilitadores. Os especialistas foram autorizados a indicar novas barreiras e facilitadores que consideraram faltar no relacionamento inicial e que eram relevantes para as MPMEs. Estas novas barreiras e facilitadores foram as bases para

a segunda rodada com os especialistas. O questionário do Apêndice A2 baseou-se no questionário do Apêndice A1, sendo customizado para as novas evidências trazidas pelos especialistas com experiências acumuladas em suas trajetórias profissionais em I4.0, Sustentabilidade/SSCM, e MPMEs. Foram realizadas 30 entrevistas individuais com especialistas, cinco das quais foram desconsideradas porque não foram consideradas as respostas dos especialistas sem experiência em pelo menos uma dessas três áreas. Portanto, ao final, foram consideradas para a pesquisa evidências de 25 respostas dos especialistas.

No painel de especialistas P-2 os resultados da literatura foram complementados por dados empíricos obtidos de profissionais experientes em S-I4.0 e MPMEs, com o objetivo de ajustar indicadores identificados em RE-2 para integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos sob a perspectiva das MPMEs. A primeira rodada de interação do P2 durou em média de 75 minutos, onde especialistas das indústrias forneceram suas visões profissionais, compreensão e percepções práticas, combinadas e revisadas em rodadas subsequentes até que um consenso fosse alcançado [Flynn et al. (1990)]. Este painel contou com sete profissionais de MPMEs, sendo o processo orientado pelos indicadores agrupados por barreiras e facilitadores. Incluiu-se uma introdução, um termo de consentimento formal, os principais objetivos da pesquisa e glossário. O autor desta tese forneceu uma breve introdução e explicou os principais conceitos, as barreiras, os facilitadores, e os indicadores antes que o painel começasse a evoluir, sempre respeitando o alinhamento em relação à compreensão dos tópicos, para evitar mal-entendidos que pudessem afetar os resultados. Além de haver a possibilidade de remover indicadores da lista ou movê-los para outros grupos, os especialistas também foram incentivados a fornecer novos indicadores aplicáveis às MPMEs caso percebessem a necessidade a partir das listas iniciais.

3.3

Grupo Focal (GF)

Conforme apresentado na Tabela 1 na abertura do Capítulo 3, foram realizados três grupos focais (GF-1, GF-2 e GF-3). GF-1 e GF-3 estão associados a jornada das barreiras e facilitadores, enquanto GF-2 está associado a jornada dos indicadores críticos de cada uma das barreiras e facilitadores.

A pesquisa buscou o consenso através da metodologia de GFs, considerando-os unidades fundamentais de análise por meio de especialistas homogêneos e um moderador preparado para estimular a discussão construtiva [Massey (2011)]. Assim como nos painéis, os GFs também contaram com o autor desta tese como moderador como forma de ampliar sua probabilidade de sucesso [Plummer (2017)]. A escolha de usar GFs se deu porque eles permitem perguntas destinadas a avaliar a influência e a prioridade das barreiras e dos facilitadores no contexto das MPMEs, no caso do GF1, além de criarem ambientes para discussões aprofundadas, englobando no caso do GF2 os indicadores. Os GFs são semelhantes aos painéis de especialistas, no entanto, são estruturados para respostas e trocas verbais, e não por escrito. Assim, todos do grupo têm conhecimento da origem das respostas. Antes da reunião, o grupo recebe o conteúdo a ser trabalhado. O moderador conduz com habilidade para que cada especialista possa expressar sua opinião. A discussão é permitida, estimulada e controlada por este moderador, sempre com o objetivo de obter consenso [Flynn et al. (1990)]. Os GFs capturam as experiências, observações e opiniões dos participantes, permitindo que os pesquisadores percebam valor durante e após a realização das atividades [Massey (2011)]. Portanto, novas informações que não estavam disponíveis proporcionam uma maior compreensão dos temas abordados, refinando barreiras e facilitadores na perspectiva das MPMEs. Os GF1 e GF2 também permitiram que o pesquisador abordasse as descobertas com mais precisão, permitindo uma melhor compreensão dos fenômenos. O consenso é a principal característica produzida no trabalho com GFs, sobrepondo-se às opiniões individuais dos participantes [Stokes & Bergin (2006)].

Para GF-1 e GF-3 foram formados dois grupos com seis especialistas cada, cada um com experiência nos três itens abordados: (i) SSCM; (ii) I4,0; (iii) MPMEs. Nestes três itens foi aplicado peso de 1/3 (um terço ou 33,33%) do peso total 1 (um

ou 100%), adotando-se um critério de três níveis, seguindo os parâmetros apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Experiência dos especialistas e pesos.

ITEM	SSCM/Sustentabilidade	I4.0	MPMEs
Peso	33,33% (1/3)	33,33% (1/3)	33,33% (1/3)
Nível 'peso = 1' (experiência)	<= 4,9 anos	<= 2,9 anos	<= 9,9 anos
Nível 'peso = 2' (experiência)	5 a 9,9 anos	3 a 5,9 anos	10 a 20,9 anos
Nível 'peso = 3' (experiência)	>= 10 anos	>= 6 anos	>= 21 anos

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

Para quantificar a relação entre os fatores de avaliação, eles fornecem suas avaliações linguísticas na forma de conjuntos *fuzzy* intuicionistas, representando quais fatores têm relação direta entre si [Han & Deng (2018)]. O método DEMATEL identifica a relação causa-efeito dos critérios relacionados ao problema, sendo eficaz para visualizar a estrutura de relações causais complicadas com matrizes ou dígrafos, que por sua vez retratam uma relação contextual entre os elementos do sistema, em que um numeral representa a força de influência, tornando o relacionamento estruturado e inteligível. Para estabelecer um modelo estrutural de julgamentos de especialistas, às suas respectivas preferências e importância são atribuídos valores notáveis, que por sua vez são inadequados no mundo real, pois são muitas vezes obscuros e difíceis de estimar por valores numéricos exatos, criando assim a necessidade de lógica fuzzy [Lin & Wu (2004)]. A relação causa-efeito entre as barreiras e facilitadores foi revelada pelo método DEMATEL. Cada um dos especialistas envolvidos no grupo focal utiliza um termo linguístico convertido em um número de 0 (zero) a 4 (quatro) que possui um valor linguístico correspondente (número fuzzy triangular), conforme apresentado na Tabela 3, com base em [Bathia et al. (2020)].

Tabela 3 – Correspondência de termos linguísticos e valores.

Termo Linguístico	Valor nítido (‘crisp’)	Número Fuzzy
Influência muito alta (MA)	4	(0,75 / 1,00 / 1,00)
Influência alta (A)	3	(0,50 / 0,75 / 1,00)
Influência baixa (B)	2	(0,25 / 0,50 / 0,75)
Influência muito baixa (MB)	1	(0,00 / 0,25 / 0,50)
Influência nula (N)	0	(0,00 / 0,00 / 0,25)

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

Foram criadas duas matrizes a partir das avaliações realizadas por especialistas, com as principais barreiras e facilitadores de cada uma das categorias identificadas. Cada uma das matrizes abordou um grupo empresarial específico: (i) micro e pequenas empresas (MPEs); (ii) médias empresas (MEs). Cada categoria foi representada pela sua principal barreira ou facilitador. Os seis especialistas de cada grupo focal chegaram a um consenso para que a avaliação pudesse ser inserida na planilha.

O primeiro grupo focal de especialistas com concentração de experiência acumulada em MPEs teve duração de 03h15min e consenso obtido na maioria dos casos sem necessidade de intervenção do moderador.

O segundo grupo focal de especialistas com concentração de experiência acumulada em MEs, teve duração de 2h30min, e foi obtido consenso na maioria dos casos sem necessidade de intervenção do moderador.

Nesta pesquisa, a teoria dos conjuntos difusos também foi incorporada ao DEMATEL para superar a imprecisão e o viés das decisões dos especialistas [Zadeh (1965)]. O método *Fuzzy-DEMATEL* foi aplicado para avaliar a relação causal entre barreiras e facilitadores utilizando informações de especialistas. De acordo com [Haleem et al. (2019)], as avaliações de especialistas contêm imprecisões e subjetividade, e a teoria *fuzzy* aborda diretamente essa questão, conforme indicado por [Sufiyan et al. (2019)]. Com base em [Bathia et al. (2020); Raj et al. (2020)], o DEMATEL tem uma vantagem sobre outros métodos de tomada de decisão multicritério (MCDM) e modelagem de estruturação interpretativa (ISM), pois revela as inter-relações dos fatores, prioriza e separa-os em grupos de causa-efeito.

A apresentação dos resultados na forma de matrizes e gráficos também foi eficiente para lidar com as complexas relações de causa-efeito entre os fatores, que no caso desta pesquisa são as barreiras e os facilitadores. Portanto, o Fuzzy-DEMATEL foi aplicado nesta pesquisa com base nas etapas adotadas oferecidas em [Bathia et al. (2020); Raj et al. (2020); Khan & Haleem (2020); Kouhizadeh et al. (2021); Mamikhani et al. (2014)], conforme apresentado em seguida:

Criar a correspondência de termos e valores linguísticos (Tabela 3);

Agregar resultados e obter uma matriz fuzzy de relação direta pareada (X);

Normalizar matriz de relações diretas e calcular matriz de relações totais (T);

Determinar somas de linhas e colunas de T;

Determinar os valores globais de destaque e efeito líquido dos fatores ($D + R$ e $D - R$); (vi) Formular os diagramas de causa-efeito DEMATEL.

Cada etapa incorpora múltiplas avaliações matemáticas. Os valores de proeminência e efeito líquido de cada fator são resultados da análise fuzzy-DEMATEL [Kouhizadeh et al. (2021)]. O valor de destaque final classifica os fatores. Detalhes adicionais sobre a metodologia fuzzy-DEMATEL no Apêndice B e os valores aparecem na Tabela 3. A partir de uma matriz identidade ' $n \times n$ ', temos R sendo a soma das linhas e D sendo a soma das colunas da matriz T, ($D+R$) é colocado em destaque, indicando o destaque dos fatores no sistema, e ($D-R$) representando a importância da influência de cada fator, conforme apresentado na Figura 4.

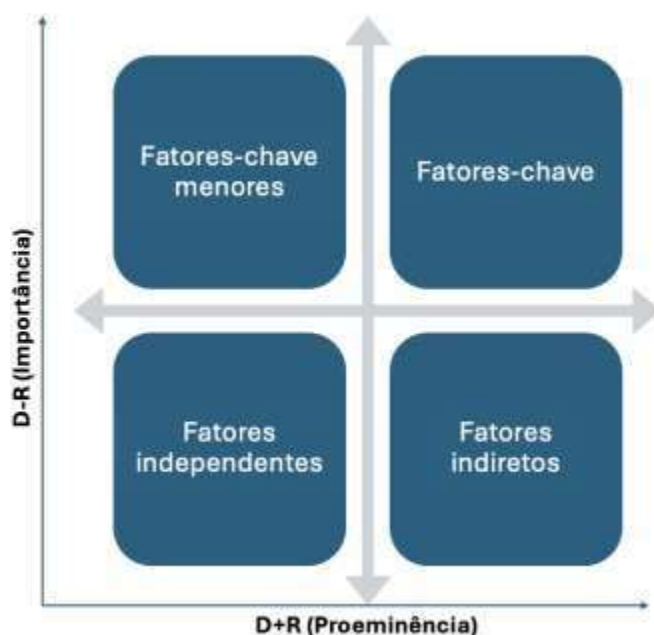


Figura 4 – Mapa DEMATEL.
Fonte: Adaptado de Han & Deng (2018).

Pós-P-2 foi realizada segunda rodada de interação de GF (GF-2) com os mesmos sete especialistas dentro da abordagem de grupo focal [Krueger & Casey (2014)] para cada uma das principais barreiras e dos principais facilitadores para integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs. Esta atividade foi realizada em duas etapas para garantir visão consensual, cada uma com duração de 120 minutos, de forma remota por meio da plataforma Zoom.

3.4

Survey (S)

A próxima abordagem metodológica baseou-se em questionário (Apêndice C) organizado com base nas diretrizes para construção de instrumentos em escala Likert [Nemoto & Beglar (2014)], sempre necessário uma escala, composta por: (i) compreensão do construto; (ii) desenvolvimento de itens; (iii) a determinação do espaço de resultados; (iv) especificação do modelo de classificação; e (v) feedback e teste piloto do questionário. A última etapa de feedback e testes foi realizada com os sete especialistas do P-2 para verificar a adequação da linguagem utilizada, a clareza dos temas e o tempo necessário para seu cumprimento integral.

Em relação aos respondentes do Survey, eles foram abordados de múltiplas formas: e-mail das bases dos autores, grupos profissionais de *whatsApp* e seleção

de grupos temáticos no *LinkedIn* focados nos temas desta pesquisa (e.g., Compras e *Supply Chain* Sustentáveis, Indústria 4.0 Ecosistema, Negócios Digitais e Indústria 4.0, Quarta Revolução Industrial, Indústria 4.0, Digitalização, Robótica Industrial, Manufatura Inteligente, Projetos, Empregos e Carreiras). Em todas as abordagens, as pessoas impactadas foram incentivadas a replicar o convite para pessoas que pudessem atender ao perfil desejado dos respondentes. Ao final, a Survey contou 55 respostas válidas.

O questionário seguiu as orientações fornecidas por [Forza (2002)] composto de cinco partes. A Parte 1 é composta por um termo de consentimento livre e esclarecido, incluindo a responsabilidade pela pesquisa, seus objetivos e principais procedimentos, e um glossário com os principais termos utilizados. A Parte 2 refere-se às informações gerais. A Parte 3 traz os indicadores das barreiras à integração sustentável da I4.0 nas cadeias de abastecimento das MPMEs, enquanto a Parte 4 traz os indicadores dos facilitadores. As partes 3 e 4 aplicam uma escala Likert de cinco pontos (desde discordo totalmente até concordo totalmente), visando validar os indicadores críticos obtidos nas abordagens metodológicas de pesquisa anteriores. A escala de barreira é adaptada de [Caiado et al. (2022); Mishra et al. (2022); Kashyap & Shukla (2023); Wagire et al. (2021)]. Além disso, a escala para facilitadores é considerada na perspectiva de [Globakhloo et al. (2022); Subramanian et al. (2021); Krishnan et al. (2021)]. A Parte 5 abrange a integração da sustentabilidade I4.0 e TBL nas cadeias de abastecimento de MPMEs a partir das perspectivas dos mecanismos PPT e das dimensões TBL, revelando seus respectivos níveis de impacto, e aplica uma escala Likert de 5 pontos: “nenhum ou muito leve”, “leve”, “moderado”, “forte” e “muito forte”, adaptado de [Zhao et al. (2021), Shah et al. (2020)]. O Apêndice C apresenta o questionário utilizado.

Para a análise dos resultados do Survey foi utilizado um método de tomada de decisão multiatributo (MADM) [Schery et al. (2023)] denominado método *Additive Ratio Assessment* (ARAS), que visa lidar com informações de avaliação que possuem diferentes unidades de medida [Zavadskas & Turkis (2010)]. A técnica consiste em cinco etapas: (i) formalização da matriz de tomada de decisão; (ii) normalização de dados; (iii) cálculo da matriz ponderada normalizada; (iv) função de otimização; e (v) determinação do grau de utilidade e derivação da classificação final. O método ARAS é elogiado por sua simplicidade e brevidade, tornando-o uma abordagem fácil de usar dentro do domínio do MADM [Yu et al.

(2023)]. Ele pode converter exclusivamente atributos qualitativos em quantitativos, fornecendo assim uma análise mais abrangente [Liu & Cheng (2019)]. Além disso, o método ARAS garante a independência dos atributos, um fator crítico nos processos de tomada de decisão. Suas diversas aplicações, como no recrutamento e seleção de pessoal, demonstram sua versatilidade [Yu et al. (2023)]. A robustez e a confiabilidade do método ARAS foram validadas através da consistência da classificação final das práticas e da importância dos critérios com os resultados de pesquisas anteriores [Goswami et al. (2021)]. Comparado com outros métodos MADM, o ARAS possui várias vantagens. Embora todos os métodos MADM visem avaliar um conjunto finito de alternativas com base em múltiplos objetivos conflitantes [Yu et al. (2023)], a capacidade do método ARAS de lidar com atributos qualitativos e quantitativos o diferencia [Liu & Cheng (2019)]. Além disso, a eficiência de tempo do método ARAS é uma vantagem significativa na implementação em tempo real e em ambientes dinâmicos [Avvildiz & Ekinici (2023)]. O método ARAS é aplicado para apoiar problemas complexos de tomada de decisão e escolher a melhor alternativa através do indicador relativo (ou seja, grau de utilidade), que pode refletir a diferença entre as alternativas e a solução ideal e descartar a influência de diferentes unidades de medida [Liu & Xu (2023)]. Portanto, as características e vantagens do método ARAS tornam-no uma ferramenta valiosa no domínio do MADM a ser aplicada nesta pesquisa. Neste estudo, este método foi adaptado considerando os resultados de proeminência e relações de causa/efeito obtidos com o método DEMATEL.

Importante ressaltar os objetivos das etapas da Survey (S-1 e S-2). A S-1 foi associada a obtenção do nível de concordância dos respondentes para cada um dos indicadores críticos obtidos em RE-2, onde os respondentes podiam compreender melhor as bases de formação de cada barreira e facilitador, facilitando assim a continuidade da Survey. A S-2 foi associada aos níveis de impacto associados aos mecanismos PPT e as dimensões TBL revelando também as dominâncias existentes, no tocante as barreiras e facilitadores relacionados com S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs, utilizando o método de *Additive Ratio Assessment* (ARAS).

3.5

Múltiplo Estudo de Casos (MEC)

Enquanto as etapas metodológicas anteriores desenvolveram a base do Framework para apoiar a jornada da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs, a sua aplicação e validação ocorreu por meio de um MEC, assim como a produção do respectivo guia prático. Sua condução foi baseada nas etapas de Yin (1994), sendo elas: (i) Projetar o MEC; (ii) Conduzir o MEC; (iii) Analisar as evidências do MEC; (iv) Desenvolver as conclusões, recomendações e implicações.

A pesquisa utilizou a metodologia do múltiplo estudo de casos (MEC) devido às suas inúmeras vantagens em aumentar a profundidade, abrangência e confiabilidade dos achados da pesquisa, conforme destacado por Ding & Hernández (2023). Esse método não apenas fortalece o rigor da investigação, mas também oferece um quadro teórico abrangente e versátil para aplicação e avaliação de conceitos teóricos em diversos cenários. Ao adotar essa abordagem, o estudo obtém uma perspectiva enriquecida, proporcionando insights substanciais que são valiosos tanto para pesquisadores acadêmicos quanto para profissionais setoriais, conforme observado por Kreuter et al. (2022), Biancone et al. (2023) e Butt et al. (2024).

O método de pesquisa seguiu as diretrizes estabelecidas por Yin (1994, 2014), cujo framework é amplamente reconhecido por sua confiabilidade, tendo sido extensivamente testado e valorizado por seus processos sistemáticos e rigorosos. Esses processos são particularmente eficazes para analisar fenômenos complexos em seus contextos autênticos e reais. Para garantir conformidade ética e transparência, foi preparado um formulário detalhado de consentimento, que foi fornecido aos principais representantes das MPMEs para assinatura antes do início das entrevistas. As entrevistas foram conduzidas utilizando um roteiro estruturado, que incluía uma série de perguntas cuidadosamente elaboradas. Algumas dessas perguntas conduzidas pelo pesquisador foram complementadas com lembretes adicionais para incentivar e obter respostas mais aprofundadas. Essa abordagem de pesquisa foi predominantemente explicativa, pois buscou revelar e elucidar as realidades intrincadas dos ambientes empresariais enfrentados pelas empresas participantes. Ao mesmo tempo, o estudo incorporou um componente descritivo significativo, capturando e ilustrando de forma eficaz os fenômenos distintos observados em cada ambiente empresarial. Além disso, analisou sistematicamente

as relações de causa, efeito, e de influência associados às principais barreiras, facilitadores e seus respectivos indicadores em relação à integração do S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs. Ao combinar esses elementos explicativos e descritivos, o estudo proporcionou uma compreensão abrangente do tema.

O MEC utilizou duas teorias consolidadas: (i) Practice-Based View (PBV), e (ii) Dynamic Capabilities Theory (DCT), principalmente devido ao contexto dessa pesquisa relacionado ao ambiente em que as MPMEs operam, tornando-as lentes particularmente relevantes devido à natureza dinâmica das atividades dessas organizações. A visão baseada em práticas (PBV) é essencial na gestão estratégica, destacando o papel das práticas organizacionais no desempenho e na vantagem competitiva. Diferente da visão baseada em recursos (em inglês, Resource-Based View - RBV), que foca em ativos tangíveis, a PBV enfatiza atividades dinâmicas que maximizam o uso desses recursos. Principais aspectos incluem: foco nas práticas, contexto e interação, desempenho e replicação, e capacidade dinâmica para adaptação [Foss & Ishikawa (2007); Tian et al. (2023)]. A PBV vê as organizações como entidades dinâmicas que refinam práticas para responder a desafios internos e externos, promovendo vantagem competitiva sustentável e melhor desempenho [Skalli et al. (2024); Shahzadi et al. (2024)]. Esta pesquisa adota a perspectiva PBV para analisar como práticas específicas afetam a sustentabilidade e a interação entre tecnologias digitais, práticas de SSCM e seus resultados [El-Garaihy et al. (2022)]. A integração da PBV com a S-I4.0 melhora a aplicação de práticas SSCM-4.0, gerando novos resultados de desempenho [Belhadi et al. (2021); Schilling & Seuring (2023)]. Apresentada por Teece et al. (1997), a Teoria das Capacidades Dinâmicas (DCT) aborda como organizações podem se adaptar em ambientes de mudanças rápidas, indo além da Resource-Based View (RBV) ao focar na reconfiguração de recursos para manter a competitividade [Ambrosini & Bowman (2009); Teece et al. (2007); Teece (2014)]. A DCT é especialmente relevante na integração da S-I4.0 para MPMEs em suas cadeias de suprimentos. A DCT identifica três processos principais: (i) Identificar oportunidades e ameaças (Sensing); (ii) Mobilizar recursos para respostas rápidas (Seizing); (iii) Reconfigurar ativos organizacionais para manter relevância e competitividade (Transforming) [Teece et al. (2007)]. Além disso, inclui capacidades adaptativas (alinhar recursos às mudanças), de absorção (reconhecer e aplicar conhecimento externo) e inovativas (criar produtos, serviços ou processos)

[Pinto et al. (2023); Kong & Feng (2024)]. Essas capacidades são cruciais para organizações prosperarem em mercados dinâmicos e incertos [Teece (2014); Liu et al. (2024)]. Para MPMEs, a DCT destaca: (i) Adaptabilidade em ambientes de mudança; (ii) Eficiência no uso de recursos limitados; (iii) Inovação em produtos e serviços; (iv) Integração de conhecimento de diferentes fontes; (v) Posicionamento estratégico; (vi) Sustentabilidade para práticas empresariais atraentes a consumidores conscientes. Essas características são essenciais para a agilidade e a sobrevivência das MPMEs em mercados em constante evolução [Pertheban et al. (2023); Tarihoran et al. (2023); Beigi et al. (2023)].

3.5.1

Seleção das MPMEs

O múltiplo estudo de casos incluiu a escolha da amostra das organizações por porte das MPMEs, sendo três MPEs e três MEs conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Empresas envolvidas no múltiplo estudo de caso.

Empresa / Receita anual	Indústria	Descritivo	Posição na Cadeia de suprimentos
MPE1 € 2 milhões/ano	Call/Contact center & serviços	Fundada em 1996 e reconhecida como uma boutique de serviços pelo mercado brasileiro, sendo um fornecedor de elevado padrão da qualidade para soluções de Contact Center e TIC do país, conta com competência da sua equipe multidisciplinar, com experiência multissetorial no fornecimento de equipamentos, soluções e serviços de players globais de tecnologia. Desde 2021 só atua no setor privado.	Considerada fornecedora de serviços e soluções de alto valor agregado e elevado padrão de qualidade para grandes e médias empresas. Compradora de produtos, serviços e soluções que viabilizam sua própria prestação de serviços. Ganha mais relevância para fornecedores de grande porte quando os envolve em projetos de maior complexidade para clientes finais que também são de grande porte ou possuem marca com alto valor percebido.
MPE2 € 0,3 milhão/ano	Educação	Fundado em 2013 e reestruturada em 2021. Depois de um período de reflexão sobre a atual situação educacional brasileira, os aspectos da pandemia e a situação econômica em nosso continente, atua em todo mercado nacional com aliança estratégica com universidades do Mercosul. Foco na formação de mestres e doutores em Administração, Ciências da Educação, Ciências Jurídicas e Saúde Pública, e realiza cursos e seminários voltados para pós-graduação.	Considerada fornecedor de pequeno porte pelas instituições de ensino que representa. Cresce em importância conforme consegue aumentar o número de alunos matriculados. Em sua maioria, seus clientes são pessoas-físicas servidores públicos que buscam graus superiores para maior valorização em suas carreiras. Compradora de serviços e soluções que são elos em sua prestação de serviços. Um dos mais importantes é a validação de diplomas internacionais em instituições de ensino reconhecidas no Brasil (serviço esse considerado o mais crítico para quem cumpre todas as etapas e exigências acadêmicas).
MPE3 € 1 milhão/ano	Tecnologia da informação e comunicação (T.I.C.)	Especializada em tecnologias de comunicação (voz e dados) e interatividade entre homem e máquina. Possui robusta infraestrutura para transacionar operações de vendas e atendimento no segmento de telecom, através de um ecossistema multiplataforma. Atua em parceria com operadoras de telecom desde 1997, no desenvolvimento e implantação de projetos para geração de tráfego, venda de SVA e recarga de toda a base nacional de usuários pré e pós-pago.	Considerada fornecedor de pequeno porte, mas de alto valor agregado pelos seus clientes que não na grande maioria pessoas jurídicas do setor das telecomunicações e setor da comunicação no Brasil. Compradora de produtos, serviços e soluções que modelam a sua prestação de serviços. Normalmente compra de grandes e renomadas empresas de tecnologia visando aumento da confiabilidade e do nível de serviços em sua própria prestação e serviços.

ME1 € 25 milhões/ano	Microbiologia	Atua no mercado de laboratórios, hospitais e indústrias de alimentos desde 1987. Pioneira na introdução da tecnologia dos meios de cultura prontos para o uso, no Brasil, a empresa está presente no mercado de laboratórios, hospitais e indústrias de alimentos, bebidas, cosméticos e farmacêuticas.	Considerada fornecedora estratégica para diversos tipos de grandes indústrias principalmente farmacêutica e alimentos/bebidas pois produz meios de cultura/coleta fundamentais para diagnósticos clínicos e definição de tratamentos específicos. Tem uma estratégia de carteira diversificada de clientes pulverizando assim seu risco e diminuindo a pressão por custos menores que recebe com constância. Compradora de produtos (mais fortemente matérias-primas) e serviços (transporte climatizado). Compra de empresas de todos os portes.
ME2 € 12 milhões/ano	E-commerce (varejo)	Fundado em 2009, hoje é composto por 4 empresas (verticais) que se complementam em produtos e serviços. O foco de atuação é na criação e operação de campanhas de marketing digital poderosas com estratégias de mídia aliadas a inteligência artificial para gerar oportunidades comerciais. Atua através da análise e constante avaliação dos processos das campanhas e processos dos parceiros de venda dos clientes, visando agregar produtividade e performance nos clientes que atua.	Considerada fornecedora de alto valor agregado em vendas para o setor das telecomunicações (operadoras de telecom como VIVO e TIM) com sua solução de <i>landing pages</i> automatizadas, e setor das comunicações através da prestação de serviços via agência digital do grupo. Tem carteira concentrada de clientes o que aumenta seu risco pela concentração de faturamento em seus clientes principais. Compradora de serviços complementares ou base para seu negócio. Compra de empresas de todos os portes.
ME3 € 30 milhões/ano	Conservação & limpeza	Desde 1989 oferece terceirização de mão de obra para conservação e limpeza, manutenção predial, e manutenção de áreas verdes. Para seus clientes, foca na otimização de processos, redução de custos, diminuição dos impactos ambientais e gestão mais eficiente dos recursos humanos e materiais envolvidos em cada contrato.	Considerada fornecedora estratégica para todos os tipos de indústria pois fornece mão-de-obra especializada em serviços de conservação e manutenção (esses de menor valor agregado) e para serviços de maior valor agregado (embora isso seja em valor bem menor de receita). Compradora de produtos (matérias-primas em sua maioria) e serviços (locação de veículos, transporte). Compra de empresas de todos os portes, sendo relevante como cliente pelos volumes e recorrência das compras.

Fonte: Autor.

Todas as MPMEs selecionadas são impactadas pela transformação digital e atribuem atenção estratégica à integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos. Sob as perspectivas das teorias da Practice-Based View (PBV) e da Dynamic Capabilities Theory (DCT), essas empresas enfrentam mudanças contínuas que demandam rápidas adaptações, destacando a importância da inovação e da criação de valor para alcançar vantagens competitivas sustentáveis e novos níveis de desempenho [Teece (2014); Schilling e Seuring (2023); Al-Khatib et al. (2024)]. A ênfase em práticas diárias eficazes contribui para o desempenho e a inovação [Rohayati & Abdillah (2024)]. Ao priorizar rotinas eficientes, essas organizações aprimoram a transferência de conhecimento e o desenvolvimento de competências, enquanto as capacidades dinâmicas permitem respostas rápidas às mudanças do mercado e exploração de oportunidades emergentes, promovendo resiliência em ambiente de negócios voláteis [Mishra & Kiran (2024)].

3.5.2

Coleta de dados

Três métodos de coleta de dados primários foram utilizados para garantir a triangulação da investigação qualitativa e capturar as nuances das entrevistas [Rubin & Rubin (2005); Diccico-Bloom & Crabtree (2006)]. As entrevistas tiveram duração média de 130 minutos, variando entre 120 e 140 minutos e tiveram como base o questionário fornecido no Apêndice F. A observação direta no local forneceu dados contextuais detalhados, permitindo aos pesquisadores observar comportamentos, interações e processos em ambientes naturais, reduzindo o viés de recordação e capturando aspectos não-verbais. Essa técnica foi complementada pelo shadowing [McDonald & Simpson (2014)], promovendo uma visão holística dos fenômenos e enriquecendo os resultados [Baker & Edwards (2012); McDonald & Simpson (2014)]. A análise documental interna seguiu uma abordagem sistemática, contextualizando documentos e considerando o caráter interpretativo da análise [Bowen (2009)].

Os dados coletados foram alinhados às propostas de pesquisa por meio da identificação de padrões e construção de explicações relevantes [Kreuter et al. (2021)]. Os critérios de significância incluíram: (i) reconhecimento do entrevistado;

(ii) identificação de barreiras e facilitadores no ambiente das MPMEs; (iii) aplicação de indicadores associados a essas barreiras e facilitadores para construção de um indicador metrológico; (iv) validação das relações causa-efeito-influência; e (v) adesão ao quadro de integração da S-I4.0 no contexto empresarial das MPMEs.

3.5.3

Análise de conteúdo e triangulação dos dados

As entrevistas foram estruturadas conforme as seguintes etapas: (i) descrição geral da empresa; (ii) processos fundamentais e suas aplicações; (iii) tecnologias utilizadas; (iv) formas de trabalho dos colaboradores (presencial, remoto ou híbrido); (v) relacionamento com stakeholders principais (clientes, fornecedores, parceiros, entre outros); (vi, vii e viii) confirmação da relevância de barreiras, facilitadores e seus respectivos indicadores apresentados no estudo; (ix) verificação da adequação das relações de causa, efeito e influência para barreiras e facilitadores; (x) percepção dos entrevistados sobre a aplicabilidade do framework. As entrevistas presenciais foram realizadas com seis MPMEs (3 MPEs e 3 MEs) entre setembro e outubro de 2024. A amostra foi definida em seis empresas, seguindo a recomendação de estudos qualitativos aprofundados, que sugerem de quatro a seis casos como adequados para coleta de informações de respondentes-chave [Baskarada (2024); Creswell & Creswell (2017)]. O número de participantes por organização variou entre um e dois, dependendo da disponibilidade. Nos casos das MPEs, os entrevistados eram diretores e sócios majoritários; nas MEs, eram diretores-executivos (CEOs) e gestores com visão abrangente da organização. As entrevistas duraram cerca de 140 minutos, com relatórios gerados na língua original [Goldenberg (2011); Baskarada (2014); Alam (2021)].

A análise dos dados focou na construção de explicações com base nas informações coletadas. Foram utilizadas diversas fontes para validação, e estabeleceu-se a cadeia de evidências sempre que possível. Os rascunhos produzidos durante a pesquisa foram revisados por respondentes e observadores. Foi adotada a técnica de comparação de padrões em relação aos frameworks propostos. As conclusões foram generalizadas para os domínios das MPEs ou MEs pesquisadas, com a confiabilidade sendo assegurada pela comprovação da aplicabilidade e da generalização razoável dos frameworks para esses contextos. A

pesquisa utilizou o método de MEC, com análise realizada em duas etapas: análise intra-caso e inter-caso [Eisenhardt (1989)]. Na análise intra-caso, buscou-se compreender profundamente cada caso, enfatizando estratégias sistemáticas de análise e aspectos qualitativos [Stake (1995); Yin (2014)]. A análise inter-casos comparou os casos para identificar padrões e insights que contribuíssem para frameworks teóricos, utilizando técnicas de codificação, identificação de padrões e comparações [Eisenhardt (1989); Miles & Huberman (1994)]. Por fim, as teorias PBV e DCT foram adotadas como lentes de análise, sendo apropriada para MPMEs que necessitam responder de forma ágil e flexível às mudanças rápidas impulsionadas pela transformação digital [Kore et al. (2021)]. Essa abordagem integrou o ciclo PDCA como base para a detecção e implementação de melhorias contínuas [Realyvásquez-Vargas et al. (2018); Tsutsui (1996)] no processo de integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs.

4

S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs: Resultados & Discussões

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com a condução da pesquisa, conforme detalhamento metodológico apresentado no Capítulo 3. Ele está organizado em quatro seções, cada uma associada a uma pergunta de pesquisa da tese e respectivos OEs.

4.1

Principais barreiras e facilitadores, seus indicadores críticos, suas causalidades e dependências

Esta primeira seção está voltada para responder a PP1 e endereça os OE (i), OE (ii) e OE (iii) definidos no capítulo introdutório desta tese. Neste sentido, os primeiros resultados obtidos são duas listas, uma para barreiras e outra para facilitadores, diretamente relacionados a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs. A Tabela 5 apresenta as 13 barreiras (B) e os 31 facilitadores (F) revelados a partir das revisões de escopo (RE-1 e RE-2), acrescidos por três barreiras extras (BE) e dois facilitadores extras (FE) obtidos na etapa dos painéis de especialistas (P1) já visando ajustar o encontrado na literatura com a realidade das MPMEs. Os especialistas de P1 não excluíram nenhuma das barreiras ou facilitadores obtidos inicialmente, considerando neste estágio todas válidas para as MPMEs.

Tabela 5 – Barreiras e facilitadores para integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs.

Barreiras (B) e Barreiras-extras (BE)	Facilitadores (F) e Facilitadores-extras (FE)
B1: Questões de segurança cibernética B2: Custos de melhoria e condição econômica em OSCM (operações e gestão da cadeia de suprimentos) B3: Falta de apoio da autoridade reguladora/legislação deficiente B4: Falta de comprometimento da alta administração B5: Desafios relacionados à interoperabilidade B6: Empregabilidade B7: Falta de conhecimento técnico B8: Recursos alternativos e necessidades energéticas B9: Desafios de projeto para reutilização e recuperação de produtos B10: Barreiras organizacionais, restrições de capacidade B11: Resistência à mudança / práticas de gestão da mudança e adoção de inovação para a sociedade B12: Problemas de gerenciamento e armazenamento de dados B13: Desigualdades de oportunidades e riscos da digitalização BE14: Aspectos/características culturais BE15: Subutilização do conhecimento da academia/universidades BE16: Falta de investimento em P&D (pesquisa e desenvolvimento)	F1: Processo interno da inovação F2: Inovação aberta F3: Gestão para mudanças F4: Capacidade e visão dinâmica F5: Modelo de negócio inovador e design de serviços F6: Integração de clientes e fornecedores F7: Apoio de parceiros não-convencionais F8: Pressões governamentais e institucionais F9: Redes colaborativas F10: Adoção de técnicas avançadas para melhoria da qualidade F11: Redesenho e estrutura descentralizada F12: Alinhamento estratégico F13: Prontidão para I4.0 F14: Adoção de componentes fabris inteligentes F15: Soluções centradas em dados F16: Fluxo consistente de dados F17: Design modular F18: Transparência de informações e segurança de dados F19: Pensamento/filosofia voltado para sustentabilidade F20: Foco em recursos naturais renováveis F21: Integração interdisciplinar e holística F22: Economia compartilhada F23: Pensamento de ciclo de vida e processos circulares F24: Compartilhamento do conhecimento F25: Comunicação eficaz F26: Modelagem de incentivos individuais F27: Empoderamento dos colaboradores F28: Experimentação F29: Educação e treinamento com foco em habilidades técnicas e sociais F30: Liderança transformacional F31: Comprometimento da alta administração FE32: Melhor gestão de Certificações, Normas e Regulamentos FE33: Valorizar centros de P&D (Pesquisa & Desenvolvimento)

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

O Apêndice D traz a avaliação dos especialistas para cada barreira e facilitador. Em seguida, realizou-se uma avaliação completa de todas as barreiras e facilitadores, associada à análise de conteúdo de cada uma delas. Essa análise de resultados levou a classificação/categorização pelo autor em oito categorias simétricas que abrangem a organização como um todo, sendo elas: (i) pessoas; (ii)

tecnologia; (iii) inovação; (iv) institucional; (v) tópicos relacionados ao OSCM; (vi) jurídico; (vii) organização; e (viii) sustentabilidade. A partir desta classificação e das listas prévias das barreiras e facilitadores, os especialistas do GF1 buscaram selecionar apenas as principais que influenciam as MPMes. Para as barreiras, foram selecionadas oito das 16 barreiras relacionadas previamente, sendo um em cada categoria. Para facilitadores, foram selecionados 13 dos 33 facilitadores selecionados previamente, com agrupamento de outros cinco facilitadores (por semelhança) nas seguintes categorias: organização (1+), pessoas (2+), tecnologia (1+) e sustentabilidade (1+), respectivamente, conforme Tabelas 6. Ressalta-se respeitam-se critérios hierárquicos e agrupamento em categorias com base nas avaliações realizadas por especialistas. As barreiras (B) e facilitadores (F) receberam nova numeração (definitiva para toda a sequência dessa pesquisa) a partir dos resultados obtidos. A Tabela 6 apresenta as principais barreiras e facilitadores obtidos com esta etapa da pesquisa, endereçando assim o OE (i). Cabe ressaltar que nas etapas anteriores havia 13 barreiras oriundas da literatura e três novas barreiras oriundas das etapas com especialistas, sendo que uma dessas três extras figura na listagem final das barreiras (B4, marcada em *itálico* na Tabela 6). Para os facilitadores são 31 oriundos da literatura e dois novos, sendo que um desses dois extras figura na listagem final dos facilitadores (F8, marcado em *itálico* na Tabela 6).

Tabela 6 – Seleção das principais barreiras e facilitadores em matriz 8 x 8 para integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMes.

Barreiras (B)	Facilitadores (F)	Categoria
B1: Falta de conhecimento técnico	F2: Empoderamento dos colaboradores + Compartilhamento do conhecimento + Comunicação eficaz	Pessoas
B2: Questões de segurança cibernética	F4: Soluções centradas em dados + Fluxo consistente de dados	Tecnologia
B3: Resistência à mudança / práticas de gestão da mudança e adoção de inovação para a sociedade	F3: Processo interno da inovação	Inovação
<i>B4: Falta de investimento em P&D (pesquisa e desenvolvimento)</i>	<i>F8: Valorizar centros de P&D (Pesquisa & Desenvolvimento)</i>	Institucional
B5: Custos de melhoria e condição econômica em OSCM (operações e gestão da cadeia de suprimentos)	F6: Integração de clientes e fornecedores	Tópicos relacionados a OSCM

Barreiras (B)	Facilitadores (F)	Categoria
B6: Falta de apoio da autoridade reguladora/legislação deficiente	F7: Pressões governamentais e institucionais	Jurídico
B7: Falta de comprometimento da alta administração	F1: Comprometimento da alta administração + Alinhamento estratégico	Organização
B8: Recursos alternativos e necessidades energéticas	F5: Integração interdisciplinar e holística + Pensamento de ciclo de vida e processos circulares	Sustentabilidade

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6, a pesquisa foca na jornada dos indicadores, passando pelas etapas de um novo painel de especialistas (P-2) e de um novo grupo focal (GF-2) de forma a ajustar e refinar os indicadores críticos obtidos na literatura (RE-2) para a realidade das MPMEs, e posteriormente por um Survey (S-1) para uma validação final. As Tabelas 7 e 8 apresentam dois indicadores revelados para cada uma das principais barreiras e dos principais facilitadores, respectivamente, endereçando assim o OE (ii).

Nota 1: Esta pesquisa apresenta os indicadores, mas não tem por objetivo torná-los padronizados, rígidos ou inflexíveis, isto é, cada organização poderá realizar um diagnóstico e iniciar uma parametrização de cada indicador para análise de conformidade a partir das métricas estabelecidas e/ou projetadas, visando o atendimento dos aspectos metrológicos associados a cada um dos indicadores referenciados para cada barreiras e facilitador.

Tabela 7 – Principais indicadores críticos das barreiras para a integração da S-I4.0 nas cadeias de suprimentos sob a perspectiva das MPMEs.

Barreira (B)	Indicadores associados (vide Nota 1 acima tabela 7)
B1: Falta de conhecimento técnico	B1.1: Falta de treinamento profissional a equipe [Pardo-Garcia & Barac (2020); Charband & Naviminipour (2016)]
	B1.2: Falta de compartilhamento do conhecimento da metodologia e práticas [Michna & Kmiecik (2020); Zhang et al. (2018)]
B2: Questões de segurança cibernética	B2.1: Processos inadequados de monitoramento e controle [Machado et al. (2021); Thomé et al. (2016a); Hoherty & Tajuddin (2018); Liu & Ji (2021)]
	B2.2: Fraqueza em casos de ataque e ameaças associadas ao uso indevido da tecnologia disponível para a segurança da informação [Kouhizadeh et al. (2021); Li & Liu (2021)]
B3: Resistência à mudança / práticas de gestão de mudanças e	B3.1: Falta de estímulo a inovação como forma de exploração e desenvolvimento da capacidade da empresa [Elkington (1994); Gupta et al. (2020)]

adoção de inovação para a sociedade	B3.2: Falta de gestão eficaz e/ou Sistema de governança e compliance [Caiado et al. (2022); Lima & Galleli (2021)]
B4: Falta de investimento em P&D (Pesquisa & Desenvolvimento)	B4.1: Falta de condições financeiras e/ou estrutura organizacional [Michna & Kmiecik (2020); Yang et al. (2021); Nagurney et al. (2019)] B4.2: Falta de apoio da alta administração [Majumdar et al. (2021); Koh et al. (2019)]
B5: Custo de melhoria e condição econômica em OSCM (Operações e Gestão da cadeia de suprimentos)	B5.1: Procedimentos errados ou baixo nível de reuso e recuperação dos produtos [Ahmad et al. (2022); Aboagye et al. (2021)] B5.2: Baixo nível de priorização na seleção e uso de produtos, serviços e empresas com práticas sustentáveis, através da cadeia de suprimentos [Birkel et al. (2019); Gunduz et al. (2021); Trujillo-Galego et al. (2021)]
B6: Falta de apoio da autoridade reguladora/legislação deficiente	B6.1: Baixo nível de envolvimento e sinergia das autoridades reguladoras com a empresa [Müller & Voigt (2018); Roy et al. (2022); Bisaga et al. (2021); Durán & Córdova (2015)] B6.2: Legislação limitada ou obsoleta associada as recorrentes inovações inerentes ao avanço tecnológico [Jemala (2021); Li et al. (2020); De et al. (2020); Souza & Voss (2008)]
B7: Falta de comprometimento da alta administração	B7.1: Falta de incentivo a práticas compartilhadas e gestão colaborativa [Wine et al. (2022); Cui et al. (2022); Goy et al. (2016)] B7.2: Falta de comunicação eficiente, campanhas de sensibilização [Konrad (2019); Kowal-Bourgonjon & Jacobs (2019)]
B8: Recursos alternativos e necessidades energéticas	B8.1: Falta de condições técnicas ou maturidade tecnológica para adequação [Caiado et al. (2021); Shanmugam & Razak (2021); Anton et al. (2019)] B8.2: Falta de fundos para investimentos em tecnologias apropriadas [Flynn et al. (1990); Polzin et al. (2021); Gredel et al. (2012)]

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

Tabela 8 – Principais indicadores críticos dos facilitadores para a integração da S-14.0 nas cadeias de suprimentos sob a perspectiva das MPMEs.

Facilitador (F)	Indicadores Associados (vide Nota 1 acima tabela 7)
F1: Comprometimento da alta administração / Alinhamento estratégico	F1.1: Existência de investimentos sustentáveis em tecnologia da informação [de Araujo et al. (2021); Mon & Del Giorgio (2021)] F1.2: Eficácia estratégica e decisória [Ghonim et al. (2022); Wang et al. (2021); Hurt & Abebe (2015)]
F2: Empoderamento dos colaboradores / Compartilhamento do conhecimento / Comunicação eficaz	F2.1: Existência de práticas/treinamentos para desenvolvimento de atitudes (em relação a importância e sustentabilidade da I4.0) [Sharma et al. (2022); Beltrán-Martín & Bou-Llugar (2018); Truitt (2011)] F2.2: Programa para desenvolvimento de habilidades específicas e especialistas [Saniuk et al. (2023); Shevakova et al. (2021); Wikarek & Sitek (2021)]

F3: Processo interno da inovação	F3.1: Liderança transformacional para a inovação organizacional [Zhang et al. (2022); Purwanto & Juliana (2022); Chen et al. (2021)]
	F3.2: Aumentar a adoção da capacidade da produção digital [Trujillo-Gallego et al. (2022); Benzidia et al. (2021)]
F4: Soluções centrada em dados / Fluxo consistente de dados	F4.1: Investimentos consistentes em informação centralizadas e integradas [Ebel et al. (2021); Fernandez-Viagas & Framinan (2022)]
	F4.2: Fluxo de dados que garanta usabilidade [Lee et al. (2015)]
F5: Integração interdisciplinar e holística + Pensamento de ciclo de vida e processos circulares	F5.1: Integração estratégica das operações [Caiado et al. (2021); Kumar, P. et al. (2020); Chiarini & Kumar (2021)]
	F5.2: Uso de sistemas de monitoramento dinâmicos [Zhang et al. (2022a); Xu & Lu (2021)]
F6: Integração de clientes e fornecedores	F6.1: Implementar eficaz comunicação na cadeia de suprimentos [Lu & Tomlin (2022); Tsai & Lasminar (2021); Lofti et al. (2013)]
	F6.2: Melhorar a satisfação do cliente [Espino-Rodríguez & Taha (2022); Mittal et al. (2021)]
F7: Pressões governamentais e institucionais	F7.1: Autorização, Inspeção e regulamentação das operações [Rodrigues (2021); Grosso et al. (2020); Zhao et al. (2019)]
	F7.2: Comprometimento da gestão e da estrutura organizacional para capacidade de resposta às pressões externas [Jazairy & von Haartman (2020); Daddi et al. (2020); Colwell & Joshi (2013)]
F8: Valorizar centros de P&D (Pesquisa & Desenvolvimento)	F8.1: Ações/programa para melhoria da qualidade e/ou inovação em produtos/serviços em conjunto com os centros de P&D [Carboni & Medda (2021); Paiva et al. (2020)]
	F8.2: Capacidade de resposta para intercâmbio tecnológico [Story et al. (2021); Cho et al. (2018)]

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

4.2

Barreiras e facilitadores: relações de causa e efeito, relações de influência, e dominância para os mecanismos PPT e dimensões TBL

Esta seção está voltada para responder a PP2 e endereça os OEs (iii) e (iv), definidos no capítulo introdutório desta tese.

A partir das matrizes para as barreiras e facilitadores, realizam-se comparações pareadas em dois grupos focais com os especialistas, divididos de acordo com o tamanho das MPMEs (MPEs e MEs). A Figura 5 apresenta os correspondentes linguísticos para termos/valores para as barreiras e facilitadores das MPEs, relatam a classificação feita pelos especialistas que declararam

predominância de experiência acumulada em MPes. A Figura 6 na mesma lógica para as barreiras e facilitadores para MEs, relatam a classificação feita pelos especialistas que declararam predomínio de experiência acumulada em MEs. Ambas as Figuras 5 e 6 retratam a influência entre as barreiras e facilitadores separadamente para MPes e MEs. Ler as linhas em relação às colunas denota o quanto B1 influencia B2 [e.g.: Na Figura 5 (MPes) B1 seria uma influência muito alta (MA) para B2].

Barreiras (Grupo Focal Micro & Pequenas Empresas)	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	Facilitadores (Grupo Focal Micro & Pequenas Empresas)	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
B1		MA	MA	MA	MA	MB	B	A	F1		MA	MA	MA	MA	A	B	A
B2	B		MB	MB	A	B	B	A	F2	MA		MA	MA	A	A	A	A
B3	A	A		MA	A	B	A	B	F3	B	MA		MA	MA	A	B	A
B4	A	A	B		MA	MA	B	B	F4	MA	A	MA		A	MA	B	MA
B5	MA	MA	MA	MA		MB	A	B	F5	A	A	A	A		A	A	A
B6	A	MA	A	B	B		MB	MB	F6	A	B	A	MA	MA		MA	A
B7	MA	MA	MA	MA	A	MB		B	F7	A	B	B	A	MA	MA		MA
B8	MB	A	A	A	MA	B	B		F8	B	MA	MA	MA	A	A	B	

Figura 5 – Correspondentes de termos linguísticos/valores para MPes.

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

A leitura das colunas em relação às linhas informa aos influenciadores sobre uma determinada barreira, diga o quanto B5 influencia B2. Para o grupo focal na Figura 5 (MPes) seria uma influência muito alta (MA), e para o grupo focal na Figura 6 (MEs) seria uma influência alta (A).

Barreiras (Grupos Focais Médias Empresas)	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	Facilitadores (Grupos Focais Médias Empresas)	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
B1		MA	MA	MA	MA	MB	A	MA	F1		MA	MA	MA	MA	MA	MA	MA
B2	MB		A	B	A	A	MB	MA	F2	B		MA	MA	A	B	MA	MA
B3	A	MA		MA	A	MB	MA	A	F3	B	MA		A	MA	A	B	MA
B4	MA	B	A		A	MB	MB	A	F4	A	A	MA		B	A	MB	MA
B5	MA	A	A	A		MB	A	A	F5	A	A	B	B		MA	MA	A
B6	MB	A	MB	A	A		A	MB	F6	MA	A	A	B	A		A	MA
B7	MA	MA	MA	MA	MA	MB		A	F7	MA	MA	A	A	A	A		A
B8	A	MA	A	MA	A	MB	A		F8	MA	MA	MA	MA	A	MA	B	

Figura 6 – Correspondentes de termos linguísticos/valores para MEs.

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

As escalas verbais (Figuras 5 e 6) são representadas graficamente a seguir nas Figuras 7 e 8, apresentando causalidades, dependências (efeito) e influências das principais barreiras e facilitadores para a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos na perspectiva das MPMEs, endereçando assim o OE (iii).

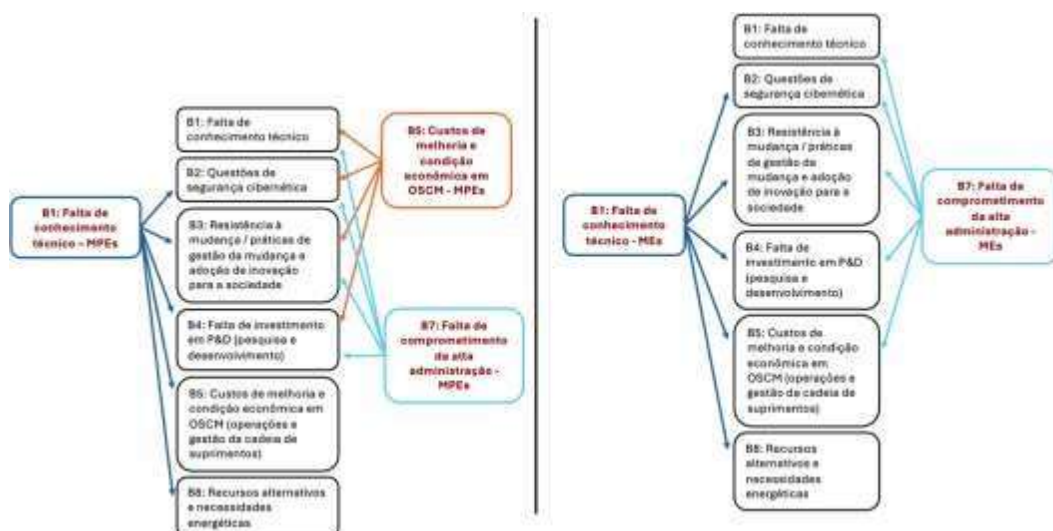


Figura 7 – Principais influências para barreiras para MPEs e MEs.

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

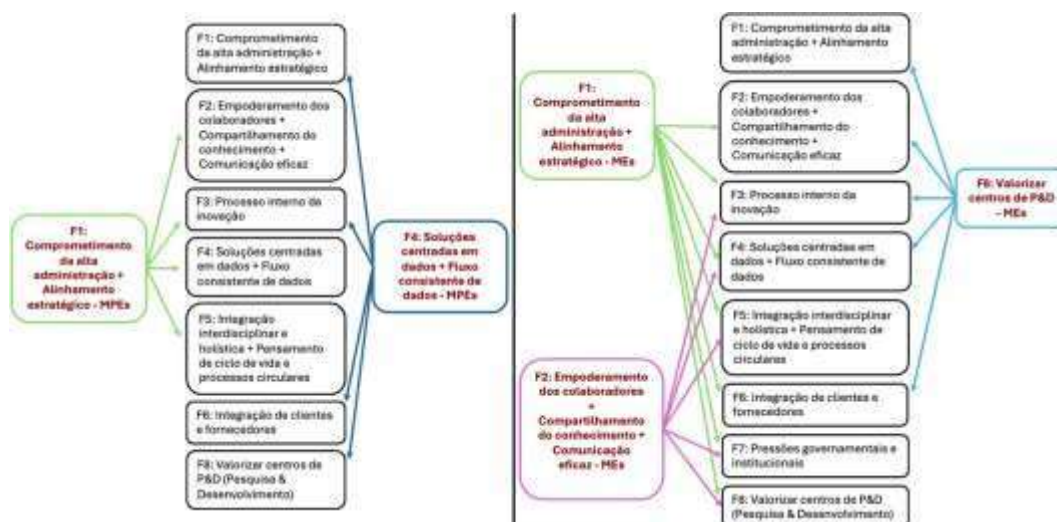


Figura 8 – Principais influências para facilitadores para MPEs e MEs.

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

4.2.1

Avaliação consensual de escalas verbais

Nesta seção as influências entre as barreiras e entre os facilitadores são apresentadas com base na classificação de consenso das escalas verbais obtidas durante a etapa dos GFs. Em seguida, a seção discute os fatores proeminentes, influenciadores e resultantes extraídos da abordagem Fuzzy-DEMATEL das relações causa-efeito. As propostas de investigação são derivadas separadamente para MPEs e MEs.

As Figuras 5 e 6 apresentam matrizes 8×8 , representando as classificações de escalas verbais dos especialistas durante a etapa dos GFs. Os destaques são: (i) Nenhuma pontuação nula/zero foi aplicada por nenhum especialista o que significa que os especialistas concluíram que nenhuma barreira ou facilitador deixa de ter alguma influência nas comparações pareadas; (ii) Nenhuma pontuação foi apontada como influenciando total ou exclusivamente a outra, havendo portanto interligação comprovada; (iii) Ao observar as interrelações para barreiras e para facilitadores, classificadas por consenso para pelo menos quatro em cada seis participantes, surgem propostas de investigação conforme apresentado no continuidade dessa seção: As Figuras 7 e 8 ilustram as barreiras respectivamente para as MPEs e para as MEs. Entre as MPE, B1 (Falta de conhecimento técnico) influencia diretamente B2, B3, B4, B5 e B8. Já B5 (Custo de melhoria e condição econômica em OSCM) e B7 (Falta de comprometimento da alta administração) influenciam diretamente B1, B2, B3 e B4. Para as MEs, B5 perde poder de influência como barreira em comparação com contexto das MPEs. No entanto, B1 e B7 continuam a ser as principais barreiras influenciadoras. Outra diferença é o surgimento da barreira B5 sendo impactada por B7. Para barreiras é plausível a elaboração das seguintes proposições (P):

P1 — Nas MPEs, B1, B5 e B7 reforçam-se mutuamente e desencadeiam influências diretas em cinco outras barreiras, ou seja, esforços centrados nas três barreiras influenciadoras propiciarão resultados abrangentes atingindo praticamente todas as barreiras, ficando de fora somente B6 e B8 que devem ser tratadas com ações específicas.

P2 — Nas MEs, B1 e B7 reforçam-se mutuamente, desencadeando as influências em B1, B2, B3, B4, B5 e B8, ficando de fora somente B6 que pode ser tratada com ações específicas. Esforços centrados nas duas barreiras influenciadoras atingirão praticamente todas as demais barreiras de maneira abrangente para a organização.

P1 + P2: B1 e B7 devem receber maior atenção pois são barreiras influenciadoras para MPEs e MEs. Já as barreiras B2, B3 e B4 recebem influência de todas as barreiras influenciadoras nos dois contextos. Importante mencionar que

B7 influencia B1, portanto atenção especial para B7 tanto no caso das MPEs quanto nas MEs.

As Figuras 7 e 8 apresentam os facilitadores respectivamente para as MPEs e as MEs. No caso das MPEs, F1 (Comprometimento da alta administração + Alinhamento estratégico) e F4 (Solução centradas em dados + Fluxo consistente de dados) são facilitadores influenciadores. Sendo que F1 influencia F2, F3, F4 e F5, enquanto F4 influencia F1, F3, F6 e F8. No caso das MEs, F1, F2 e F8 são as barreiras influenciadoras, onde F1 influencia F2, F3, F4, F5, F6, F7 e F8, enquanto F2 (Empoderamento dos colaboradores + Compartilhamento do conhecimento + Comunicação eficaz) influencia F3, F4, F5, F7 e F8, por fim F8 (Valorizar centros de P&D) influencia F1, F2, F3, F4 e F6. Para facilitadores é plausível elaborar as seguintes proposições:

P3 — Nas MPEs, F1 e F4 são mecanismos que se reforçam mutuamente, ou seja, esforços centrados nesses dois facilitadores propiciarão resultados abrangentes para a organização.

P4 — Nas MPEs, F1 influencia F2, F3, F4 e F5, sendo importante ressaltar que sua influência sobre F4 nessa lista.

P5 — Nas MPEs, F4 influencia F1, F3, F6 e F8, sendo importante ressaltar que sua influência sobre F1 nessa lista.

P3 + P4 + P5: F1 e F4 devem receber maior atenção pois cada um influencia diretamente outros quatro facilitadores, além disso atenção para F3 pois é o único facilitador influenciado por ambos.

P6 — Nas MEs, F1, F2 e F8 são os facilitadores influenciadores e devem receber maior atenção para integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MEs ou nas quais estejam inseridas.

P7 — Nas MEs, F1 influencia diretamente F2, F3, F4, F5, F6, F7 e F8, ou seja, todas os demais facilitadores são impactados.

P8 — Nas MEs, F2 influencia diretamente F3, F4, F5, F7 e F8, sendo importante ressaltar sua influência sobre F8 nessa lista.

P9 — Nas MEs, F8 influencia diretamente F1, F2, F3, F4 e F6, sendo importante ressaltar sua influência sobre F1 e F2 nessa lista.

P6 + P7 + P8 + P9: F1 deve receber maior prioridade e atenção pois é a única influenciadora que exerce influência direta sobre todos os demais facilitadores. F8 em seguida pois influencia F1 e F2, por fim F2 pela sua influência sobre F8. Importante também ressaltar que F3 e F4 são influenciadas por F1, F2 e F8.

A seguir, Tabela 9 e Figura 9 apresentam os resultados da Abordagem Fuzzy-DEMATEL, com tabelas e diagramas das relações causa-efeito para barreiras em MPEs. As barreiras B1, B6, B7 e B8 estão no Grupo Causa, enquanto as barreiras B2, B3, B4 e B5 estão no Grupo Efeito. Tabela 10 e Figura 10 apresentam relações de causa-efeito para facilitadores em MPEs. Os facilitadores F1, F2 e F7 estão no Grupo Causa, enquanto os facilitadores F3, F4, F5, F6 e F8 estão no Grupo Efeito. Tabela 11 e Figura 11 apresentam as relações de causa-efeito para barreiras em MEs. As barreiras B1, B6 e B7 estão no Grupo Causa, enquanto as barreiras B2, B3, B4, B5 e B8 estão no Grupo Efeito. Tabela 12 e Figura 12 apresentam as relações de causa-efeito para facilitadores em MEs. Os facilitadores F1 e F7 estão no Grupo Causa, enquanto os facilitadores F2, F3, F4, F5, F6 e F8 estão no Grupo Efeito. Tabela 13 e Figura 13 apresentam resultados de relações de causa-efeito para barreiras em empresas MPMEs (grupos focais agregados). As barreiras B1, B6, B7 e B8 estão no Grupo Causa, enquanto as barreiras B2, B3, B4 e B5 estão no Grupo Efeito. Por fim, Tabela 14 e Figura 14 apresentam as relações de causa-efeito para facilitadores em empresas MPMEs (grupos focais agregados). Os facilitadores F1, F2 e F7 estão no Grupo Causa, enquanto os facilitadores F3, F4, F5, F6 e F8 estão no Grupo Efeito.

Tabela 9 – Resultados Di + Ri e Di – Ri para barreiras para MPes.

Barreiras (B)	Di + Ri	Di - Ri	Causa (C)/ Efeito (E)
B1: Falta de conhecimento técnico	9,490042	0,079289	C
B2: Questões de segurança cibernética	9,04908	-1,515973	E
B3: Resistência à mudança / práticas de gestão da mudança e adoção de inovação para a sociedade	9,392564	-0,040761	E
B4: Falta de investimento em P&D (pesquisa e desenvolvimento)	9,430682	-0,271205	E
B5: Custos de melhoria e condição econômica em OSCM (operações e gestão da cadeia de suprimentos)	9,956615	-0,38204	E
B6: Falta de apoio da autoridade reguladora/legislação deficiente	7,432845	0,367826	C
B7: Falta de comprometimento da alta administração	8,840327	0,698012	C
B8: Recursos alternativos e necessidades energéticas	8,327192	0,245782	C

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

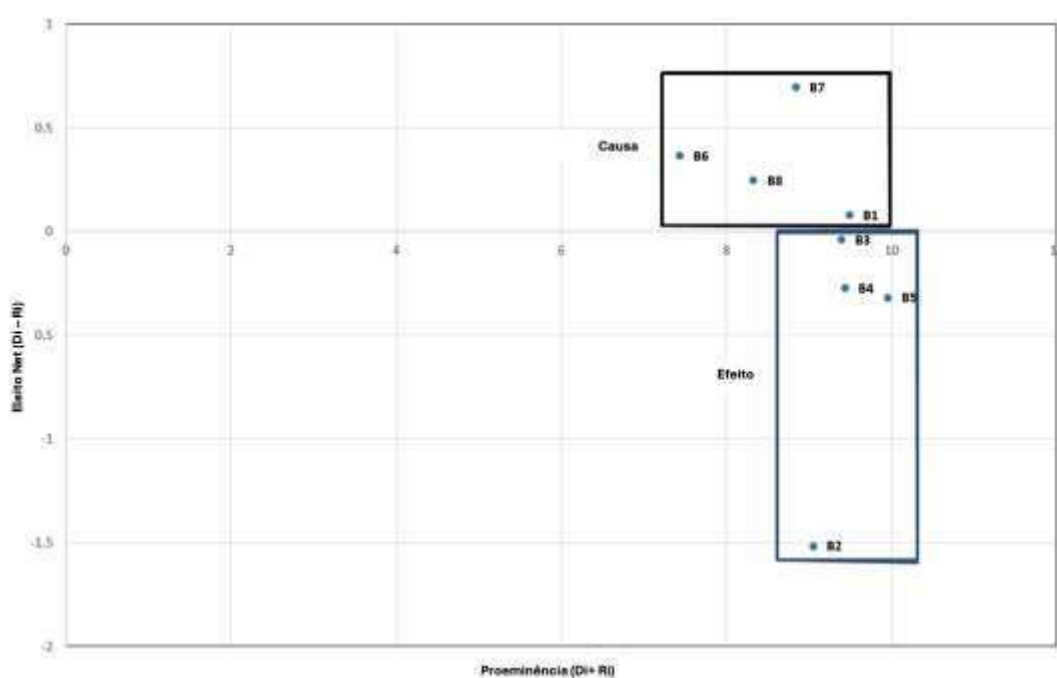


Figura 9 – Diagrama de causa-efeito para barreiras para MPes.

Fonte: Método DEMATEL.

Tabela 10 – Resultados $D_i + R_i$ e $D_i - R_i$ para facilitadores para MPes.

Facilitadores (F)	$D_i + R_i$	$D_i - R_i$	Causa (C)/ Efeito (E)
F1: Comprometimento da alta administração + Alinhamento estratégico	15,04984	0,43318	C
F2: Empoderamento dos colaboradores + Compartilhamento do conhecimento + Comunicação eficaz	15,3215	0,41254	C
F3: Processo interno da inovação	15,21509	-0,359365	E
F4: Soluções centradas em dados + Fluxo consistente de dados	15,92757	-0,322837	E
F5: Integração interdisciplinar e holística + Pensamento de ciclo de vida e processos circulares	15,48851	-0,415236	E
F6: Integração de clientes e fornecedores	15,37755	-0,124541	E
F7: Pressões governamentais e institucionais	13,99828	0,657049	C
F8: Valorizar centros de P&D (Pesquisa & Desenvolvimento)	15,15782	-0,322529	E

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

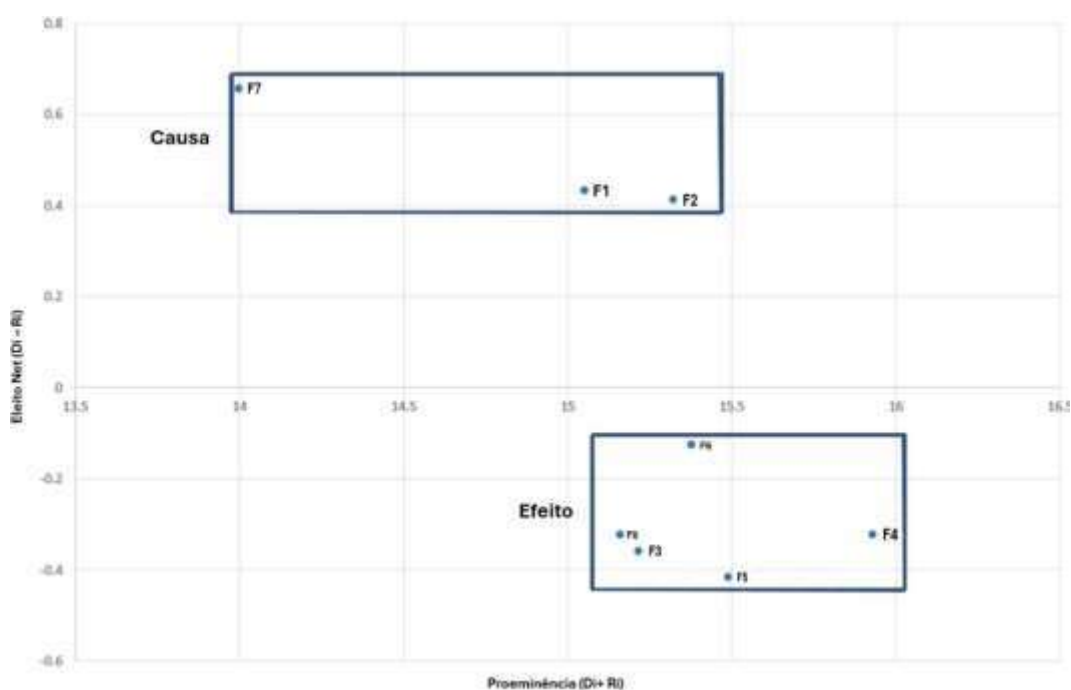


Figura 10 – Diagrama de causa-efeito para facilitadores para MPes.

Fonte: Método DEMATEL.

Tabela 11 – Resultados $D_i + R_i$ e $D_i - R_i$ para barreiras para MEs.

Barreiras (B)	$D_i + R_i$	$D_i - R_i$	Causa (C) / Efeito (E)
B1: Falta de conhecimento técnico	13,7021	0,4476	C
B2: Questões de segurança cibernética	13,068	-1,2377	E
B3: Resistência à mudança / práticas de gestão da mudança e adoção de inovação para a sociedade	13,8261	-0,0799	E
B4: Falta de investimento em P&D (pesquisa e desenvolvimento)	13,1995	-1,1248	E
B5: Custos de melhoria e condição econômica em OSCM (operações e gestão da cadeia de suprimentos)	13,9027	-0,5104	E
B6: Falta de apoio da autoridade reguladora/legislação deficiente	9,40544	1,28372	C
B7: Falta de comprometimento da alta administração	13,2573	0,84586	C
B8: Recursos alternativos e necessidades energéticas	13,7163	-0,2106	E

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

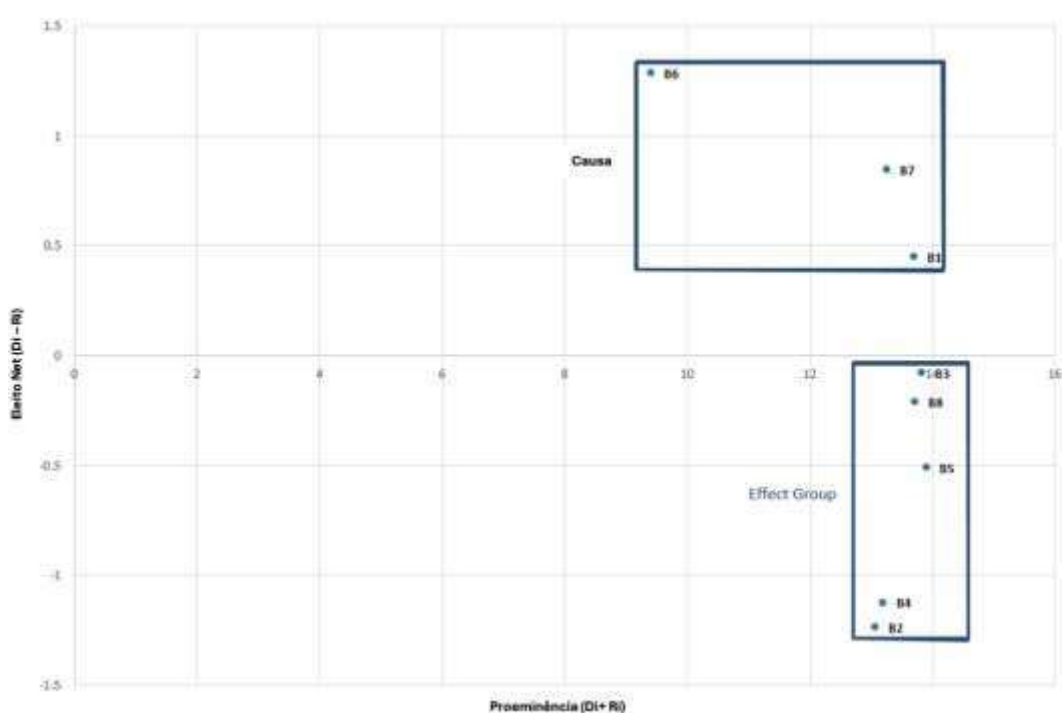


Figura 11 – Diagrama de causa-efeito para barreiras para MEs.

Fonte: Método DEMATEL.

Tabela 12 – Resultados $Di + Ri$ e $Di - Ri$ para facilitadores para MEs.

Facilitadores (F)	$Di + Ri$	$Di - Ri$	Causa (C) / Efeito (E)
F1: Comprometimento da alta administração + Alinhamento estratégico	14,5263	0,89105	C
F2: Empoderamento dos colaboradores + Compartilhamento do conhecimento + Comunicação eficaz	14,3895	-0,3045	E
F3: Processo interno da inovação	13,9268	-0,329	E
F4: Soluções centradas em dados + Fluxo consistente de dados	13,2389	-0,3082	E
F5: Integração interdisciplinar e holística + Pensamento de ciclo de vida e processos circulares	13,71	-0,2877	E
F6: Integração de clientes e fornecedores	13,9409	-0,0458	E
F7: Pressões governamentais e institucionais	13,4648	0,75641	C
F8: Valorizar centros de P&D (Pesquisa & Desenvolvimento)	14,7837	-0,1847	E

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

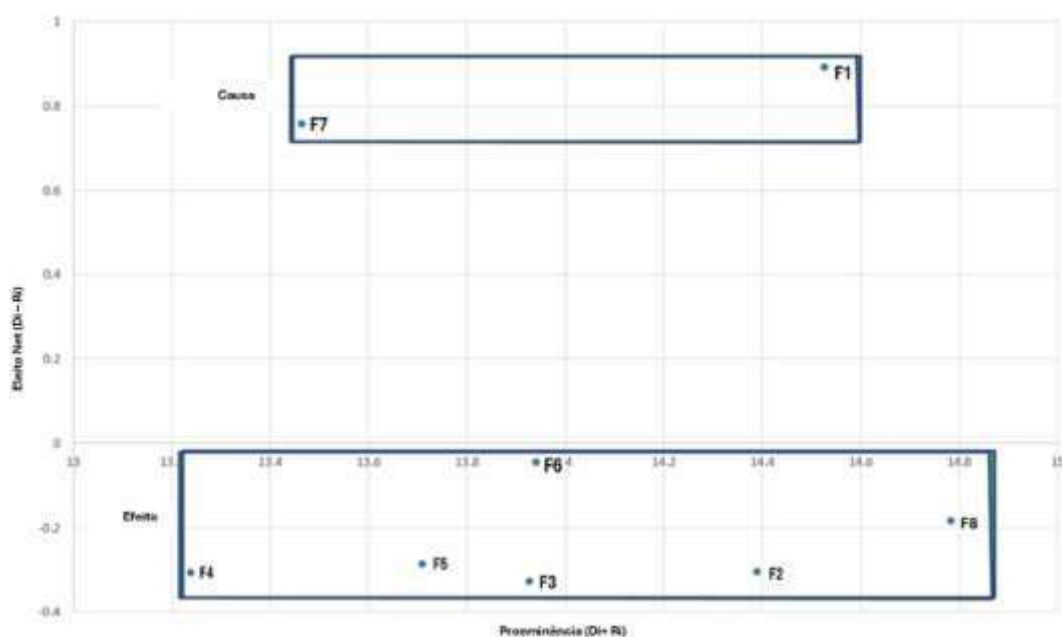


Figura 12 – Diagrama de causa-efeito para facilitadores para MEs.

Fonte: Método DEMATEL.

Tabela 13 – Resultados $Di + Ri$ e $Di - Ri$ para barreiras para MPMEs.

Barreiras (B)	$Di + Ri$	$Di - Ri$	Causa (C) / Efeito (E)
B1: Falta de conhecimento técnico	11,1200	0,2702	C
B2: Questões de segurança cibernética	10,6307	-1,3595	E
B3: Resistência à mudança / práticas de gestão da mudança e adoção de inovação para a sociedade	11,1267	-0,0358	E
B4: Falta de investimento em P&D (pesquisa e desenvolvimento)	10,8968	-0,6373	E
B5: Custos de melhoria e condição econômica em OSCM (operações e gestão da cadeia de suprimentos)	11,4957	-0,4074	E
B6: Falta de apoio da autoridade reguladora/legislação deficiente	8,1971	0,7427	C
B7: Falta de comprometimento da alta administração	10,6034	0,7560	C
B8: Recursos alternativos e necessidades energéticas	10,4919	0,0471	C

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

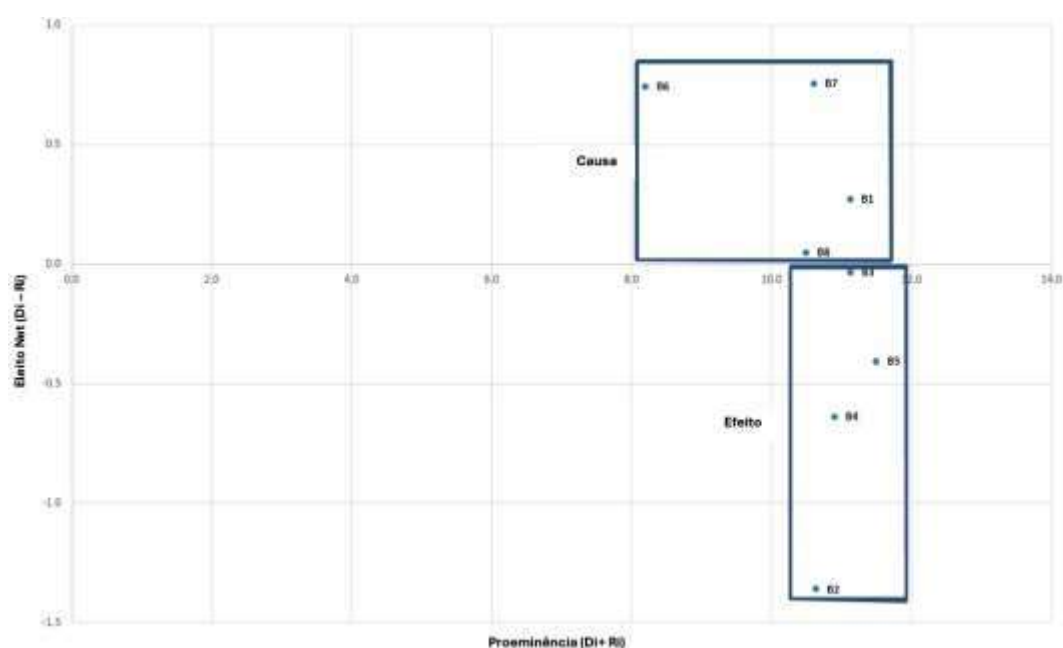


Figura 13 – Diagrama de causa-efeito para barreiras, agregado para MPMEs.

Fonte: Método DEMATEL.

Tabela 14 – Resultados Di + Ri e Di – Ri para facilitadores para MPMEs.

Facilitadores (F)	Di + Ri	Di - Ri	Causa (C)/ Efeito (E)
F1: Comprometimento da alta administração + Alinhamento estratégico	14,61628	0,630341	C
F2: Empoderamento dos colaboradores + Compartilhamento do conhecimento + Comunicação eficaz	14,68787	0,02143	C
F3: Processo interno da inovação	14,39422	-0,365395	E
F4: Soluções centradas em dados + Fluxo consistente de dados	14,40495	-0,328144	E
F5: Integração interdisciplinar e holística + Pensamento de ciclo de vida e processos circulares	14,40467	-0,379746	E
F6: Integração de clientes e fornecedores	14,47304	-0,113201	E
F7: Pressões governamentais e institucionais	13,58132	0,69578	C
F8: Valorizar centros de P&D (Pesquisa & Desenvolvimento)	14,79827	-0,274152	E

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

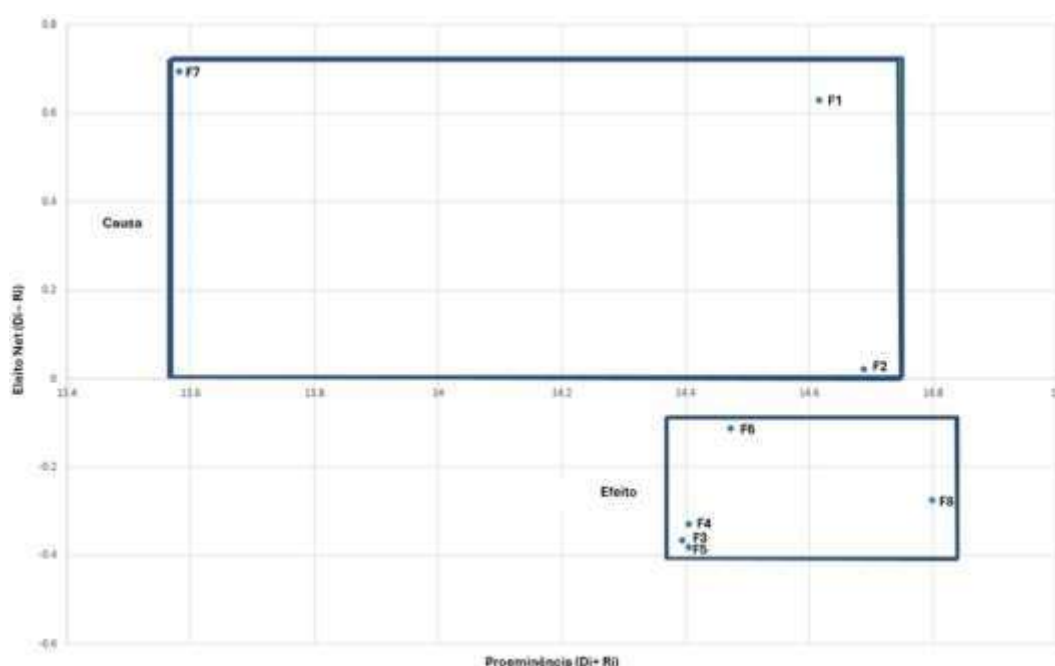


Figura 14 – Diagrama de causa-efeito para facilitadores, agregado para MPMEs.

Fonte: Método DEMATEL.

Com base no mapa DEMATEL (Figura 4), as barreiras e facilitadores são distribuídos em quatro classificações: (i) fatores-chave; (ii) fatores-chave menores; (iii) Fatores indiretos; (iv) Fatores independentes. A Tabela 15 apresenta a distribuição para MPMEs, MEs e resultado agregado para MPMEs, sendo este o foco central para análise neste tópico.

Tabela 15 – Resultados mapa DEMATEL para barreiras e facilitadores.

Barreiras/Facilitadores	MPEs	MEs	MPMEs
Fatores-chave	B1, B6, B7, B8 F1, F2	B1, B6, B7 F1	B1, B6, B7, B8 F1, F2
Fatores-chave menores	F7	F7	F7
Fatores indiretos	B2, B3, B4, B5 F3, F4, F5, F6, F8	B2, B3, B4, B5, B8 F2, F8	B2, B3, B4, B5 F3, F4, F5, F6, F8
Fatores independentes	-----	F3, F4, F5, F6	-----

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

O resultado da classificação das barreiras mostra algumas variações entre MPEs, MEs e MPMEs combinadas. B8 aparece como uma barreira indireta para as MEs e como uma barreira-chave tanto para as MPEs como para as MPMEs combinadas, onde, além de B8, as barreiras B1, B6 e B7 também aparecem como barreiras-chave para as MPMEs. Vale ressaltar que não há classificação de barreiras como barreiras-chave menores ou barreiras independentes.

Para os facilitadores, existe um alinhamento total entre os resultados das MPEs e das MPMEs combinadas. F1 é um facilitador chave. F2 aparece como facilitador principal para as MPEs e MPMEs combinadas, e como facilitador indireto para as MEs. F3, F4, F5 e F6 aparecem como facilitadores independentes para as MEs. F7 sempre aparece como um facilitador chave menor. Não existem facilitadores classificados como independentes para MPEs e MPMEs.

4.2.2

Discussão dos resultados ($D_i + R_i$) e ($D_i - R_i$) do mapa DEMATEL

As principais barreiras e facilitadores são avaliadas usando o método Fuzzy-DEMATEL que ajuda a obter compreensões teóricas e implicações práticas. O eixo “ $D + R$ ” significa a causa e efeito total (proeminência). Quanto maior o valor de “ $D + R$ ” maior será a influência da barreira ou facilitador. A classificação comparativa dos fatores proeminentes com base nas pontuações “ $D + R$ ” aparece na Tabela 16, separadamente para MPEs, MEs, e em resultado combinado para MPMEs. O valor de “ $D - R$ ” mostra o efeito líquido da barreira ou facilitador. A barreira ou facilitador será considerada uma causa (se resultado positivo no eixo) ou efeito (se resultado negativo no eixo). Consistente com [Bai & Sarkis (2013)], os efeitos líquidos podem orientar proposições como sugeridas nesse estudo. As organizações ganham ao concentrarem esforços nos fatores causais, atacando os fatores de efeito

depois [Raj et al. (2020)]. Os fatores mais influentes ($D - R$ positivo) e consequentes ($D - R$ negativo) são diferentes de acordo com o porte da empresa, sendo essa a razão para propostas práticas distintas e para a elaboração de políticas. Barreiras ou facilitadores com maior valor $D - R$ geram mais influência, sendo considerados de maior prioridade ou importância [Han & Deng (2018)].

Tabela 16 – Resultados $Di + Ri$ e $Di - Ri$ para barreiras e facilitadores para MPEs e mês.

$Di + Ri$ (Proeminência)			
Fator	MPEs	MEs	MPMEs (combinado)
Barreiras	$B5 > B1 > B4$	$B5 > B3 > B8$	$B5 > B3 > B1$
Facilitadores	$F4 > F5 > F6$	$F8 > F1 > F2$	$F8 > F2 > F1$
$Di - Ri$ (Efeito <i>net</i> / importância)			
Fator	MPEs	MEs	MPMEs (combinado)
Barreiras	$B7 > B6 > B8$	$B6 > B7 > B1$	$B7 > B6 > B1$
Facilitadores	$F7 > F1 > F2$	$F1 > F7$	$F7 > F1 > F2$

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2021).

Uma vez calculados estes fatores de causa (valores $D - R$), a Tabela 16 classifica as barreiras e facilitadores para MPEs, MEs e MPMEs, oriundas dos resultados das indicações de causa e efeito apresentados nas Figuras 9 a 14.

A magnitude e a ordem dos fatores variam de acordo com o porte da organização, o que leva a duas proposições distintas, como segue:

P10 — Nas MPEs, os principais obstáculos aos investimentos em P&D, melhorias e conhecimentos poderiam ser contornados ou mitigados por uma cultura centrada em dados, com integração interdisciplinar e holística, integração de clientes e fornecedores, aliada à adoção de pensamento de ciclo de vida e processos circulares.

P11 — Nas MEs, os impedimentos dos custos de melhoria e condições econômicas em OSCM, a resistência à mudança, e a necessidade de recursos alternativos e necessidades energéticas podem ser mitigados pelos facilitadores proeminentes da falta de apoio da alta administração e alinhamento estratégico, do empoderamento dos colaboradores, compartilhamento dos conhecimentos e da comunicação eficaz.

Finalmente, são apresentadas quatro propostas para gestores e decisores políticos para completar as discussões e chega-se à interpretação final dos resultados da investigação:

P12 — As MPEs devem abordar na sequência B7, B6, B8 e B1. As barreiras restantes devem ser abordadas sequencialmente.

P13 — As MPEs beneficiariam de investimentos prioritários de tempo e esforços nos facilitadores F7, F1 e F2. Os restantes facilitadores poderiam ser contemplados como uma prioridade de segunda ordem.

P14 — As ações prioritárias das MPMEs para contornar as barreiras de causa devem ser orientadas para mitigar B6, B7 e B1. As barreiras consequentes deverão ser abordadas mais tarde. B1, B6 e B7 são barreiras fundamentais e devem receber prioridade no tratamento pela empresa e pelos demais grupos de interesse envolvidos, como governos e instituições de ensino e formação técnica. A barreira B8 também chama a atenção como barreiras-chave para as MPEs e como uma barreira indireta para as MEs, o que nos permite atestar maior dificuldade das MPEs em superar esta barreira devido ao acesso menos formal a programas de financiamento de energia limpa, especialmente nos países em desenvolvimento. Uma sugestão plausível é a redução das garantias financeiras reais para que as MPEs possam acessar mais facilmente linhas de financiamentos disponíveis.

P15 — As políticas e os programas de ação para as MEs devem ser orientados prioritariamente para melhorar os facilitadores F1 e F7, antes de abordar os facilitadores consequentes. O facilitador F1 é considerado um facilitador-chave. Outro destaque é F2, considerado facilitador indireto para MEs e facilitador chave para MPEs e MPMEs combinadas. Este resultado faz muito sentido quando se olha para as principais barreiras porque estes dois facilitadores estão diretamente associados principalmente as barreiras B1 e B7.

4.2.3

Barreiras e facilitadores dominantes nos mecanismos PPT e dimensões TBL

Esta subseção aborda a PP2. O Apêndice E (tabelas F1, F2, F3 e F4) apresentam resultados para barreiras e facilitadores para os mecanismos PPT e para as dimensões TBL. A Tabela 17 apresenta os níveis de impacto para a integração

da S-I4.0 nas cadeias de suprimentos das MPMEs a partir das perspectivas dos mecanismos PPT e das dimensões TBL, respectivamente, para barreiras e facilitadores. Os resultados foram obtidos utilizando uma variação do método ARAS [Zavadskas & Turkis (2010)], em que, em vez de considerar a classificação das barreiras e/ou facilitadores em cada um dos “eixos” das duas dimensões, a barreira/facilitador foi alocada ao “eixo” em que apresentou a maior pontuação para aquele mecanismo ou dimensão (destacado em ambas as tabelas). Esta dominância é destacada para todas as barreiras e facilitadores (uma para cada dimensão TBL em verde, e uma para cada mecanismo PPT em azul).

Tabela 17 – Resultado dominância (ARAS) para barreiras e facilitadores

Barreira	Dimensões TBL			Mecanismos PPT		
	Econômica	Ambiental	Social	Pessoas	Processos	Tecnologia
B1	0,843130	0,815608	0,832527	0,821309	0,853053	0,813003
B2	0,878393	0,693337	0,728074	0,808457	0,802290	0,884597
B3	0,787279	0,775375	0,817745	0,900256	0,800364	0,729955
B4	0,835287	0,704704	0,681797	0,697936	0,742004	0,723651
B5	0,854444	0,78785	0,693159	0,671828	0,718692	0,735546
B6	0,708976	0,712017	0,688643	0,592859	0,641754	0,630998
B7	0,780220	0,769468	0,791294	0,753611	0,735954	0,630818
B8	0,754214	0,853793	0,747852	0,707832	0,74756	0,787845
Facilitador	Econômica	Ambiental	Social	Pessoas	Processos	Tecnologia
F1	0,843871	0,802741	0,796163	0,892478	0,858459	0,782257
F2	0,771220	0,739911	0,777235	0,819092	0,780205	0,750948
F3	0,771936	0,787702	0,749858	0,721899	0,747779	0,686951
F4	0,803038	0,724309	0,697061	0,645855	0,746301	0,823665
F5	0,748944	0,802507	0,762297	0,728640	0,749786	0,709140
F6	0,869265	0,762289	0,723838	0,714353	0,772251	0,765769
F7	0,752181	0,809042	0,790227	0,661256	0,694421	0,635966
F8	0,808302	0,786677	0,711043	0,708560	0,699522	0,814398

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2024).

Com base nestas conclusões da investigação, a Figura 15 apresenta um diagrama com as barreiras dominantes (B) e facilitadores (F) dentro dos

mecanismos PPT e das dimensões TBL, oferecendo um esboço da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs. Ainda aqui, tal resultado foi rotulado como um “esboço”, por ainda não contemplar as relações causais, de efeitos, e influências entre as barreiras e entre os facilitadores, apresentadas e discutidas mais adiante na pesquisa.

		TBL		
		Econômica	Ambiental	Social
PPT	Pessoas	F1: Comprometimento da alta administração / Alinhamento estratégico	-	B3: Resistência à mudança / práticas de gestão de mudanças e adoção de inovação para a sociedade B7: Falta de comprometimento da alta administração F2: Empoderamento dos colaboradores + Compartilhamento do conhecimento + Comunicação eficaz F7: Pressões governamentais e institucionais
	Processos	B1: Falta de conhecimento técnico B4: Falta de investimento em P&D (pesquisa e desenvolvimento) F6: Integração de clientes e fornecedores	B6: Falta de apoio da autoridade reguladora/legislação deficiente F3: Processo interno de inovação F5: Integração interdisciplinar e holística + Pensamento de ciclo de vida e processos circulares F7: Pressões governamentais e institucionais	-
	Tecnologias	B2: Questões de segurança cibernética B5: Custos de melhoria e condição econômica em OSCM (operações e gestão da cadeia de suprimentos) F4: Soluções centradas em dados + Fluxo consistente de dados F8: Valorizar centros de P&D (Pesquisa & Desenvolvimento)	B8: Recursos alternativos e necessidades energéticas	-

Figura 15 – Esboço do *framework* para integração da S-I4.0 nas cadeias de suprimentos de MPMEs.

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2024).

A análise da Figura 15 é realizada pela perspectiva do posicionamento no gráfico e para os mecanismos PPT e as dimensões TBL. A seguir, são fornecidos exemplos de tais análises com o objetivo de mostrar como ajuda as MPMEs para a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos.

Nota-se um maior número de barreiras/facilitadores dominantes presentes nas seguintes classificações: (i) dimensão ambiental/mecanismo de processo (quatro); (ii) dimensão econômica/mecanismo tecnológico (quatro), em seguida temos: (iii) dimensão social / mecanismo pessoas (três), e (iv) dimensão econômica / mecanismo processos (três). Esses requerem mais atenção das MPMEs. Por exemplo, a primeira classificação na dimensão ambiental / mecanismos processos abrange três facilitadores (F3, F5 e F7) e uma barreira (B6), o que indica ser uma arena para as MPMEs alavancarem a integração da S-I4.0 e da sustentabilidade em suas cadeias de suprimentos através dos indicadores de “liderança transformacional para inovação organizacional” [Zhang et al. (2022); Purwanto & Juliana (2022); Chen et al. (2021)], “aumentar a adoção de capacidades de produção digital” [Trujillo-Galego et al. (2022); Benzidia et al. (2021)], “integração estratégica das

operações” [Caiado et al. (2021); Kumar, P. et al. (2020); Chiarini & Kumar (2021)], “uso de sistemas de monitoramento dinâmicos” [Zhang et al. (2022); Xu et al. (2021)], “autorização, inspeção e regulamentação das operações” [Rodrigues (2021); Grosso et al. (2020); Zhao et al. (2019)], “compromisso da gestão e da estrutura organizacional com a capacidade de resposta às pressões externas” [Jazairi & von Haartman (2020); Daddi et al. (2020); Cowell & Joshi (2013)], “baixo nível de envolvimento e sinergia das autoridade reguladora com a empresa” [Müller & Voigt (2018); Roy & Mashud (2022); Bisaga et al. (2021)] e “legislação limitada ou obsoleta associada as recorrentes inovações inerentes ao avanço tecnológico” [Jemala (2021); Li et al. (2020); De et al. (2020); Souza & Voss (2008)].

Pela análise individual, na análise das barreiras, a dimensão econômica do TBL é a mais desafiadora, pois oferece quatro barreiras diferentes, duas associadas à tecnologia (B2 e B5) e outras duas ao processo (B1 e B4). As MPMEs precisam enfrentá-las para alavancar a dimensão econômica tratando de “processos inadequados de monitoramento e controle” [Bueno et al. (2023); Thomé et al. (2016a); Doherty & Tajuddin (2018)], “fraqueza em casos de ataques e ameaças associadas ao uso indevido da tecnologia disponível para a segurança da informação” [Kouhizadeh et al. (2021); Li & Liu (2021)], “procedimentos errados ou baixo nível de reuso e recuperação dos produtos” [Ahmad et al. (2022); Aboagye et al. (2021)], “baixo nível de priorização na seleção e utilização de produtos, serviços e empresas com práticas sustentáveis, através da cadeia de suprimentos” [Gunduz et al. (2021); Trujillo-Galego et al. (2021)], “falta de treinamento profissional a equipe” [Pardo-Garcia & Barac (2020); Charband & Navimipour (2016)], “falta de compartilhamento de conhecimento da metodologia e práticas” [Michna & Kmieciak (2020); Zhang et al. (2018)], “falta de condições financeiras e/ou estrutura organizacional” [Michna & Kmieciak (2020); Yang et al. (2021); Nagurney et al. (2019)] e “falta de apoio da alta administração” [Majundar et al. (2021); Koh et al. (2019)]. Do ponto de vista do mecanismo, o processo está associado a quatro facilitadores (F3, F5, F6 e F7), oferecendo uma excelente perspectiva para alavancar a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs.

Observa-se que a dimensão social do TBL tem menos facilitadores dominantes, o que pode ser resultado em seu mais recente ganho de relevância, já que a maturidade desta dimensão entre os especialistas é mais incipiente. Para

investigar esta observação, pesquisas futuras devem ser realizadas. Também pode apontar nessa direção a partir do fato da dimensão social ter apenas cruzamento com o mecanismo pessoas, ressaltando o fato de que o mecanismo pessoas seja mais facilmente associado à dimensão social do que os mecanismos de processos e tecnologias. Importante lembrar que é possível fazer análises adicionais para além do aspecto da dominância, que se trata de uma limitação desse estudo.

Do ponto de vista do paradigma I5.0, que visa integrar perfeitamente a inteligência humana e da máquina de maneira sustentável, cada grupo de barreiras poderia ser confrontado através de um conjunto de princípios I5.0 [Ivanov (2023)] que serve como uma solução para a integração S-I4.0 em cadeias de suprimentos. Por exemplo, as barreiras B1 e B2 são, respectivamente, abordadas através dos princípios de colaboração/compartilhamento do conhecimento e formação profissional [Michna & Kmiecik (2020); Pardo-Garcia & Barac (2020); Charband & Navimipour (2016); Zhang et al. (2028)], coordenação de monitorização/controle e tecnologia de segurança da informação [Kouhizadeh et al. (2021); Doherty & Tajuddin (2018); Liu et al. (2011); Li & Liu (2021)]. Esses princípios aprimoram as capacidades dos sistemas I5.0, garantindo monitoramento, controle e resposta eficazes às ameaças [Ivanov (2023)]. Da mesma forma, as barreiras relacionadas a B3 são combatidas por decisões tecnológicas inovadoras, desenvolvimento da capacidade da empresa [Caiado et al. (2022); Birkel et al. (2019); Gupta et al. (2020); De et al. (2020)], gestão eficaz, e sistemas de governança/conformidade [Caiado et al. (2022); Lima & Galleli (2021)]. Isto promove uma abordagem centrada no ser humano, promovendo a utilização ética da tecnologia, facilitando assim a transição mais suave para práticas modernas da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs.

A barreira B4 é mitigada através do apoio da alta administração e da melhoria da estrutura organizacional. Isto permite a adaptação dinâmica dos sistemas de produção e cadeia de suprimentos, superando desafios financeiros e limitações organizacionais [Michna & Kmiecik (2020); Yang et al. (2021); Nagurney et al. (2019)]. Os desafios econômicos, tais como relacionados a barreiras B5, são tratados por princípios que enfatizam a sustentabilidade [Ahmad et al. (2022); Aboagye et al. (2021)] e a viabilidade na seleção e utilização de produtos e serviços em cadeias de suprimentos sustentáveis [Birkel et al. (2019); Gunduz et al. (2021); Trujillo-Galego et al. (2021)]. Isto implica uma mudança em direção a um

“novo TBL”, dando prioridade à concepção de valor resiliente, ao bem-estar humano e à sociedade sustentável. As considerações relacionadas a B6, incluindo a falta de apoio das autoridades reguladoras, são resolvidas através de princípios que defendem a autorização, a inspeção e o avanço tecnológico ético. Isto garante um ambiente regulatório favorável alinhado com os objetivos I5.0 [Müller & Voigt (2018); Roy & Mashud (2022); Bisaga et al. (2021); Durán & Córdova (2015)].

Além disso, a barreira B7 é abordada através da tomada de decisões colaborativas [Wine et al. (2022); Cui et al. (2022); Goy et al. (2016)], da comunicação eficiente e dos princípios das campanhas de sensibilização [Konrad (2019); Kowal-Bourgonjon & Jacobs (2019)]. Estas promovem ecossistemas centrados no ser humano, incentivando a gestão partilhada e o compromisso direto da alta administração. Finalmente, B8 é combatida através de condições técnicas para adequação [Caiado et al. (2021); Shanmugan & Razak (2021); Anton et al. (2019)], e a necessidade de fundos através de investimentos em tecnologias apropriadas [Flynn et al. (1990); Polzin et al. (2021); Gredel et al. (2012)]. Tecnologias I4.0 como a Internet das Coisas (IoT) desempenham um papel fundamental na resposta às necessidades energéticas e no reforço da sustentabilidade global. Considerando a lista de facilitadores, F7 (Pressões governamentais e institucionais) poderia alinhar-se estreitamente com a abordagem da barreira B7. Especificamente, os indicadores relacionados com F7.2 - Comprometimento da gestão e da estrutura organizacional para capacidade de resposta às pressões externas [Jazairy & von Haartman (2020); Daddi et al. (2020)] podem desempenhar um papel importante na promoção do compromisso e envolvimento necessários da alta administração para a superação de barreiras para a integração S-I4.0 em cadeias de suprimentos, facilitando assim a transição natural para I5.0.

4.3

Artefato gerencial para apoiar MPMEs na jornada da S-I4.0 – versão preliminar

Esta seção está voltada endereçar parcialmente a PP3, estando associada ao OE (v) definido no capítulo introdutório desta tese. Neste sentido, a seção oferece

a versão preliminar do artefato gerencial para apoiar MPMEs na jornada de integração da S-I4.0 em suas cadeias de suprimentos.

Barreiras e facilitadores nos grupos causais e de efeito para MPMEs são analisadas e validadas, permitindo a conclusão de que há variações quando se trata do porte da organização (MPEs ou MEs), além de apresentarem influências diferentes entre esses construtos, também conforme o porte da organização. Portanto, apresentam-se artefatos adaptados para MPEs e MEs, tanto para superação das barreiras quanto para potencialização dos facilitadores. Importante ressaltar que cada barreira e facilitador é composta por dois indicadores cada que também compõem o artefato gerencial conforme representado graficamente.

As Figuras 16 e 17 apresentam a estrutura para integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos para MPEs e MEs, segregando barreiras (lado esquerdo da figura) dos facilitadores (lado direito da figura) para facilitar a visualização. Há uma legenda tricolor em tons da cor verde para facilitar a origem e o destino das influências através das setas indicadoras. Tanto para barreiras quanto para facilitadores há maior frequência na dimensão econômica do TBL, sempre com quatro das oito barreiras ou facilitadores, ou seja, 50% da frequência, com uma barreira ou facilitador classificado como causal. Em relação às barreiras para MPEs e MEs, a frequência é duas para as dimensões ambiental e social do TBL. No que diz respeito aos facilitadores para MPEs e MEs, a frequência é três para a dimensão ambiental e uma para a dimensão social do TBL. Em relação ao eixo dos mecanismos PPT para barreiras, há um maior equilíbrio de frequência tanto para as MPEs quanto para as MÊS, onde a frequência é três para o mecanismo tecnologias, três para processos e duas para pessoas. Ainda em PPT, mas agora para facilitadores, há uma frequência maior no mecanismo processos com cinco facilitadores, do que em pessoas com dois, e em tecnologias com uma.

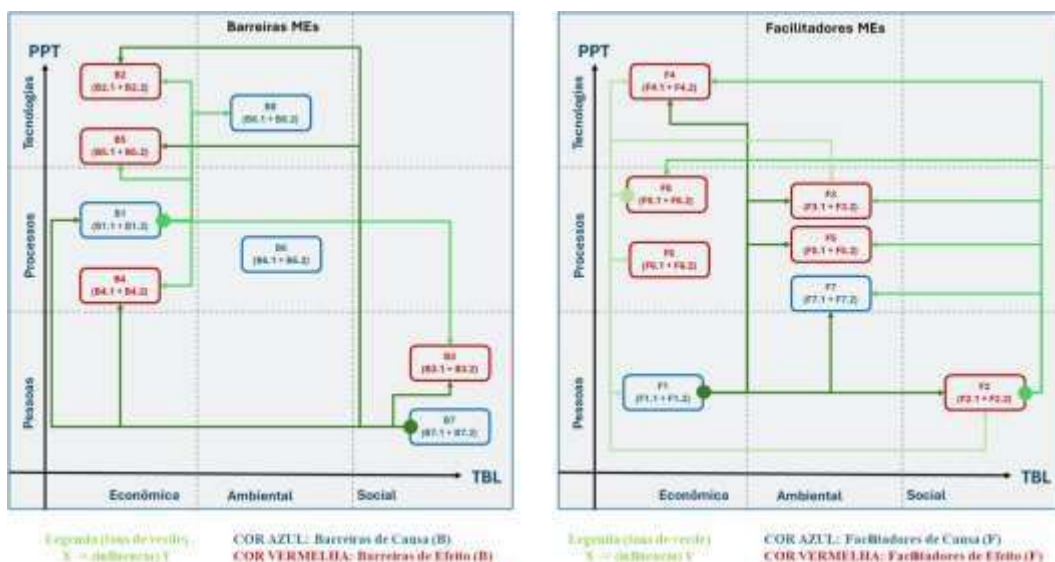
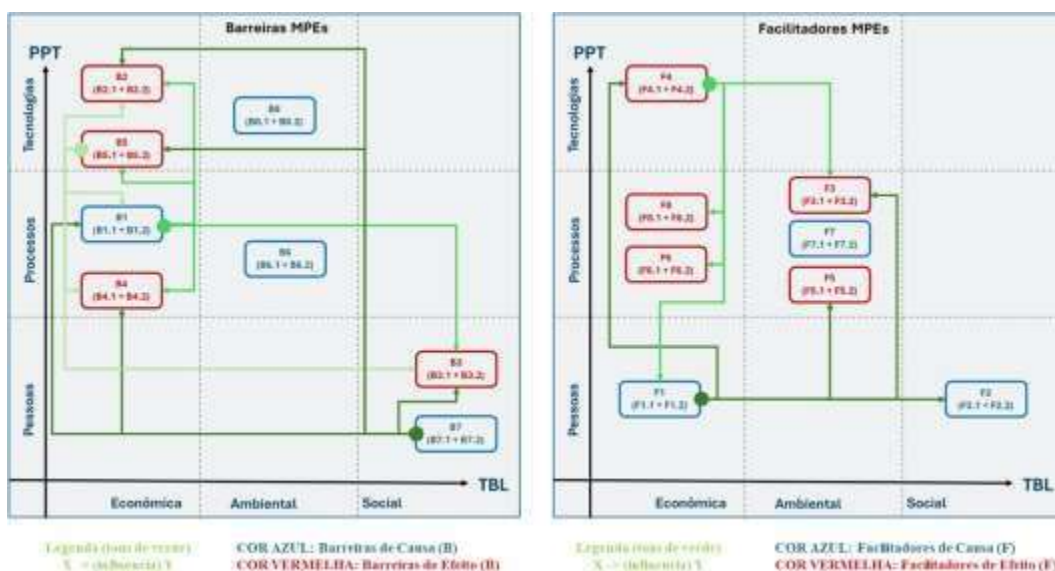


Figura 17 – Artefato das barreiras e facilitadores para MEs.
Fonte: Adaptado de Machado et al. (2024).

B1 e B7 podem ser destacados como barreiras causais tanto para MPEs quanto para MEs, com as MEs tendo mais relações de influência para ambas. É importante ressaltar que B7 influencia B1 em ambos os casos. B5 também chama a atenção para a maior relevância dos custos de melhoria e da condição econômica do OSCM nas MPEs. No que diz respeito aos facilitadores, F1 desempenha um papel de liderança nas MPEs e MEs, com F1 influenciando F2 em ambos os casos, sendo F2 um facilitador causal em MPEs e um facilitador de efeito em MEs. F4 aparece como uma barreira influenciadora em MPEs, sendo substituído por F8 em MEs. Ao aprofundar a análise das Figuras 16 e 17 em relação as semelhanças ou

complementaridades entre as barreiras e facilitadores mais impactantes, é plausível recomendar tanto gestores de MPEs quanto de MEs, que concentrem a atenção primária em B7 e F1, com foco e atenção na eliminação da falta de comprometimento da alta administração, além do potencial relacionado ao alinhamento estratégico da organização. Também é notado para as MEs, que F8 assume relevância para a organização, sendo recomendado o estabelecimento de orçamento e processos específicos para resultados sustentáveis relacionados à pesquisa e desenvolvimento.

As Figuras 16 e 17 apresentam informações adicionais relevantes para gestores de MPEs e MEs, dado que: (i) B7 (social – TBL e pessoas – PPT) é uma barreira fundamental, pois influencia B1; (ii) F1 (econômica – TBL e pessoas – PPT) é um facilitador fundamental, pois influencia F2; (iii) para as MPEs, B5 (econômica -TBL e tecnologias - PPT) destaca a criticidade das barreiras associadas ao custo da mudança para as empresas menores, e F4 (econômica -TBL e tecnologias - PPT) destaca a importância de facilitadores que permitem uma maior flexibilidade e agilidade; e (iv) para MEs, F8 (econômica – TBL e processos – PPT) destaca que as parcerias com organizações de pesquisa e desenvolvimento são importantes.

Além disso, apresentam conclusões adicionais sobre as influências entre barreiras e facilitadores. Olhando para as barreiras, nota-se que o número de principais influenciadores é três para as MPEs e diminui para dois nas MEs. A barreira B5 não influencia no contexto das MEs. O oposto acontece com os facilitadores; existem dois facilitadores para as MPEs e este número aumenta para três nas MEs. Os facilitadores F2 e F8 passam a influenciar no contexto das MEs, enquanto F4 deixa de ser um influenciador nesse mesmo contexto.

Na Figura 16 (Barreiras e facilitadores para MPEs – eixo TBL e PPT), as barreiras de causa (C) são B1, B6, B7 e B8. As barreiras de efeito (E) são B2, B3, B4 e B5. B1(C) influencia B2(E) / B3(E) / B4(E) / B5(E). B5(E) influencia B1(C) / B2(E) / B3(E) / B4(E). B7(C) influencia B1(C) / B2(E) / B3(E) / B4(E). Os facilitadores de causa são F1, F2 e F7. Os facilitadores de efeito são F3, F4, F5, F6 e F8. F1(C) influencia F2(C) / F3(E) / F4(E) / F5(E). F4(E) influencia F1(C) / F3(E) / F6(E) / F8(E).

Na Figura 17 (Barreiras e facilitadores para MEs – eixo TBL e PPT), as barreiras de causa são B1, B6 e B7. As barreiras de efeito são B2, B3, B4, B5 e B8.

B1(C) influencia B2(E) / B3(E) / B4(E) / B5(E) / B8(E). B7(C) influencia B1(C) / B2(E) / B3(E) / B4(E) / B5(E). Os facilitadores de causa são F1 e F7. Os facilitadores de efeito são F2, F3, F4, F5, F6 e F8. F1(C) influencia F2(C) / F3(E) / F4(E) / F5(E). F2(E) influencia F3(E) / F4(E) / F5(E) / F7(C) / F8(E). F8(E) influencia F1(C) / F2(E) / F3(E) / F4(E) / F6(E).

Examinar as barreiras e facilitadores identificados através das lentes do I5.0 revela relações de causa e efeito diferenciadas, especialmente quando se consideram fatores contingentes como o porte da organização e o contexto único de países em desenvolvimento (nesse caso, organizações brasileiras). Estas complexidades impactam e desafiam ainda mais as MPEs e as MEs para a adoção dos princípios I5.0. No contexto brasileiro, a falta de conhecimento técnico (B1) traz implicações distintas para MPEs e MEs. Embora as MPMEs enfrentem o desafio da formação insuficiente do pessoal (associado ao indicador B1.1) [Pardo- Garcia & Barac (2020); Charband & Navimipour (2016)] e da falta do compartilhamento do conhecimento (B1.2) [Michna & Kmiecik (2020); Zhang et al. (2018)], a influência da falta de comprometimento da alta administração (B7) como barreira causal é mais relevante para as MEs. A dinâmica relacionada ao porte sugere que empresas maiores podem encontrar complexidades adicionais na promoção de um compromisso com práticas compartilhadas e colaborativas (indicador associado a B7.1) [Cui et al. (2022); Goy et al. (2016); Bai & Sarkis (2013)] e comunicação eficiente (indicador associado a B7.2) [Komrad (2019); Kowal-Bourgonjon & Jacobs (2019)], enfatizando a necessidade de estratégias personalizadas baseadas no porte da organização dentro do contexto de um país em desenvolvimento como no Brasil. Da mesma forma, as barreiras relacionadas ao custo de melhoria e condição econômica em OSCM (B5) apresentam maior relevância para as MPEs no contexto brasileiro. Os desafios econômicos que as MPEs enfrentam destacam a criticidade das barreiras associadas ao custo da mudança, sublinhando a necessidade de intervenções específicas para aliviar as restrições financeiras e facilitar a integração de práticas sustentáveis em toda a cadeia de suprimentos [Birkel et al. (2019); Gunduz et al. (2021); Shoukoohyar & Seddigh (2020)].

Facilitadores como (F1) e (F2) desempenham um papel de liderança tanto nas MPEs como nas MEs. No entanto, a relação causal entre estes facilitadores é mais efetiva nas MPEs, onde o compromisso da alta administração se torna um fator

crucial que influencia o desenvolvimento de competências e especialistas específicos (indicador associado a F2.2) [Saniuk et al. (2023); Shevyakova et al. (2021); Wikarek & Sitek (2021)]. A adaptabilidade e a agilidade inerentes aos princípios I5.0 tornam-se particularmente relevantes para as MPEs na superação dos desafios colocados pelos limitados recursos e condições financeiras.

Além disso, num país em desenvolvimento como o Brasil, onde os quadros regulamentares e legislativos podem estar evoluindo, B6 pode apresentar desafios únicos. O envolvimento e a sinergia limitados entre as autoridades reguladoras e as organizações (indicador associado a B6.1) [Müller & Voigt (2018); Roy & Mashud (2022); Bisaga et al. (2021)] podem afetar desproporcionalmente as MPEs, realçando a necessidade de um ambiente regulador mais favorável para facilitar a adoção e avanço da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos pelas MPMEs.

4.4

Aplicação do *framework* via múltiplo estudo de casos

Esta seção complementa a anterior no que se refere ao endereçamento da PP3, estando voltada ao OE (vi) definido no capítulo introdutório desta tese. Neste sentido, a seção apresenta os resultados do MEC que visou validar e aplicar o artefato gerencial para apoiar MPMEs na jornada de integração da S-I4.0 em suas cadeias de suprimentos oferecido na seção anterior. A seção apresenta os resultados empíricos e as lições aprendidas com a realização do MEC guiado pelo artefato gerencial proposto. Espera-se, assim, oferecer aos praticantes das MPMEs um guia para apoiá-los em sua jornada da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos. Informações complementares associadas ao MEC encontram-se em Machado et al. (2025).

4.4.1

Introdução

O representante da MPE1 reconheceu o valor de todas as dimensões do TBL e dos mecanismos PPT, ressaltando que os clientes demandam e monitoram serviços de alto valor com impacto direto na cadeia de suprimentos, especialmente em clientes e fornecedores. A lente DCT mostrou-se altamente adequada para a

empresa, que opera em um setor de rápidas transformações tecnológicas, adaptando-se continuamente às mudanças e inovando para manter a competitividade sustentável. O entrevistado concordou plenamente com a aderência e aplicabilidade do framework à realidade operacional.

O representante da MPE2 apreciou os eixos do framework (TBL e PPT), destacando a classificação de dominância dentro desses eixos. Ele observou que as classificações de causa e efeito para barreiras e facilitadores aprimoram a compreensão das dinâmicas envolvidas. Comentou: “... visualizar a dominância em ambos os eixos também chama atenção para os pontos de maior impacto”. A lente DCT foi considerada valiosa devido à capacidade adaptativa, abordando mudanças no ambiente externo e demandas significativas dos clientes. O framework foi considerado compreensível, aplicável e útil, com recomendação de desenvolver um guia (impresso e eletrônico) ou aplicativo para facilitar sua utilização.

A MPE3 destacou a utilidade da dominância nos eixos TBL e PPT para compreender os impactos potenciais de ações sobre barreiras e facilitadores, com maior relevância na detecção de oportunidades e ameaças, bem como na transformação de recursos técnicos e humanos disponíveis. As capacidades mais importantes para a empresa são as adaptativas e inovadoras. O framework foi visto como um guia estruturado e sistemático, sendo compreensível, aplicável e útil.

O representante da ME1 ofereceu considerações separadas sobre os eixos TBL e PPT. O framework é aplicável aos impactos econômicos e sociais no eixo TBL e, no eixo PPT, o impacto nos processos é crucial, exigindo o envolvimento dos mecanismos do outro eixo. As lentes PBV e DCT mostraram-se relevantes, particularmente pela capacidade de absorver conhecimento externo por meio de acordos de transferência de tecnologia ou parcerias com centros de pesquisa. O framework foi sugerido como um guia passo a passo, com recomendação de criar um aplicativo para registrar a evolução histórica das medições. Todos os entrevistados, especialmente o CEO, enfatizaram a usabilidade e aplicabilidade do framework.

O entrevistado da ME2 ressaltou a importância de compreender a dominância em cada eixo (TBL e PPT). A empresa enfatiza os processos e o eixo tecnológico do PPT, bem como a dimensão econômica do TBL, devido à relevância para o desempenho operacional. Sob a perspectiva da DCT, todas as capacidades são úteis, com destaque para a capacidade de absorver conhecimento externo por

meio de processos agressivos de aquisição de talentos. O guia prático foi considerado totalmente aplicável, ajudando gestores seniores com menor conhecimento técnico a refletir sobre barreiras e facilitadores.

Os entrevistados da ME3 consideraram o framework aplicável por facilitar a percepção de barreiras, facilitadores e suas relações de causa e efeito. A dominância nos eixos TBL e PPT foi considerada útil, embora impactos não dominantes sejam eventualmente relevantes. Essa limitação foi apontada como oportunidade para estudos futuros. Sob as lentes PBV e DCT, a capacidade adaptativa destacou-se devido às demandas dos clientes, que variam conforme os contratos e os ambientes de serviço. O guia prático oferece materialidade em todas as etapas do processo de implementação, auxiliando a alta gestão a compreender sua importância ao longo da transformação digital.

4.4.2

Micro e pequenas empresas (MPes)

As três MPes reconhecem a relevância das barreiras B1, B5 e B7. Conhecimento técnico, aspectos econômicos relacionados à OSCM e o comprometimento da alta gestão foram apontados como barreiras-chave no ambiente empresarial das MPes. Todas percebem alinhamento entre B7 e E1, devido à importância do comprometimento da alta gestão e do alinhamento estratégico para o desenvolvimento e sustentabilidade dessas empresas. O F4 também é considerado um facilitador central, especialmente pela relevância da consistência no fluxo de dados. Duas das três MPes associaram B3 à mitigação de B7 e ao fortalecimento de F1, o que é coerente com o framework das barreiras, embora este estudo não explore relações cruzadas de causa, efeito e influência entre barreiras e facilitadores. Nessas MPes, os sócios, que acumulam a função de alta gestão, estão diretamente envolvidos nas atividades. Embora isso proporcione agilidade, também gera sobrecarga de tarefas. Além disso, o crescimento das MPes apresenta desafios como custos econômicos elevados e a necessidade de decisões acertadas relacionadas a plataformas operacionais, não havendo margem para erros.

A barreira B2 é considerada importante, dado que o mercado frequentemente destaca aspectos ligados à cibersegurança. MPes que não atuam diretamente nessa área precisam planejar investimentos em sistemas que mitiguem

B2, evitando custos fixos e recorrentes excessivos que comprometam sua competitividade. A barreira B3 também é relevante, especialmente para MPE1 e MPE2. A MPE1 enfatiza que a inovação atrelada à governança e conformidade deve ser perseguida de forma contínua e objetiva.

As barreiras B4 e B6 seguem lógica semelhante: como P&D é ainda mais difícil de ser estruturado nas MPEs, o investimento deve ser realizado por meio de instituições especializadas nesse propósito. Sobre B6, MPE2 e MPE3 afirmam não possuir estrutura para mitigá-la, enquanto MPE1 atua por meio de instituições representativas, reconhecendo que é um processo lento e demanda tempo contínuo de sócios envolvidos em atividades estratégicas. O F8 está diretamente ligado a B4 e deve seguir abordagem semelhante, segundo as MPEs.

Em relação à B8, as MPEs demonstram interesse em fontes de energia renováveis, como a adoção de painéis solares. Quanto a recursos alternativos, MPE1 e MPE3 mencionam a preferência por itens biodegradáveis ou de alta eficiência energética em seus processos de compras.

Entre os facilitadores, o F2 chama a atenção das MPEs. A MPE1 realiza ações sistemáticas para capacitação de funcionários, compartilhamento de conhecimento e comunicação efetiva, mas reconhece que essas práticas poderiam ser mais frequentes e monitoradas. A MPE2 faz menção semelhante, destacando a falta de formalização para garantir melhorias adicionais. A MPE3 observa que o crescimento da empresa abrirá oportunidades para colaboradores alinhados com essas práticas.

Quanto ao F3, a MPE1 recentemente realizou uma transformação interna com a adoção de soluções modernas em nuvem, integrando automação e inteligência artificial. Já as MPE2 e MPE3 apresentam processos informais e incentivos limitados à inovação. Para as MPEs, o estímulo ao F5 deve vir da interdisciplinaridade entre atividades e colaboradores, promovendo flexibilidade funcional.

O F6 é percebido como uma grande oportunidade para as MPEs. Todas veem na participação em cadeias de suprimentos maiores e estruturadas uma chance clara de crescimento sustentável. A MPE1 busca diretamente os clientes de seus contratantes para apresentar soluções e aumentar a conversão de propostas comerciais. Sobre o F7, a percepção e prática são semelhantes à barreira B6. Dada a dimensão das MPEs, sua atuação é passiva, com pouco espaço para influenciar

pressões governamentais. A abordagem mais eficaz e direta se dá por meio de instituições representativas com maior poder de influência.

4.4.3

Médias empresas (MEs)

As barreiras B1 e B7 foram destacadas como centrais pelas MEs, conforme o guia prático apresentado. O conhecimento técnico e o comprometimento da alta gestão foram reconhecidos como barreiras cruciais a serem mitigadas para a integração do S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MEs. Há um consenso sobre o alinhamento entre B7 e F1, com ME1 e ME2 ressaltando que o fortalecimento de F1 deve ser recorrente e formalizado, uma vez que o aumento no comprometimento da alta gestão está diretamente ligado a um alinhamento estratégico mais eficiente.

Em relação à B2, as respostas das três MEs foram complementares. A ME3 concentra sua preocupação nos dados de funcionários e clientes/contratos. Já a ME2 foca na segurança dos dados dos clientes, considerando as automações que permitem consultas a bancos de dados. Por sua vez, a ME1 preocupa-se com os níveis de acesso dos colaboradores e o controle no manuseio das informações. A B3, assim como a B2, foi percebida de forma distinta pelas MEs. A ME1 associa a barreira ao aspecto cultural da insegurança frente à mudanças, enquanto ME2 é mais proativa, oferecendo incentivos para mudanças com impactos positivos. A MPE3, com baixo uso de tecnologia, entende que as inovações devem ser negociadas individualmente ou em pequenos grupos liderados por chefias departamentais.

Sobre a B4, ME2 e ME3 consideram-na uma barreira significativa, agravada pela burocracia. A ME1, por outro lado, já utiliza parcerias em projetos de P&D com centros universitários, obtendo resultados satisfatórios, mas acredita que o desempenho poderia ser melhor com maior foco por parte das instituições de pesquisa. Devido ao alto custo do desenvolvimento comercial e de marketing, essa etapa frequentemente fica desconectada do processo de P&D, sendo inviável para a ME1 arcar com os riscos e custos sem garantias contratuais.

Para a B5, as três MEs reconhecem sua complexidade. A ME1 aponta desafios relacionados à logística e capacidade produtiva. A ME2 destaca economias de escala via robotização, mas lembra que soluções em nuvem mitigam

investimentos elevados a curto prazo. Já a ME3 enfrenta maiores desafios logísticos devido à dispersão dos contratos e locais de atendimento.

A barreira B6 apresenta realidades distintas entre as MEs. A ME3 percebe impacto reduzido e não prioriza sua mitigação. A ME2 identifica volatilidade no mercado de alta tecnologia, com reguladores mal preparados, exigindo atenção constante para reagir às mudanças impostas. Já a ME1 observa alterações frequentes, como variações nas taxas de importação, que afetam diretamente o equilíbrio de mercado.

No caso da B8, a ME1 investe em sistemas de captação e armazenamento de água da chuva. A ME2 busca reduzir custos com energia alternativa, mas sem prioridade no curto prazo. A ME3 privilegia insumos com menor impacto ambiental. Assim, a mitigação da B8 já é uma realidade para as MEs, ainda que por caminhos distintos.

Quanto aos facilitadores, o F2 chama a atenção das MEs pela sua relevância no framework. A ME1 entende que os três aspectos do facilitador deve ser desenvolvido de forma alinhada, dada sua interdependência. ME2 e ME3 afirmam possuir processos sistematizados para estimular o facilitador. Em análise cruzada, o entrevistador percebe que, na ME2, o suporte da alta gestão é formalizado por meio de atas de reuniões.

Para o F3, a ME1 adota processos formais para incentivar a inovação, incluindo recompensas financeiras vinculadas a resultados práticos, como redução de custos. ME2 e ME3 possuem práticas informais, mas demonstram interesse em sistematizar estímulos e mensurações.

O F4 é considerado essencial pela ME1, que reforça a importância de um fluxo de informações confiável para decisões precisas. Segundo o CEO: “...é imprescindível que os tomadores de decisão tenham acesso a dados confiáveis para a sustentabilidade da empresa”. ME2 e ME3 seguem essa mesma linha, tendo investido em sistemas de gestão e controle, embora com fluxo de informações menos avançado que na ME1.

Quanto ao F5, as três MEs concordam sobre a importância da integração interdisciplinar, especialmente em projetos e oportunidades que demandam troca de conhecimentos entre colaboradores. Sendo empresas de serviços, questões relacionadas ao ciclo de vida do produto são minimizadas.

O F6 é particularmente relevante para a ME1, devido à necessidade de integrar fornecedores de insumos e logística, considerando a validade de até 60 dias de seus produtos. Para ME2 e ME3, essa integração também é importante, pois impacta diretamente a prestação de serviços.

Sobre o F8, apenas a ME1 atua diretamente, incentivando funcionários a estreitarem relações com centros de pesquisa e oferecendo bolsas integrais para mestrado e doutorado a colaboradores de destaque. ME2 e ME3 relatam tentativas anteriores sem avanços significativos, devido à burocracia e à demanda de tempo dos líderes.

4.4.4

Análise combinada

Para as MPEs e MEs, o papel da alta gestão é essencial na mitigação de barreiras e na potencialização de facilitadores. B7 e F1 se destacam teoricamente como elementos fundamentais com elevado poder de influência. Na prática, todos os entrevistados ressaltaram a importância crucial da alta gestão na integração do S-I4.0 às cadeias de suprimentos das MPMEs. A falta de conhecimento técnico (B1) foi unanimemente reconhecida como crítica, dificultando a adoção e implementação eficaz de tecnologias avançadas. As barreiras B2 e B4 exigem investimentos econômicos contínuos e substanciais, apresentando um desafio constante, especialmente para empresas menores. A B3 foi considerada uma barreira significativa por todas as MPMEs, com percepções complementares dos entrevistados. O representante da ME3, por exemplo, destacou que, por ser uma empresa com baixo uso de tecnologia em suas atividades principais, a resistência à mudança é menos relevante.

A B5 foi confirmada como barreira para MPMEs, sendo mais desafiadora para MPEs devido ao menor porte e maior dificuldade em comparação com MEs. Quanto à B6, houve consenso de que MPMEs têm influência limitada sobre autoridades reguladoras ou legislativas. Dois entrevistados mencionaram engajamento esporádico, em vez de sistemático, com entidades profissionais para exercer influência. As MPMEs reconhecem a importância da B8, como consumo de energia, descarte de resíduos e compra de insumos ecologicamente corretos. Contudo, na prática, esses aspectos têm impacto operacional reduzido.

Sobre o F2, ele preocupa menos as MPEs devido à estrutura organizacional enxuta. Já as MEs, com departamentos definidos e níveis hierárquicos estratégicos, táticos e operacionais, enfatizam o empoderamento dos colaboradores, o compartilhamento de conhecimento e a comunicação eficaz. Esses fatores são fundamentais para desempenho e competitividade, justificando a maior relevância do F2 para MEs no framework. O F3 é amplamente desejado pelas MPMEs, que enfrentam dificuldades em estruturar e sistematizar processos. As MEs, por sua vez, possuem melhores condições para estimular e recompensar a inovação.

Com relação ao fluxo consistente de dados (F4), as MPEs apontaram desafios no acesso a crédito, dificultando investimentos para superar essa barreira. As MEs apresentaram respostas estruturadas, ressaltando a importância do F4. À medida que as empresas crescem, a mitigação precoce dessa barreira torna-se crítica para sua trajetória. Tanto o F5 quanto o F6 foram marginalmente mencionados por representantes de MPEs e mais enfatizados por entrevistados das MEs, reflexo do porte das empresas e do contexto da cadeia de suprimentos em que operam.

O F7 mostrou-se desafiador para as MPMEs na prática. Alguns entrevistados consideraram tratar-se de uma preocupação de médio prazo ou de ações específicas. Dois respondentes (um de uma MPE e outro de uma ME) manifestaram o desejo de influenciar aumentos tarifários sobre produtos importados semelhantes, mas destacaram o alto custo em termos de tempo e recursos financeiros. O F8 é relevante para MPEs e MEs, especialmente para aquelas que reconhecem a importância de P&D e inovação em suas matrizes operacionais e cadeias de valor. No entanto, as MEs consideram o processo burocrático, trabalhoso e arriscado, exigindo esforços de uma estrutura que, geralmente, não é dedicada a essas atividades.

4.4.5

Guia prático para integrar S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs

Com base nos achados da pesquisa MEC, foi elaborado um guia prático para integrar S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs. Este guia serve como uma ferramenta valiosa para gestores, apresentando atividades organizadas em dez etapas sequenciais, alinhadas ao ciclo PDCA, que é reiniciado após a conclusão da

etapa 10 (Figura 18). Ressalta-se que as teorias PBV e DCT oferecem perspectivas relevantes para compreender melhor o ambiente empresarial no qual as MPMEs estão inseridas, com ênfase especial nas etapas 2 e 10. Estas etapas destacam a necessidade de compreender as capacidades dinâmicas e constantes transformações características dos ambientes de negócios em que as MPMEs operam.

Etapa 1: Identificar o porte da empresa (MPE ou ME), selecionar o modelo de framework adequado e medir os indicadores para cada barreira e facilitador.

Etapa 2: Revisar os indicadores selecionados e realizar as adaptações necessárias.

Etapa 3: Verificar se as metas estão alinhadas, abaixo ou acima da realidade da empresa.

Etapa 4: Manter ou definir novas metas para os indicadores de barreiras e facilitadores, além de estabelecer o ciclo de verificação (recomenda-se inicialmente um ciclo de 12 meses, ajustável conforme necessário).

Etapa 5: Solicitar e gerenciar os recursos necessários para atingir as metas estabelecidas.

Etapa 6: Durante o período de verificação definido, monitorar as ações e o desempenho de cada indicador relacionado às barreiras e facilitadores.

Etapa 7: Priorizar a coleta de resultados para os indicadores das barreiras e facilitadores influentes (B1/B5/B7/F1/F4 para MPEs e B1/B7/F1/F2/F8 para MEs) e avaliar seus impactos nos eixos TBL e PPT do *framework*.

Etapa 8: Repetir o procedimento da etapa 7 para os demais indicadores das barreiras e dos facilitadores.

Etapa 9: Avaliar os resultados obtidos com líderes e colaboradores envolvidos no processo.

Etapa 10: Fornecer *feedback* sobre o processo, identificando possíveis melhorias e implementando-as na realidade operacional da empresa.

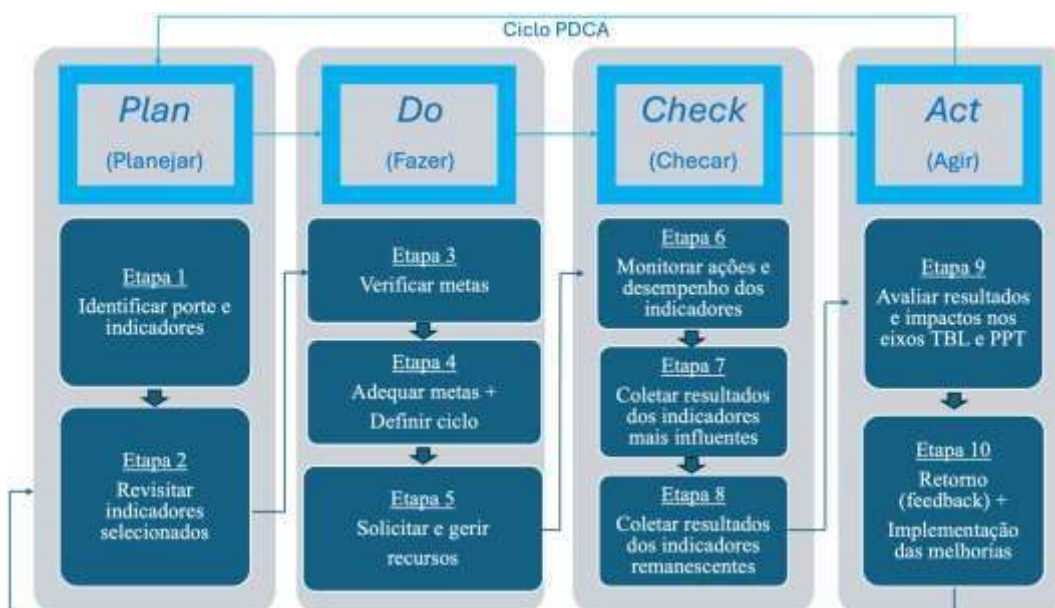


Figura 18 – Guia prático para integrar S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs. Fonte: Adaptado de Machado et al. (2025).

O guia prático oferece diversas contribuições para a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs: (i) Estrutura passo a passo: Proporciona um *framework* claro, detalhando ações e considerações necessárias para facilitar o processo de adoção; (ii) Boas práticas e estudo de casos: Ao longo dos ciclos, as MPMEs constroem um histórico de medidas, permitindo comparações com outras organizações ou dados públicos e acesso a exemplos práticos de implementação eficaz; (iii) Ferramentas e recursos: Apresenta soluções específicas, como softwares, plataformas de coleta de dados e métodos para avaliar impactos de sustentabilidade; (iv) Gestão de recursos: Propõe estratégias para otimização operacional, minimizando desperdícios e impactos ambientais; (v) Engajamento de *stakeholders*: Destaca a importância de envolver fornecedores e clientes, fomentando colaboração ao longo da cadeia de suprimentos; (vi) Métricas de desempenho: Oferece indicadores-chave para avaliar o progresso e apoiar decisões baseadas em dados; (vii) Conformidade regulatória e padrões: Inclui informações sobre regulamentações e certificações relevantes para garantir conformidade; (viii) Adaptabilidade e escalabilidade: Enfatiza a personalização das práticas da S-I4.0 conforme o contexto e as capacidades de cada empresa; (ix) Treinamento e capacitação: Recomenda programas para qualificar colaboradores e gestores na

aplicação eficaz dos princípios da S-I4.0; (x) Visão e metas de longo prazo: Auxilia as MPMEs a definir objetivos sustentáveis e o papel da S-I4.0 em alcançá-los, promovendo desenvolvimento proativo.

4.4.6

Discussão sobre resultados do MEC

Os achados evidenciam as oportunidades da transformação digital para MPMEs, respondendo às lacunas da literatura e apoiando a integração da S-I4.0 às cadeias de suprimentos [Anatan & Nur (2024); Martínez-Peláez et al. (2023); Bhatt & Kumar (2022)]. Destaca-se a importância de diferenciar MPEs e MEs, conforme apontado por Passaro et al. (2023), Azis (2024) e Hernández et al. (2024). Enquanto MPEs enfrentam maiores barreiras, MEs concentram-se na ampliação de fatores facilitadores. Empresas menores lidam com múltiplas demandas concorrentes, enquanto MEs com estruturas mais robustas e maior experiência em liderança, compreendem melhor a dinâmica da S-I4.0.

A pesquisa ressalta a necessidade de estratégias adaptadas às especificidades das MPMEs na transformação digital. Ao reconhecer tais diferenças, formuladores de políticas, líderes do setor e pesquisadores podem desenvolver mecanismos mais eficazes de apoio. Como impulsionadoras da inovação e do crescimento econômico, fortalecer a jornada digital dessas empresas é essencial para aumentar sua competitividade e resiliência em um mercado dinâmico. A adoção do S-I4.0 permite que gestores de MPMEs identifiquem barreiras, facilitadores e indicadores operacionais, convertendo desafios em ações estratégicas. O *framework* clarifica impactos nos eixos TBL e PPT, oferecendo base para sua aplicação prática. Sua natureza cíclica, conforme Machado et al. (2024), reforça o aprendizado contínuo. A incorporação do ciclo PDCA favorece o crescimento sustentável, garantindo agilidade e adaptação às mudanças do ambiente empresarial [Qureshi et al. (2023); Intalar et al. (2024); Alfarizi et al. (2024)]. A S-I4.0 não apenas estrutura a gestão da sustentabilidade, mas também estimula inovação e resiliência, impulsionando práticas empresariais mais responsáveis e sustentáveis. A PBV destaca a relevância das capacidades estratégicas para o desempenho das MPMEs, influenciando decisões e processos cruciais, especialmente em suas fases iniciais. A DCT, por sua vez, fornece um

arcabouço para compreender ambientes dinâmicos e promover uma visão de longo prazo, essencial para reconfiguração de recursos e inovação contínua. Essa abordagem facilita a identificação de oportunidades e ameaças, fator determinante para a sustentabilidade e o crescimento das MPMEs [Teece et al. (2007); Teece (2014); Farzaneh et al. (2021); A-Khatib et al. (2024)].

As análises intra e inter casos apontam padrões relevantes: MPEs enfatizam as barreiras B1, B5 e B7 e os facilitadores F1 e F4, enquanto MEs destacam B1, B7, F1 e F8. A análise cruzada sugere que ambas reconhecem a importância de B7 e F1, indicando que a colaboração pode mitigar desafios. B1 é crítica pela necessidade de conhecimento técnico na integração do S-I4.0, enquanto B2 torna-se mais relevante com o crescimento das empresas. MPEs enfrentam dificuldades com B4 e B8 devido a restrições de financiamento e altos custos operacionais. Diferenças na relação com entidades impactam a gestão do tempo e a representatividade empresarial. F4 reforça a importância de soluções baseadas em dados, enquanto F5 e F6 apresentam desafios na integração ao ecossistema. F7 impõe dificuldades regulatórias, mas a cooperação pode trazer avanços. Apesar do potencial de F8, burocracia e limitações no financiamento de P&D dificultam sua aplicação. Os resultados evidenciados especificamente ao escopo dessa pesquisa reforçam as distinções entre MPEs e MEs na adoção da S-I4.0 em cadeias de suprimentos, conforme evidenciado por Anaman et al. (2023), Bueno-Pascual (2023) e Hernández et al. (2024).

5

Conclusão

A integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos tem importância e impacto crescentes para acadêmicos e profissionais das organizações de todas as indústrias, no entanto há carência de estudos na perspectiva das MPMEs.

De maneira exitosa em termos metodológicos, esta pesquisa adota abordagem de métodos mistos qualitativos e quantitativos, combinando percepções baseadas na literatura com percepções empíricas, para preencher lacunas existentes e cumprir os objetivos geral e específicos relacionados à integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs.

Em termos teóricos os resultados foram gerados a partir do estabelecimento da jornada que começa com identificação das principais oito barreiras, oito facilitadores e 32 indicadores críticos para a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs, cumprindo o OE (i) e o OE (ii). Na sequência, para as barreiras e facilitadores, são identificadas e analisadas suas causalidades e dependências com identificação das mais proeminentes/importantes, atendendo ao OE (iii). Em seguida, foram constatadas e analisadas as dominâncias das barreiras e facilitadores, assim como suas relações causais e de influência em relação aos mecanismos PPT e dimensões TBL, preenchendo assim o OE (iv). Finalmente, esta pesquisa cumpriu seu objetivo geral ao produzir um *framework* e aplicar um guia prático para integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos no contexto das MPMEs, inclusive com aprofundamento ao gerar artefatos diferenciados para MPEs e MEs, finalmente cumprindo o OE (v) e o OE (vi).

Este estudo preenche lacunas na literatura ao abordar a expansão da transformação digital nas MPMEs por meio da S-I4.0, destacando diferenças entre MPEs e MEs. A pesquisa reconhece barreiras e facilitadores e adota indicadores flexíveis, adequados a diferentes estágios de desenvolvimento e mercados. Além disso, as cadeias de suprimentos exigem indicadores personalizados. A predominância dos eixos TBL e PPT influencia a integração do S-I4.0, auxiliando gestores na identificação de impactos. O múltiplo estudo de casos inova ao aplicar

PBV e DCT para fortalecer MPMEs, aprimorando resiliência, adaptação e desempenho competitivo.

Em termos gerenciais, além da relevância relacionada à produção do artefato gerencial aplicável como um guia para a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs, também são apresentadas 11 proposições objetivas e quatro proposições de políticas público-privadas para gestores organizacionais e públicos. Essas proposições podem auxiliar diretamente os gestores em questões como: (i) implementação de políticas; (ii) estabelecimento de programas de ação; (iii) identificação de fatores-chave, priorizando o tratamento de barreiras e facilitadores; (iv) oferta de argumentos concretos para o trato com outros grupos de interesse envolvidos, como os governos, como no caso das políticas públicas de incentivo ao uso de fontes limpas de energia.

Esta pesquisa oferece implicações práticas para a integração da S-I4.0 nas cadeias de suprimentos de MPMEs, ajudando a superar barreiras e fortalecer facilitadores, considerando as particularidades de MPEs e MEs. O guia prático auxilia gestores na adoção do S-I4.0 e no avanço pelo OSCM, além de orientar a implementação e o acompanhamento de políticas específicas. Também apoia formuladores de políticas na criação de iniciativas público-privadas voltadas à inovação e eficiência das MPMEs. A falta de compreensão sobre o papel das MPEs e MEs compromete a formulação de políticas eficazes para inovação e sustentabilidade. Ao aplicar as lentes PBV e DCT, MPMEs podem aprimorar capacidades operacionais e estratégicas, reduzindo barreiras e fortalecendo facilitadores. Essa abordagem melhora a agilidade organizacional, a alocação de recursos e a comunicação, capacitando funcionários para lidar com desafios complexos. Assim, MPMEs se tornam mais preparadas para inovação, adaptação às mudanças e manutenção da competitividade.

Outra descoberta relevante relacionada ao escopo da pesquisa é a comprovação da necessidade e utilidade do tratamento das MPMEs em dois grupos distintos, isto é, MPEs e MEs, uma vez que os resultados da pesquisa mostram diferenças significativas para esses dois contextos, o que lança novas luzes sobre a heterogeneidade existente dentro das MPMEs, que merecem mais atenção em pesquisas futuras. Por exemplo, a identificação de grupos de causa e de efeito para barreiras e facilitadores é de extrema importância para as MPMEs, pois permite concentrar mais esforços em barreiras e facilitadores pertencentes ao grupo causal.

Portanto, espera-se que os resultados ajudem os gestores e tomadores de decisão das MPMEs a entender e implementar melhor a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos. Por um lado, os gestores de MPEs devem se concentrar nas barreiras, pois elas influenciam mais do que nas MEs. Por outro lado, os gestores das MEs devem dedicar mais atenção aos facilitadores na busca de mais impacto nos negócios. Por exemplo, a barreira B5 (Custo da melhoria e condição econômica do OCSM) é uma barreira de maior relevância e influência no contexto das MPEs do que no contexto das MEs. Outras duas barreiras de relevância e influência em ambos os contextos são B1 (Falta de conhecimento técnico) e B7 (Falta de comprometimento da alta administração). Sendo assim, em termos de lidar com barreiras, faz sentido concentrar esforços no envolvimento da alta administração e no fortalecimento de equipes técnicas com profissionais especializados. Quando se trata de facilitadores, a situação de relevância e influência é diferente. O facilitador F1 (Comprometimento da alta administração + Alinhamento estratégico) deve receber atenção tanto no contexto das MPEs quanto das MEs. Nas MPEs, o facilitador F4 (Soluções centrada em dados + fluxo consistente de dados) também se destaca. Em relação as MEs, outros dois facilitadores, F2 (Empoderamento dos colaboradores + Compartilhamento de conhecimento + Comunicação eficaz) e F8 (Valorizar centros de P&D), também desempenham papel central em termos de relevância e influência.

Em termos dos facilitadores, a complexidade aumenta, tornando o maior desafio para os gestores de MPEs ou MEs entenderem em que situação sua empresa se encontra e, a partir dessa análise, realizar ações que potencializem os facilitadores adequados. O caminho natural do crescimento de uma organização é migrar de MPE para ME dentro da trajetória de crescimento, mas pode ocorrer o caminho inverso, onde ações apropriadas também são cabíveis de serem adotadas, onde a complexidade da organização pode ser ainda mais desafiadora, pois são medidas que representam cortes em pessoas, processos e tecnologia. No sentido da integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos, uma maneira prática de atuar nas MPMEs pode ser no mecanismo pessoas do eixo PPT, com ações que possibilitem o comprometimento direto dos acionistas. No eixo TBL, as dimensões econômica e social requerem maior atenção e investimento tanto pela influência quanto pelo impacto transformador causado. Além disso, no eixo PPT, o mecanismo de processo é como as transformações ocorrem na prática, sendo de extrema

importância devido à frequência de barreiras e facilitadores presentes. Além disso, o mecanismo tecnológico no eixo PPT e a dimensão ambiental no eixo TBL são relevantes nessa jornada e devem receber atenção adequada de acordo com a realidade das MPMEs envolvidas. Essas informações são mais uma contribuição para os gestores ao lidar com barreiras e facilitadores para a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs.

Considerando a S-I4.0, ou correntes mais recentes relacionados ao conceito da S-I5.0 no contexto dos países em desenvolvimento, amplia-se a importância da inovação impulsionada pela tecnologia. A adoção colaborativa de tecnologias torna-se um determinante chave do sucesso. As MPMEs, com suas limitações de recursos, podem encontrar soluções inovadoras para preencher lacunas tecnológicas, enfatizando a importância das decisões tecnológicas sócio cênicas e uso da tecnologia para promover os valores e necessidades humanas. Portanto, torna-se mais notável a aplicabilidade no contexto das MPEs e MEs, destacando-se a necessidade de uma compreensão do porte da organização e dos desafios únicos colocados pelo cenário de um país em desenvolvimento. Adaptar estratégias para lidar com fatores contingentes é crucial para desbloquear o potencial transformador da integração S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs, com a promoção de operações sustentáveis e resilientes em um ecossistema industrial diversificado e dinâmico.

Esta pesquisa apresenta limitações e, conseqüentemente, várias oportunidades de continuidade. Pesquisas futuras podem apoiar a jornada das MPMEs em direção a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos. Como pesquisas relacionadas ao tema ainda são escassas, associado ao fato da constante transformação e evolução das tecnologias da I4.0, há oportuno e relevante espaço para investigações adicionais. É provável que os resultados sejam diferentes dependendo do contexto analisado, uma vez que varia o grau de maturidade tecnológica da empresa ou do mercado/região em que a empresa opera. Outra oportunidade pode estar na segmentação das MPMEs (e.g., MPEs e MEs), por exemplo, por mercado ou intensidade da S-I4.0, que permite um maior aprofundamento de seu impacto na sustentabilidade da empresa, nos pilares econômico, ambiental e social. Setores intensivos em tecnologia ou especialistas com experiência em organizações desses setores podem apresentar percepções e análises mais aprofundadas. Como as entrevistas foram limitadas a especialistas do

Brasil, outros países emergentes e países desenvolvidos devem ser considerados para ampliar a generalização dos achados deste estudo e verificar possíveis diferenças entre países desenvolvidos, emergentes, e em desenvolvimento. Além disso, pode-se explorar mais profundamente as barreiras e facilitadores, indo além da questão da dominância, priorizando os níveis de impacto para a integração da S-I4.0 em cadeias de suprimentos das MPMEs a partir das perspectivas dos mecanismos PPT e das dimensões TBL. Em relação aos indicadores, há espaço para verificar sua aplicabilidade, priorizar análises ou mesmo ranqueá-los dependendo do estágio evolutivo de uma empresa, por exemplo. O componente metrológico também é uma oportunidade para medir barreiras, facilitadores e indicadores, desde a identificação das fontes até a extração de medições/valores até sua apresentação e uso pelos gestores das MPMEs. Por fim, a S-I4.0 tornou-se mais importante no contexto das cadeias produtivas às quais as MPMEs estão inseridas. No entanto, isso pode ser ainda mais impactante quando consideradas as visões projetadas para I5.0 ou Sociedade 5.0 [Rojas et al. (2021); Bhattacharya et al. (2023)], bem como a crescente importância dada pelos mercados público e privado aos objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU [Kasinathan (2022)], ou pela situação única com recursos excepcionais em períodos de crises globais, enquadrada pelo cenário hostil da pandemia e projeções negativas pós-pandemia [Nayeri et al. (2023)]. Portanto, mais pesquisas podem ser conduzidas no sentido do aprofundamento da melhor compreensão dos indicadores das barreiras e facilitadores no sentido do suporte as MPMEs para alcançarem novos patamares de crescimento sustentável.

Referências bibliográficas

- Abbas, A. (2024). AI for predictive maintenance in industrial systems. *International Journal of Advanced Engineering Technologies and Innovations*, 1(1), 31-51. DOI: 10.765656/1m8mbw64
- Abdelmajied, F.A. (2022). Industry 4.0 and Its Implications: Concept, Opportunities, and Future Directions. *Supply Chain - Recent Advances and New Perspectives in the Industry 4.0 Era*. IntechOpen. Available at: DOI: 10.5772/intechopen.102520
- Abdullah, F.M., Al-Ahmari, A.M., Anwar, S. (2023). A Hybrid Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Model for Evaluating the Influence of Industry 4.0 Technologies on Manufacturing Strategies. *Machines*, 11, 310. DOI: 10.3390/machines11020310
- Aboagye, E.A., Chea, J.D., Yenkie, K.M. (2021). Systems level roadmap for solvent recovery and reuse in industries. *iScience*, 24, 103114. DOI: 10.1016/j.isci.2021.103114
- Aceto, G., Persico, V., Pescapé, A. (2019). A Survey on Information and Communication Technologies for Industry 4.0: State-of-the-Art, Taxonomies, Perspectives, and Challenges. *IEEE Communications Survey & Tutorials*, 21(4). DOI: 10.1109/COMST.2019.2938259
- Agrawal, V.V., Atasu, A., Van Wassenhove, L.N. (2019). New opportunities for operations management research in sustainability. *Manufacturing and Service Operations Management*, 21(1), 1-12. DOI: 10.1287/msom.2017.0699
- Ahmad, N.N.R., Ang, W.L., Teow, Y.H., Mohammad, A.W., Hilal, N. (2022). Nanofiltration membrane processes for water recycling, reuse and product recovery within various industries: A review. *J. Water Process. Eng.*, 45, 102478. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102478
- Ajayi, F.A., Udeh, C.A. (2024). Review of workforce upskilling initiatives for emerging technologies in IT. *International Journal of Management & Entrepreneurship Research*, 6(4), 1119-1137. DOI: 10.51594/ijmer.v6i4.1003
- Akbari, M., Kok, S.K., Hopkins, J., Frederico, G.F., Nguyen, H., Alonso, A.D. (2024). The changing landscape of digital transformation in supply chains: impacts of industry 4.0 in Vietnam. *The international journal of logistics management*, 35(4), 1040-1072. DOI: 10.1108/IJLM-11-2022-0442
- Al-Jumaili, A.H.A., Muniyandi, R.C., Hasan, M.K., Paw, J.K.S., Singh, M.J. (2023). Big data analytics using cloud computing based frameworks for power management systems: Status, constraints, and future recommendations. *Sensors*, 23(6), 2952. DOI: 10.3390/s23062952
- Al-Khatib, A.W., Shuhaiber, A., Mashal, I., Al-Okaily, M. (2024). Antecedents of Industry 4.0 capabilities and technological innovation: a dynamic capabilities perspective. *European Business Review*, 36(4), 566-587. DOI: 10.1108/EBR-05-2023-0158
- Alam, M.K. (2021). A systematic qualitative case study: questions, data collection, NVivo analysis and saturation. *Qualitative Research in Organizations and Management: An International Journal*, 16(1), 1-31. DOI: 10.1108/QROM-09-2019-1825
- Alfarizi, M., Widiastuti, T., Ngatindriatun. (2024). Exploration of Technological Challenges and Public Economic Trends Phenomenon in the Sustainable Performance of Indonesian Digital MSMEs on Industrial Era 4.0. *Journal of Industrial Integration and Management*, 9(01), 65-96. DOI: 10.1142/S2424862223500045
- Ali, K., Johl, S.K. (2023). Impact of total quality management on industry 4.0 readiness and practices: does firm size matter? *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 36(4), 567-589. DOI: 10.1080/0951192X.2022.2128213

- Almutairi, A.F., Gardner, G.E., McCarthy, A. (2014). Practical guidance for the use of a pattern-matching technique in case-study research: A case presentation. *Nurs Health Sci*, 16(2): 239–244. DOI: 10.1111/nhs.12096
- Alonso, A.D., Vu, O.T.K., Nguyen, T.Q., McClelland, R., Nguyen, N.M., Huynh, H.T.N., Tran, T.D. (2024). Industry 4.0 involvement and knowledge management across industries: A qualitative investigation from an emerging economy. *Journal of Business Research*, 174, 114538. DOI:10.1016/j.jbusres.2024.114538
- Alonso, R., Haber, R.E., Castaño, F., Recupero, D.R. (2024). Interoperable software platforms for introducing artificial intelligence components in manufacturing: A meta-framework for security and privacy. *Heliyon*, 10(4). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e26446
- AlSaied, M.K., Alkhoraif, A.A. (2024). The role of organizational learning and innovative organizational culture for ambidextrous innovation. *The Learning Organization*, 31(2), 205-226. DOI: 10.1108/TLO-06-2023-0101
- Ambrosini, V., Bowman, C. (2009). What Are Dynamic Capabilities and Ordinary Capabilities and are they a useful construct in strategic management? *International Journal of Management Reviews*, 11(1), 29-49. DOI:10.1111/j.1468-2370.2008.00251.x
- Anaman, P.D., Ahmed, I.A., Suleman, A.R., & Dzakah, G.A. (2023). Environmentally Sustainable Business Practices in Micro, Small, and Medium Enterprises: A Sub-Saharan African Country Perspective. *Business Perspectives and Research*, 0(0). DOI: 10.1177/22785337231162740
- Anatan, L., Nur. (2024). A study of MSME innovation performance in the digital transformation era. *Journal of Law and Sustainable Development*, 12(4), e3519. DOI:10.55908/sdgs.v12i4.3519
- Anton, N.E., Mizota, T., Whiteside, J.A., Myers, E.M., Bean, E.A., Stefanidis, D. (2019). Mental skills training limits the decay in operative technical skill under stressful conditions: Results of a multisite, randomized controlled study. *Surgery*, 165, 1059–1064. DOI: 10.1016/j.surg.2019.01.011
- Arksey, H., O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *Int. J. Soc. Res. Methodol.*, 8(1), 19–32. DOI: 10.1080/1364557032000119616
- Atieh, A. M., Cooke, K. O., Osiyevskyy, O. (2023). The role of intelligent manufacturing systems in the implementation of Industry 4.0 by small and medium enterprises in developing countries. *Engineering Reports*, 5(3), e12578. DOI: 10.1002/eng2.12578
- Awan, U., Gölgeci, I., Makhmadshoev, D., Mishra, N. (2022). Industry 4.0 and circular economy in an era of global value chains: What have we learned and what is still to be explored? *Journal of Cleaner Production*, 371, 133621, ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133621
- Ayyıldız, T.E., Ekinici, E.B.M. (2023). Selection of Six Sigma projects based on integrated multi-criteria decision-making methods: The case of the software development industry. *J. Supercomput.* 2023, 79, 14981–15003. DOI: 10.1007/s11227-023-05250-y
- Azevedo, B.D., Scavarda, L.F., Caiado, R.G.G. (2019). Urban solid waste management in developing countries from the sustainable supply chain management perspective: A case study of Brazil's largest slum. *Journal of Cleaner Production*, 233, 1377-1386. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.162
- Azevedo, B.D., Scavarda, L.F., Caiado, R.G.G., Fuss, M. (2021). Improving urban household solid waste management in developing countries based on the German experience. *Waste Management*, 120, 772-783. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.11.001
- Azis, I.J. (2024). Compatibility of Policies and Social Capital. In: *Listen and Design*. Springer, Singapore. DOI:10.1007/978-981-97-3248-7_2

- Bag, S., Wood, L. C., Telukdarie, A., & Venkatesh, V. G. (2023). Application of Industry 4.0 tools to empower circular economy and achieving sustainability in supply chain operations. *Production Planning & Control*, 34(10), 918–940. DOI: 10.1080/09537287.2021.1980902
- Bai, C., Sarkis, J., (2013). A grey-based DEMATEL model for evaluating business process management critical success factors. *International Journal of Production Economics*, 146(1), 281–292. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.07.011
- Baker, S.E., Edwards, R. (2012). How Many Interviews Are Enough? National Centre for Research Methods Review Paper. https://eprints.ncrm.ac.uk/id/eprint/2273/4/how_many_interviews.pdf
- BANCO CENTRAL DO BRASIL (2025). Cotação e boletins. Brasília: Banco Central do Brasil, 2025. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/historicocotacoes> <Accessed on: February 06th, 2025>.
- Barcellini, F. (2019). Industrie du futur: quelle place pour le travail et ses transformations? in Emilie Bourdu; Michel Lallement; Pierre Veltz; Thierry Weil. *Le travail en mouvement*, Presse des Mines, 136-147. <https://hal.science/hal-02433598>
- Barratt, M., Choi, T., Li, M. (2011). Qualitative case studies in operations management: Trends, research outcomes, and future research implications. *Journal of Operations Management*, 29(4), 329-342. DOI: 10.1016/j.jom.2010.06.002
- Baskarada, S. (2014). Qualitative case study guidelines. *Qualitative case studies guidelines. The Qualitative Report*, 19(40), 1-25. <https://ssrn.com/abstract=2559424>
- Behl, A., Singh, R., Pereira, V., Laker, B. (2023). Analysis of Industry 4.0 and circular economy enablers: A step towards resilient sustainable operations management. *Technological Forecasting and Social Change*, 189, 122363. DOI: 10.1016/j.techfore.2023.122363
- Beigi, S., Malekakhlagh, E., Nosratpanah, R., Safari, M. (2023). A framework for firm performance under the influence of knowledge management and dynamic capabilities: examining the mediating role of sustainable competitive advantage. *Interdisciplinary Journal of Management Studies (Formerly Known As Iranian Journal of Management Studies)*, 16(1), 205-227. DOI:10.22059/IJMS.2022.327941.674674
- Belhadi, A., Kamble, S., Jabbour, C.J.C., Gunasekaran, A., Ndubisi, N.O., Venkatesh, M. (2021). Manufacturing and service supply chain resilience to the COVID-19 outbreak: Lessons learned from the automobile and airline industries. *Technological Forecast and Social Change*. 163, 120447. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120447
- Belhadi, A., Kamble, S., Gunasekaran, A., Mani, V. (2022). Analyzing the mediating role of organizational ambidexterity and digital business transformation on industry 4.0 capabilities and sustainable supply chain performance. *Supply Chain Manag. Int. J.*, 27, 696–711. DOI: 10.1108/scm-04-2021-0152.
- Beltrán-Martín, I., Bou-Llusar, J.C. (2018). Examining the intermediate role of employee abilities, motivation and opportunities to participate in the relationship between HR bundles and employee performance. *BRQ Bus. Res. Q.*, 21, 99–110. DOI: 10.1016/j.brq.2018.02.001
- Benzidia, S., Makaoui, N., Bentahar, O. (2021). The impact of big data analytics and artificial intelligence on green supply chain process integration and hospital environmental performance. *Technol. Forecast. Soc. Chang.*, 165, 120557. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120557

- Bhatia, M.S., Jakhar, S.K., Mangla, S.K., Gangwani, K.K. (2020). Critical factors to environment management in a closed loop supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 225, 120239. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120239
- Bhatt, K., Kumar, S.M., (2022). Reindustrialization Using Industry 4.0 Maturity Models in Msmes and Tenets of Digital Transformation Phases. 2022 Fourth International Conference on Emerging Research in Electronics, Computer Science and Technology (ICERECT), Mandya, India, 1-6. DOI: 10.1109/ICERECT56837.2022.10060716
- Bhattacharya, M., Penica, M., O'connell, E., Southern, M., Hayes, M. (2023). Human-in-Loop: A Review of Smart Manufacturing Deployments. *Systems*, 11, 35. DOI: 10.3390/systems11010035.
- Biancone, P., Secinaro, S., Marseglia, R., Calandra, D. (2023). E-health for the future. Managerial perspectives using a multiple case study approach. *Technovation*, 120, 102406. DOI:10.1016/j.technovation.2021.102406
- Birkel, H., Müller, J.M. (2021). Potentials of industry 4.0 for supply chain management within the triple bottom line of sustainability—A systematic literature review. *J. Clean. Prod.* 2021, 289, 125612. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125612.
- Birkel, H.S., Veile, J.W., Müller, J.M., Hartmann, E., Voigt, K. (2019). Development of a Risk Framework for Industry 4.0 in the Context of Sustainability for Established Manufacturers. *Sustainability*, 11, 384. DOI: 10.3390/su11020384
- Bisaga, I., Parikh, P., Tomei, J., To, L.S. (2021). Mapping synergies and trade-offs between energy and the sustainable development goals: A case study of off-grid solar energy in Rwanda. *Energy Policy*, 149, 112028. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.112028
- Bonn, I., Fisher, J. (2011). Sustainability: the missing ingredient in strategy. *Journal of Business Strategy*, 32(1), 5-14. DOI: 10.1108/02756661111100274
- Bowen, G.A. (2009). Document Analysis as a Qualitative Research Method. *Qualitative Research Journal*, 9(2), 27-40. DOI:10.3316/QRJ0902027
- BRASIL. (2006). Lei Complementar No. 123. Presidência da República, Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos. Brasília, DF, 14 de dezembro de 2006. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp123.htm <acessado em 19 jun 2024>
- BRASIL (2024). Fechamento diário do dólar. Banco Central do Brasil. <https://www.bcb.gov.br/estabilidade/financeira/fechamentodolar> <acessado em 20 jun 2024>
- Breque, M., De Nul, L., Petridis, A. (2021). Industry 5.0—Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry; Publications Office of the European Union. DOI: 10.2777/308407.
- Brundtland, G.H. (1987). Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development. Geneva, UN-Dokument A/42/427. <http://www.un-documents.net/ocf-ov.htm>
- Bueno, A., Caiado, R.G.G., de Oliveira, T.L.G., Scavarda, L.F., Filho, M.G., Tortorella, G.L. (2023). Lean 4.0 implementation framework: Proposition using a multi-method research approach. *Int. J. Prod. Econ.*, 264, 108988. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2023.108988>
- Bueno-Pascual, F.E. (2023). Adoption drivers in decision making of Enterprise software systems implemented in Mexican SMEs. *Science Journal of Business Management*, 11(4), 164-173. DOI:10.11648/j.sjbm.20231104.14
- Butt, A. S., Ali, I., Govindan, K. (2024). The role of reverse logistics in a circular economy for achieving sustainable development goals: a multiple case study of retail

firms. *Production Planning & Control*, 35(12), 1490-1502. DOI:10.1080/09537287.2023.2197851

Caiado, R.G.G., Scavarda, L.F., Vidal, G. et al. (2023). A taxonomy of critical factors towards sustainable operations and supply chain management 4.0 in developing countries. *Oper Manag Res*. DOI: 10.1007/s12063-023-00430-8

Caiado, R.G.G.; Scavarda, L.F.; Azevedo, B.D., de Mattos Nascimento, D.L.; Quelhas, O.L.G. (2022). Challenges and Benefits of Sustainable Industry 4.0 for Operations and Supply Chain Management—A Framework Headed toward the 2030 Agenda. *Sustainability*, 14, 830. <https://doi.org/10.3390/su14020830>

Caiado, R.G.G., Scavarda, L.F., Gavião, L.O., Ivson, P., de Mattos Nascimento, D.L., Garza-Reyes, J.A. (2021). A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management. *Int. J. Prod. Econ.*, 231, 107883. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107883>

Caiado, R. G. G., Machado, E., Santos, R. S., Thomé, A. M. T., & Scavarda, L. F. (2024). Sustainable I4. 0 integration and transition to I5. 0 in traditional and digital technological organisations. *Technological Forecasting and Social Change*, 207, 123582.

Carayannis, E.G., Morawska-Jancelewicz, J. (2022). The Futures of Europe: Society 5.0 and Industry 5.0 as Driving Forces of Future Universities. *J. Knowl. Econ.*, 13, 3445–3471. DOI: 10.1007/s13132-021-00854-2.

Carboni, O.A., Medda, G. (2021). External R&D and product innovation: Is over-outsourcing an issue? *Econ. Model.*, 103, 105601. DOI: 10.1016/j.econmod.2021.105601

Černe, M., Čater, B., Čater, T., Koman, M., & Redek, T. (2023). Management innovation as an enabler of firm performance in the context of Industry 4.0: a longitudinal multi-source, multi-sector analysis. *Innovation*, 1-26. DOI: 10.1080/14479338.2023.2177858

Ceryno, P. S., Scavarda, L. F., Klingebiel, K., & Yüzgülec, G. (2013). Supply Chain Risk Management: A Content Analysis Approach. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 4(3), 141–150. DOI: 10.24867/IJIE-2013-3-118

Charband, Y., Navimipour, N.J. (2016). Online knowledge sharing mechanisms: A systematic review of the state of the art literature and recommendations for future research. *Inf. Syst. Front.*, 18, 1131–1151. DOI: 10.1007/s10796-016-9628-z

Chavez, Z., Hauge, J.B., Bellgran, M. (2022). Industry 4.0, transition or addition in SMEs? A systematic literature review on digitalization for deviation management. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 119, 57–76. DOI: 10.1007/s00170-021-08253-2.

Chen, L., Jia, F., Li, T., Zhang, T. (2021). Supply chain leadership and firm performance: A meta-analysis. *Int. J. Prod. Econ.*, 235, 108082. DOI: 10.1016/j.ijpe.2021.108082

Chiarini, A., Kumar, M. (2021). Lean Six Sigma and Industry 4.0 integration for Operational Excellence: Evidence from Italian manufacturing companies. *Prod. Plan. Control.*, 32, 1084–1101. DOI: 10.1080/09537287.2020.1784485

Cho, M., Bonn, M.A., Susskind, A., Giunipero, L. (2018). Restaurant dependence/autonomy in the supply chain and market responsiveness. *Int. J. Contemp. Hosp. Manag.*, 30, 2945–2964. DOI: 10.1108/ijchm-07-2017-0432

Chowdhury, R.H. (2024). The evolution of business operations: unleashing the potential of Artificial Intelligence, Machine Learning, and Blockchain. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 22(3), 2135-2147. DOI: 10.30574/wjarr.2024.22.3.1992

Chuang, S. (2024). Indispensable skills for human employees in the age of robots and AI. *European Journal of Training and Development*, 48(1/2), 179-195. DOI: 10.1108/EJTD-06-2022-0062

Colwell, S.R., Joshi, A.W. (2013). Corporate Ecological Responsiveness: Antecedent Effects of Institutional Pressure and Top Management Commitment and Their Impact on Organizational Performance. *Bus. Strat. Environ.*, 22, 73–91. DOI: 10.1002/bse.732

Corallo, A., De Giovanni, M., Latino, M.E., Menegoli, M. (2024). Leveraging on technology and sustainability to innovate the supply chain: a proposal of agri-food value chain model. *Supply Chain Management: An International Journal*, 29(3), 661-683. DOI: 10.1108/SCM-12-2022-0484

Creswell, J.W., Creswell, J.D. (2017). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. Los Angeles, CA: Sage Publications.

Cui, L., Yang, K., Lei, Z., Lim, M.K., Hou, Y. (2022). Exploring stakeholder collaboration based on the sustainability factors affecting the sharing economy. *Sustain. Prod. Consum.* 2022, 30, 218–232. DOI: 10.1016/j.spc.2021.12.009

Da Roit, B., Iannuzzi, F.E. (2023). One of many roads to industry 4.0? Technology, policy, organisational adaptation and worker experience in ‘Third Italy’ SMEs. *New Technology, Work and Employment*, 38(2), 252-271. DOI: 10.1111/ntwe.12241

Daddi, T., Bleischwitz, R., Todaro, N.M., Gusmerotti, N.M., De Giacomo, M.R. (2020). The influence of institutional pressures on climate mitigation and adaptation strategies. *J. Clean. Prod.* 2020, 244, 118879. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118879

Daú, G., Scavarda, A., Scavarda, L.F., Portugal, V.J.T. (2019). The Healthcare Sustainable Supply Chain 4.0: The Circular Economy Transition Conceptual Framework with the Corporate Social Responsibility Mirror. *Sustainability*, 11, 3259. DOI: 10.3390/su11123259

de Araujo, M., Storopoli, J.E., Rabechini, R. (2021). Project Portfolio Management and Information Technology Strategic Alignment. *Int. J. Innov. Technol. Manag.*, 18, 2150042. DOI: 10.1142/s0219877021500425

De Giovanni, P. (2023). Sustainability of the Metaverse: A Transition to Industry 5.0. *Sustainability*, 15, 6079. DOI: 10.3390/su15076079.

de Oliveira, R.T., Ghobakhloo, M., Figueira, S. (2023). Industry 4.0 towards social and environmental sustainability in multinationals: Enabling circular economy, organizational social practices, and corporate purpose. *Journal of Cleaner Production*, 430, 139712. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139712

De, D., Chowdhury, S., Dey, P.K., Ghosh, S.K. (2020). Impact of Lean and Sustainability Oriented Innovation on Sustainability Performance of Small and Medium Sized Enterprises: A Data Envelopment Analysis-based framework. *International Journal of Production Economics*, 219, 416-430. DOI: 10.1016/j.ijpe.2018.07.003

Dicicco-Bloom, B., Crabtree, B.F. (2006). The Qualitative Research Interview. *Medical Education*, 40, 314-321. DOI:10.1111/j.1365-2929.2006.02418.x

Dieste, M., Orzes, G., Culot, G., Sartor, M., (2023). Nassimbeni, G. The “dark side” of Industry 4.0: How can technology be made more sustainable? *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, ahead-of-p. DOI: 10.1108/ijopm-11-2022-0754.

Ding, B., Hernández, X.F. (2023). Case study as a methodological foundation for Technology Roadmapping (TRM): Literature review and future research agenda. *Journal of Engineering and Technology Management*, 67, 101731. DOI:10.1016/j.jengtecman.2023.101731

Ding, B., Ferras Hernandez, X., Agell Jane, N. (2023). Combining lean and agile manufacturing competitive advantages through Industry 4.0 technologies: an integrative approach. *Production planning & control*, 34(5), 442-458. DOI: 10.1080/09537287.2021.1934587

- Doherty, N.F., Tajuddin, S.T. (2018). Towards a user-centric theory of value-driven information security compliance. *Inf. Technol. People*, 31, 348–367. DOI: 10.1108/itp-08-2016-0194
- Durán, C.A., Córdova, F.M. (2015). Synergy and Technology Gaps in Export Logistics Chains between a Chilean and a Spanish medium-sized Port. *Procedia Comput. Sci.*, 55, 632–641. DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.055
- Ebel, H., Riedelsheimer, T., Stark, R. (2021). Enabling automated engineering's project progress measurement by using data flow models and digital twins. *Int. J. Eng. Bus. Manag.*, 13, 184797902110336. DOI: 10.1177/18479790211033697
- Eisenhardt, K.M. (1989). Building Theories from Case Study Research. *Academy of Management Review*, 14(4), 532-550. DOI:10.2307/258557
- Ejsmont, K., Gladysz, B., Kluczek, A. (2020). Impact of Industry 4.0 on Sustainability - Bibliometric Literature Review. *Sustainability*, 12, 5650. DOI: 10.3390/su12145650
- El-Garaihy, W.H., Farag, T., Al Shehri, K., Centobelli, P., Cerchione, R. (2022). Driving sustainability in supply chain management for a more inclusive and responsible future. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 73(1), 43-84. DOI: 10.1108/IJPPM-01-2022-0028
- Elkington, J. (1994). Towards the Sustainable Corporation: Win-Win-Win Business Strategies for Sustainable Development. *California Management Review*, 36(2), 90–100. DOI: 10.2307/41165746
- Espino-Rodríguez, T.F., Taha, M.G. (2022). Supplier innovativeness in supply chain integration and sustainable performance in the hotel industry. *Int. J. Hosp. Manag.*, 100, 103103. DOI: 10.1016/j.ijhm.2021.103103
- European Commission (2003). Commission Recommendation of 6 May 2003 concerning the definition of micro, small and medium-sized enterprises (2003/361/EC). *Official Journal of the European Union*, L124, 36-41. Available at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32003H0361> < accessed on September 19th, 2024>
- Farzaneh, M., Ghasemzadeh, P., Nazari, J.A., Mehralian, G. (2021). Contributory role of dynamic capabilities in the relationship between organizational learning and innovation performance. *European Journal of Innovation Management*, 24 (3), 655-676. DOI:10.1108/EJIM-12-2019-0355
- Fawcett, S.E., Magnan, G.M., McCarter, M.W. (2008). Benefits, barriers, and bridges to effective supply chain management. *Supply Chain Management*, 13(1), 35-48. DOI: 10.1108/13598540810850300
- Fernandez-Viagas, V., Framinan, J.M. (2022). Exploring the benefits of scheduling with advanced and real-time information integration in Industry 4.0: A computational study. *J. Ind. Inf. Integr.*, 27, 100281. DOI: 10.1016/j.jii.2021.100281
- Ferris, R. (1999). A review of potential biodiversity indicators for application in British forests. *For. Int. J. For. Res.*, 72, 313–328. DOI: 10.1093/forestry/72.4.313
- Flynn, B.B., Sakakibara, S., Schroeder, R.G., Bates, K.A., Flynn, E.J. (1990). Empirical research methods in operations management. *Journal of operations management*, 9(2), 250-284. DOI: 10.1016/0272-6963(90)90098-X
- Forza, C. (2002). Survey research in operations management: A process-based perspective. *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, 22, 152–194. DOI: 10.1108/01443570210414310.
- Foss, N.J., Ishikawa, I. (2007). Towards a dynamic resource-based view: Insights from Austrian capital and entrepreneurship theory. *Organization Studies*, 28(5), 749-772. DOI: 10.1177/0170840607072546

- Gahlaut, T., Dwivedi, G. (2023). Policy recommendations to enhance circular economy of LIBs in an emerging economy. *Environ Syst Decis.* DOI: 10.1007/s10669-023-09941-y
- Gazzola, P., Pavione, E., Barge, A., Fassio, F. (2023). Using the transparency of supply chain powered by blockchain to improve sustainability relationships with stakeholders in the food sector: the case study of Lavazza. *Sustainability*, 15(10), 7884. DOI: 10.3390/su15107884
- Ghonim, M.A., Khashaba, N.M., Al-Najaar, H.M., Khashan, M.A. (2022). Strategic alignment and its impact on decision effectiveness: A comprehensive model. *Int. J. Emerg. Mark.*, 17, 198–218. DOI: 10.1108/ijoem-04-2020-0364
- Goldenberg, M. (2011). *A arte de pesquisar: como fazer pesquisa qualitativa em Ciências Sociais*. Editora Record.
- Gorecky, D., Schmitt, M., Loskyll, M., Zuhlke, (2014). D. Human-Machine-Interaction in the Industry 4.0 Era. In *Proceedings of the 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Porto Alegre, Brazil, 27–30 July 2014; IEEE: Piscataway, NJ, USA; pp. 289–294. DOI: 10.1109/INDIN.2014.6945523
- Goswami, S.S., Behera, D.K., Afzal, A., Kaladgi, A.R., Khan, S.A., Rajendran, P.; Subbiah, R., Asif, M. (2021). Analysis of a Robot Selection Problem Using Two Newly Developed Hybrid MCDM Models of TOPSIS-ARAS and COPRAS-ARAS. *Symmetry* 2021, 13, 1331. DOI: 10.3390/sym13081331
- Gottge, S., Menzel, T., Forslund, H. (2020). Industry 4.0 Technologies in the Purchasing Process. *Ind. Manag. Data Syst*, 120, 730–748. DOI: 10.1108/IMDS-05-2019-0304
- Goy, A., Magro, D., Petrone, G., Picardi, C., Segnan, M. (2016). Ontology-driven collaborative annotation in shared workspaces. *Futur. Gener. Comput. Syst.*, 54, 435–449. DOI: 10.1016/j.future.2015.04.013
- Gredel, D., Kramer, M., Bend, B. (2012). Patent-based investment funds as innovation intermediaries for SMEs: In-depth analysis of reciprocal interactions, motives and fallacies. *Technovation*, 32, 536–549. DOI: 10.1016/j.technovation.2011.09.008
- Grosso, R., Mecca, U., Moglia, G., Prizzon, F., Rebaudengo, M. (2020). Collecting Built Environment Information Using UAVs: Time and Applicability in Building Inspection Activities. *Sustainability*, 12, 4731. DOI: 10.3390/su12114731
- Gunduz, M.A., Demir, S., Paksoy, T. (2021). Matching functions of supply chain management with smart and sustainable Tools: A novel hybrid BWM-QFD based method. *Comput. Ind. Eng.*, 162, 107676. DOI: 10.1016/j.cie.2021.107676
- Gupta, H., Kusi-Sarpong, S., Rezaei, J. (2020). Barriers and overcoming strategies to supply chain sustainability innovation. *Resources, Conservations and Recycling*, 161, 104819. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104819
- Gusmão, L.D.P.R.G., Santos, C.R.S., Thomé, A.M.T. (2023). Barriers, Enablers and Base Industry 4.0 Technologies of Digital Transformation in Supply Chains: An Inter-Country Comparison. *Industrial Engineering and Operations Management*, 431, 521. DOI: 10.1007/978-3-031-47058-5_40
- Hahn, G.J. (2020). Industry 4.0: A supply chain innovation perspective. *Int. J. Prod. Res.*, 58, 1425–1441. DOI: 10.1080/00207543.2019.1641642
- Hajian, M., Kashani, S.J. (2021). 1 - Evolution of the concept of sustainability. From Brundtland Report to sustainable development goals. *Sustainable Resource Management*, 1-24. DOI: 10.1016/B978-0-12-824342-8.00018-3
- Hajoary, P.K. (2022). Development and validation of industry 4.0 readiness scale—a formative model. *International Journal of Innovation and Technology Management*, 19(06), 2140011. DOI: 10.1142/S0219877021400113

- Haleem, A, Khan, S., Khan, M. (2019). Traceability implementation in food supply chain: A grey-DEMATEL approach. *Information Processing in Agriculture*, 6(3), 335–348. DOI: 10.1016/j.inpa.2019.01.003
- Han, Y., Deng, Y. (2018). An enhanced fuzzy evidential DEMATEL method with its application to identify critical success factors. *Soft Computing* 22(15), 5073–5090. DOI: 10.1007/s00500-018-3311-x
- Hernández, V., Revilla, A., Rodríguez, A. (2024). Digital data-driven technologies and the environmental sustainability of micro, small, and medium enterprises: Does size matter? *Business Strategy and the Environment*, 33(6), 5563-5582. DOI:10.1002/bse.3765
- Holroyd, C. (2019). Technological innovation and building a ‘super smart’ society: Japan’s vision of society 5.0. *Journal of Asian Public Policy*, 15(1), 18-31. DOI: 10.1080/17516234.2020.1749340
- Hu, Y., Jia, Q., Yao, Y., et al. (2024). Industrial Internet of Things Intelligence Empowering Smart Manufacturing: A Literature Review. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(11), 19143-19167. DOI: 10.1109/JIOT.2024.3367692
- Hurdawaty, R., Tukiran, M. (2024). Strategies to Increase the Competitiveness of Micro, Small and Medium Enterprises (MSMEs): A Narrative Literature Review. *South Asian Journal of Social Studies and Economics*, 21(1), 112-125. DOI: 10.9734/sajsse/2024/v21i1768
- Hurt, K.J., Abebe, M.A. (2015). The Effect of Conflict Type and Organizational Crisis on Perceived Strategic Decision Effectiveness. *J. Leadersh. Organ. Stud.*, 22, 340–354. DOI: 10.1177/1548051815570038
- Intalar, N., Ueki, Y., Jeenanunta, C. (2024). Enhancing Competitiveness: Driving and Facilitating Factors for Industry 4.0 Adoption in Thai Manufacturing. *Economies*, 12(8), 210. DOI:10.3390/economies12080210
- Ivanov, D. (2023). The Industry 5.0 framework: Viability-based integration of the resilience, sustainability, and human-centricity perspectives. *Int. J. Prod. Res.*, 61, 1683–1695. DOI: 10.1080/00207543.2022.2118892
- Jabbour, C.J.C., Fiorini, P.D.C., Ndubisi, N.O., Queiroz, M.M., Piato, É.L. (2020). Digitally-enabled sustainable supply chains in the 21st century: A review and a research agenda. *Sci. Total. Environ.*, 725, 138177. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138177
- Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., Kumar, V., Kumar, S. (2021). Developing A sustainability framework for Industry 4.0. *Science Direct Procedia CIRP*, 98, 430-435. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.129
- Jassbi, J., Mohamadnejad, F. and Nasrollahzadeh, H. (2011). A Fuzzy DEMATEL framework for modeling cause and effect relationships of strategy map. *Expert systems with Applications*, 38(5), 5967-5973. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.11.026
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., Suman, R., Gonzalez, E.S. (2022). Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 203-217. DOI: 10.1016/j.susoc.2022.01.008
- Javaid, M., Haleem, A., Suman, R. (2023). Digital twin applications toward industry 4.0: A review. *Cognitive Robotics*, 3, 71-92. DOI: 10.1016/j.cogr.2023.04.003
- Jazairy, A., von Haartman, R. (2020). Analysing the institutional pressures on shippers and logistics service providers to implement green supply chain management practices. *Int. J. Logist. Res. Appl.*, 23, 44–84. DOI:10.1080/13675567.2019.1584163
- Jemala, M. (2021). Long-term research on technology innovation in the form of new technology patents. *Int. J. Innov. Stud.* 2021, 5, 148–160. DOI: 10.1016/j.ijis.2021.09.002

- Joshi, S., Sharma, M., Bartwal, S., Joshi, T., Prasad, M. (2022). Critical challenges of integrating OPEX strategies with I4.0 technologies in manufacturing SMEs: A few pieces of evidence from developing economies. *TQM J.*, 36, 108–138. DOI: 10.1108/tqm-08-2022-0245
- Jové-Llopis, E., Segarra-Blasco, A. (2018). Eco-efficiency actions and firm growth in European SMEs. *Sustainability*, 10(1), 281. DOI: 10.3390/su10010281
- Kalla, C., Scavarda, L. F., & Hellingrath, B. (2025). Integrating supply chain risk management activities into sales and operations planning. *Review of Managerial Science*, 19, 467–497. DOI: 10.1007/s11846-024-00756-y
- Kalsoom, T., Ahmed, S., Rafi-ul-Shan, P.M., Azmat, M., Akhtar, P., Pervez, Z., Imran, M.A., Ur-Rehman, M. (2021). Impact of IoT on Manufacturing Industry 4.0: A New Triangular Systematic Review. *Sustainability*, 13, 12506. DOI: 10.3390/su132212506
- Kamble, S.S., Gunasekaran, A., Gawankar, S.A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Saf. Environ. Prot.*, 117, 408–425. DOI: 10.1016/j.psep.2018.05.009
- Karmaker, C.L., Aziz, R., Ahmed, T., Misbauddin, S.M., Moktadir, A. (2023). Impact of industry 4.0 technologies on sustainable supply chain performance: The mediating role of green supply chain management practices and circular economy, *Journal of Cleaner Production*, 419, 138249. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138249
- Kashyap, A., Shukla, O.J. (2023). Analysis of critical barriers in the sustainable supply chain of MSMEs: A case of Makhana (Foxnut) industry. *Benchmarking: Int. J.* 2023, 30, 2040–2061. DOI: 10.1108/bij-11-2021-0696
- Kasinathan, P., Pugazhendhi, R., Elavarasan, R.M., Ramachandaramurthy, V.K., Ramanathan, V., Subramanian, S., Kumar, S., Nandhagopal, K., Raghavan, R.R.V., Rangasamy, S., et al. (2022). Realization of Sustainable Development Goals with Disruptive Technologies by Integrating Industry 5.0, Society 5.0, Smart Cities and Villages. *Sustainability*, 14, 15258. DOI: 10.3390/su142215258
- Kazancoglu, Y., Ozkan-Ozen, Y. D., Sagnak, M., Kazancoglu, I., Dora, M. (2023). Framework for a sustainable supply chain to overcome risks in transition to a circular economy through Industry 4.0. *Production Planning & Control*, 34(10), 902-917. DOI: 10.1080/09537287.2021.1980910
- Khan, I.S., Ahmad, M.O., Majava, J. (2021). Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives. *J. Clean. Prod.*, 297, 126655. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126655
- Khan, I.S., Ahmad, M.O., Majava, J. (2023). Industry 4.0 innovations and their implications: An evaluation from sustainable development perspective. *Journal of Cleaner Production*, 405, 137006. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.137006
- Khan, S., Haleem, A. (2020). Strategies to Implement Circular Economy Practices: A Fuzzy DEMATEL Approach. *Journal of Industrial Integration and Management*, 5(2), 253–269. DOI: 10.1142/S2424862220500050
- Khang, A., Rath, K.C., Satapathy, S.K., Kumar, A., Das, S.R., Panda, M.R. (2023). Enabling the Future of Manufacturing: Integration of Robotics and IoT to Smart Factory Infrastructure in Industry 4.0. In *Handbook of Research on AI-Based Technologies and Applications in the Era of the Metaverse*, 25-50. IGI Global. DOI: 10.4018/978-1-6684-8851-5.ch002
- Khanzode, A. G., Sarma, P. R., Mangla, S. K., Yuan, H. (2021). Modeling the Industry 4.0 adoption for sustainable production in Micro, Small & Medium Enterprises. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123489. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123489

- Kluczek, A., Gladysz, B., Buczacki, A., Krystosiak, K., Ejsmont, K., Palmer, E. (2022). Aligning sustainable development goals with Industry 4.0 for the design of business model for printing and packaging companies. *Packaging Technology and Science*, 36(4), 307-325. DOI:10.1002/pts.2713
- Koh, L., Orzes, G., Jia, F.J. (2019). The fourth industrial revolution (Industry 4.0): technologies disruption on operations and supply chain management. *International Journal of Operations & Production Management*, 39(6/7/8), 817-828. DOI: 10.1108/IJOPM-08-2019-788
- Kolasani, S. (2023). Leadership in business innovation and transformation, navigating complex digital landscapes and enterprise technology ecosystems and achieving sustainable growth in today's rapidly evolving market. *International Journal of Holistic Management Perspectives*, 4(4), 1-23. <https://injm.com/index.php/IJHMP/article/view/57>
- Kong, T., Feng, T. (2024). Linking digital transformation with supply chain intelligence integration and carbon performance: does business model innovation matter? *Business Process Management Journal*. Ahead-of-print, Ahead-of-print. DOI: 10.1108/BPMJ-09-2023-0682
- Konrad, R.A. (2019). Designing awareness campaigns to counter human trafficking: An analytic approach. *Socio-Economic Plan. Sci.*, 67, 86–93. DOI: 10.1016/j.seps.2018.10.005
- Kore, H.H., Koul, S., Verma, R. (2021). Indian MSMEs–Review of dynamic capabilities with lean production. *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 27(4), 361-382. DOI:10.46970/2021.27.4.4
- Kouhizadeh, M., Saberi, S., Sarkis, J. (2021). Blockchain technology and the sustainable supply chain: Theoretically exploring adoption barriers. *International Journal of Production Economics*, 231, 107831. DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107831
- Kowal-Bourgonjon, E., Jacobs, G. (2019). Does addiction belong in modernity? Discursive strategies of exclusion in Polish public awareness campaigns. *Discourse, Context Media*, 28, 27–34. DOI: 10.1016/j.dcm.2019.01.004
- Kreuter, T., Scavarda, L.F., Thomé, A.M.T., Hellengrath, B., Seeling, M.X. (2022). Empirical and theoretical perspectives in sales and operations planning. *Review of Managerial Science*, 16, 319–354. DOI: 10.1007/s11846-021-00455-y
- Kreuter, T., Kalla, C., Scavarda, L.F., Thomé, A.M.T., Hellengrath, B. (2021). Developing and implementing contextualised S&OP designs—an enterprise architecture management approach. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 51(6), 634-655. DOI: 10.1108/IJPDLM-06-2019-0199
- Krishnan, S., Gupta, S., Kaliyan, M., Kumar, V., Garza-Reyes, J.A. (2021). Assessing the key enablers for Industry 4.0 adoption using MICMAC analysis: A case study. *Int. J. Prod. Perform. Manag.*, 70, 1049–1071. DOI: 10.1108/ijppm-02-2020-0053
- Krokowski, T., Regelman, C., Wentzek, D. (2025). Industry 5.0 in Smart Manufacturing: The Need for Equilibrium in Work Organization. *Procedia Computer Science*, 253, 582-593. DOI: 10.1016/j.procs.2025.01.120
- Krueger, R.A., Casey, M.A. (2014). *Focus Groups: A Practical Guide for Applied Research*; Sage publications, 5th. edition.
- Kull, T. J., Kotlar, J., Spring, M. (2018). Small and medium enterprise research in supply chain management: The case for single-respondent research designs. *Journal of Supply Chain Management*, 54(1), 23-34. DOI: 10.1111/jscm.12157

- Kumar, P., Singh, R.K., Kumar, V. (2020). Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers. *Resour. Conserv. Recycl.*, 164, 105215. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105215
- Kumar, R., Singh, R., Dwivedi, Y., (2020). Application of industry 4.0 technologies in SMEs for ethical and sustainable operations: Analysis of challenges, *Journal of Cleaner Production*, 275, 124063. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124063
- Kumar, S., Raut, R. D., Aktas, E., Narkhede, B. E., & Gedam, V. V. (2023). Barriers to adoption of industry 4.0 and sustainability: a case study with SMEs. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 36(5), 657–677. DOI: 10.1080/0951192X.2022.2128217
- Kumar, S., Suhaib, M., Asjad, M. (2020). Industry 4.0: Complex, disruptive, but inevitable. *Manag. Prod. Eng. Rev.*, 1, 34–51. DOI: 10.24425/mper.2020.132942
- Kumar, V., Vrat, P., Shankar, R. (2022). Factors Influencing the Implementation of Industry 4.0 for Sustainability in Manufacturing. *Glob J Flex Syst Manag* 23, 453–478. DOI: 10.1007/s40171-022-00312-1
- Lee, Y.-C., Eastman, C.M., Lee, J.-K. (2015). Validations for ensuring the interoperability of data exchange of a building information model. *Autom. Constr.*, 58, 176–195. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.07.010
- Lepore, D., Veccioli, C., Micozzi, A., & Spigarelli, F. (2023). Developing technological capabilities for Industry 4.0 adoption: An analysis of the role of inbound open innovation in small and medium-sized enterprises. *Creativity and Innovation Management*, 32(2), 249–265. DOI: 10.1111/caim.12551
- Li, L. (2018). China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of “Made-in-China 2025” and “Industry 4.0”. *Technological Forecast and Social Change*, 135, 66–74. DOI: 10.1016/j.techfore.2017.05.028
- Li, Y., Ji, Q., Zhang, D. (2020). Technological catching up and innovation policies in China: What is behind this largely successful story? *Technol. Forecast. Soc. Chang.*, 153, 119918. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.119918
- Li, Y., Liu, Q. (2021). A comprehensive review study of cyber-attacks and cyber security; Emerging trends and recent developments. *Energy Rep.*, 7, 8176–8186. DOI: 10.1016/j.egy.2021.08.126
- Lima, B.F., Neto, J.V., Santos, R.S., Caiado, R.G.G. (2023). A Socio-Technical Framework for Lean Project Management Implementation towards Sustainable Value in the Digital Transformation Context. *Sustainability*, 15, 1756. DOI: 10.3390/su15031756
- Lima, L., Galleli, B. (2021). Human resources management and corporate governance: Integration perspectives and future directions. *Eur. Manag. J.*, 39, 731–744. DOI: 10.1016/j.emj.2021.02.004
- Lin, C.J., Wu, W.W. (2004). A fuzzy extension of the DEMATEL method for group decision making. *European Journal of Operational Research*. 156(1), 445–455. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:62248201>
- Liu, D., Ji, Y., Mookerjee, V. (2011). Knowledge sharing and investment decisions in information security. *Decis. Support Syst.*, 52, 95–107. DOI: 10.1016/j.dss.2011.05.007
- Liu, L., Song, W., Liu, Y. (2023). Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4.0 technologies. *Computers & Industrial Engineering*, 178, 109113. DOI: 10.1016/j.cie.2023.109113

- Liu, P.; Cheng, S. (2019). An Extension of ARAS Methodology for Multi-criteria Group Decision-Making Problems within Probability Multi-valued Neutrosophic Sets. *Int. J. Fuzzy Syst.*, 21, 2472–2489. DOI: 10.1007/s40815-019-00737-4
- Liu, Y., Guo, M., Han, Z., Gavurova, B., Bresciani, S., Wang, T. (2024). Effects of digital orientation on organizational resilience: A dynamic capabilities perspective. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 35(2), 268-290. DOI:10.1108/JMTM-06-2023-0224
- Lotfi, Z., Mukhtar, M., Sahran, S., Zadeh, A.T. (2013). Information Sharing in Supply Chain Management. *Procedia Technol.* 11, 298–304. DOI: 10.1016/j.protcy.2013.12.194
- Lu, T., Tomlin, B. (2022). Sourcing from a Self-Reporting Supplier: Strategic Communication of Social Responsibility in a Supply Chain. *Manuf. Serv. Oper. Manag.*, 24, 902–920. DOI: 10.1287/msom.2021.0978
- Luthra, S.; Kumar, A.; Zavadskas, E.K.; Mangla, S.K.; Garza-Reyes, J.A. Industry 4.0 as an enabler of sustainability diffusion in supply chain: An analysis of influential strength of drivers in an emerging economy. *Int. J. Prod. Res.* 2020, 58, 1505–1521. DOI: 10.1080/00207543.2019.1660828
- Machado, E., Scavarda, L.F., Caiado, R.G.G., Thomé, A.M.T. (2021). Barriers and Enablers for the Integration of Industry 4.0 and Sustainability in Supply Chains of MSMEs. *Sustainability*, 13, 11664. DOI: 10.3390/su132111664
- Machado, E.A., Scavarda, L.F., Caiado, R.G.G., Santos, R.S. (2024). Industry 4.0 and Sustainability Integration in the Supply Chains of Micro, Small, and Medium Enterprises through People, Process, and Technology within the Triple Bottom Line Perspective. *Sustainability*, 16, 1141. DOI: 10.3390/su16031141
- Machado, E., Scavarda, L.F., Caiado, R.G.G., Nascimento, D.L.M. (2025). Integrating Industry 4.0 and Sustainability (S-I4.0) in MSME Supply Chains: A Practical Guide from a Multiple Case Study. Working paper. Industrial Engineering department. Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.
- Mackiewicz, M., Götz, M. (2024). The role of clusters in advancing Industry 4.0 solutions: insights from the Polish automotive context. *Digital Policy, Regulation and Governance*, 26(4), 357-374. DOI: 10.1108/DPRG-07-2023-0098
- Maganga, D.P., Taifa, I.W. (2024). Determining the maturity level for the selected manufacturing industries through Industry 4.0 perspectives. *International Journal of Management and Decision Making*, 23(4), 480-504. DOI:10.1504/IJMDM.2024.139388
- Magon, R., Thomé, A.M.; Ferrer, A., Scavarda, L.F. (2018). Sustainability and performance in operations management research. *Journal of Cleaner Production* 190, 104-117. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.140
- Maheshwari, P., Kamble, S. (2023). A Comparative Approach for Sustainable Supply Chain Finance to Implement Industry 4.0 in Micro-, Small-, and Medium-Sized Enterprises. In: Kamble, S.S., Mor, R.S., Belhadi, A. (eds) *Digital Transformation and Industry 4.0 for Sustainable Supply Chain Performance*. EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-19711-6_10
- Majumdar, A., Garg, H., Jain, R. (2021). Managing the barriers of Industry 4.0 adoption and implementation in textile and clothing industry: Interpretive structural model and triple helix framework. *Comput. Ind.*, 125, 103372. DOI: 10.1016/j.compind.2020.103372
- Mamikhani, J., Tofighi, S., Sadeghifar, J., Heydari, M., Jenab, V.H. (2014). Prioritizing the Compensation Mechanisms for Nurses Working in Emergency Department of Hospital Using Fuzzy DEMATEL Technique: A Survey from Iran. *Global Journal of Health Science*, 6(2). DOI: 10.5539/gjhs.v6n2p86

- Martínez-Olvera, C., Mora-Vargas, J. (2019). A Comprehensive Framework for the Analysis of Industry 4.0 Value Domains. *Sustainability*, 11, 2960. DOI: 10.3390/su11102960
- Martínez-Peláez, R., Ochoa-Brust, A., Rivera, S., Félix, V.G., Ostos, R., Brito, H. Félix, R.A., Mena. L.J. (2023). Role of Digital Transformation for Achieving Sustainability: Mediated Role of Stakeholders, Key Capabilities, and Technology. *Sustainability* 15(14), 11221. DOI:10.3390/su151411221
- Massey, O.T. (2011). A proposed model for the analysis and interpretation of focus groups in evaluation research. *Evaluation and Program Planning* 34, 21–28. DOI: 10.1016/j.evalprogplan.2010.06.003
- Mayring, Philipp. (2000). Qualitative Content Analysis. *Forum Qualitative Sozialforschung / Forum: Qualitative Social Research* [On-line Journal]. <http://qualitative-research.net/fqs/fqs-e/2-00inhalt-e.htm.1>
- McDonald, S., Simpson, B. (2014). Shadowing research in organisations: the methodological debates. *Qual Res Organ Manag Int J*, 9(1), 3-20. DOI:10.1108/QROM-02-2014-1204
- Michna, A., Kmiecik, R. (2020). Open-Mindedness Culture, Knowledge-Sharing, Financial Performance, and Industry 4.0 in SMEs. *Sustainability*, 12, 9041. DOI: 10.3390/su12219041
- Miles, M.B., Huberman, A.M. (1994). *Qualitative Data Analysis: An Expanded Sourcebook* (2nd ed.). Thousand Oaks, CA: SAGE Publications. <https://vivauniversity.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/11/milesandhuberman1994.pdf>
- Mishra, R., Kiran, K.B. (2024). Unveiling the dynamic capabilities' influence on sustainable performance in MSMEs: a systematic literature review utilizing ADO-TCM analysis. *Asia-Pacific Journal of Business Administration*, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. DOI:10.1108/APJBA-05-2024-0295
- Mishra, R., Singh, R.K., Govindan, K. (2022). Barriers to the adoption of circular economy practices in Micro, Small and Medium Enterprises: Instrument development, measurement and validation. *J. Clean. Prod.*, 351, 131389. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131389
- Mittal, V., Han, K., Lee, J.-Y., Sridhar, S. (2021). Improving Business-to-Business Customer Satisfaction Programs: Assessment of Asymmetry, Heterogeneity, and Financial Impact. *J. Mark. Res.*, 58, 615–643. DOI: 10.1177/00222437211013781
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D.G., PRISMA Group. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *Annals of Internal Medicine*, 151(4), 264-269. DOI: 10.7326/0003-4819-151-4-200908180-00135
- Mon, A., Del Giorgio, H.R. (2021). Evaluation of Information and Communication Technologies towards Industry 4.0. *Procedia Comput. Sci.*, 180, 639–648. DOI: 10.1016/j.procs.2021.01.286
- Mongeon, P., Paul-Hus, A. (2016). The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. *Scientometrics*, 106, 213-228. DOI: 10.1007/s11192-015-1765-5
- Morella, P., Lambán, M.P., Royo, J., Sánchez, J.C., Latapia, J. (2023). Technologies Associated with Industry 4.0 in Green Supply Chains: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 15, 9784. <https://doi.org/10.3390/su15129784>.
- Mubarik, M.S. and Khan, S.A. (2024). Digital Supply Chain and Industry 4.0 Technologies. The Theory, Methods and Application of Managing Digital Supply Chains, Emerald Publishing Limited, Leeds, 121-132. DOI: 10.1108/978-1-80455-968-020241008

- Mue, N.E., Mulongo, N.Y., Kholopane, P.A. (2018). Analysis of the status-quo of industrial 4.0 in the SMMEs: a critical review. IEOM Society International, Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Washington DC, USA, 27-29. <https://ieomsociety.org/dc2018/papers/402.pdf>
- Muhamad, M.Q.B., Mohamad, S.J.A.N.S., Nor, N.M. (2021). Navigating the future of industry 4.0 in Malaysia: A proposed conceptual framework on SMEs' readiness. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 8(7), 41-49. DOI: 10.21833/ijaas.2021.07.006
- Mulchandani, K.; Jasrotia, S.S.; Mulchandani, K. (2023). Determining supply chain effectiveness for Indian MSMEs: A structural equation modelling approach. *Asia Pac. Manag. Rev.*, 28, 90–98. DOI: 10.1016/j.apmr.2022.04.001.
- Müller, J. M., Voigt, K. I. (2018). Sustainable industrial value creation in SMEs: A comparison between industry 4.0 and made in China 2025. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5(5), 659-670. DOI: 10.1007/s40684-018-0056-z
- Munn, Z., Peters, M.D.J., Stern, C. et al. (2018). Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach. *BMC Medical Research Methodology*, 18(1), 143. DOI: 10.1186/s12874-018-0611-x
- Nagaty, K.A. (2023). IoT Commercial and Industrial Applications and AI-Powered IoT. In: Iranmanesh, A. (eds) *Frontiers of Quality Electronic Design (QED)*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-16344-9_12
- Nagurney, A., Salarpour, M., Daniele, P. (2019). An integrated financial and logistical game theory model for humanitarian organizations with purchasing costs, multiple freight service providers, and budget, capacity, and demand constraints. *Int. J. Prod. Econ.*, 212, 212–226. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.02.006
- Nakayama, R., Spinola, M., Silva, J. (2020). Towards I4.0: A comprehensive analysis of evolution from I3.0. *Computers & Industrial Engineering*, 144, 106453. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106453
- Nascimento, D.L.M., et al. (2024). Interrelationships between circular economy and Industry 4.0: A research agenda for sustainable supply chains. *Business Strategy and the Environment*, 33(2), 575-596. DOI: 10.1002/bse.3502
- Nascimento, D.L.M., Alencastro, V., Quelhas, O.L.G., Caiado, R.G.G., Garza-Reyes, J.A., Lona, L.R., Tortorella, G. (2019). Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(3), 607-627. DOI: 10.1108/JMTM-03-2018-0071
- Nayeri, S., Sazvar, Z., Heydari, J. (2023). Towards a responsive supply chain based on the industry 5.0 dimensions: A novel decision-making method. *Expert Syst. Appl.*, 213, 119267. DOI: 10.1016/j.eswa.2022.119267
- Nemoto, T., Beglar, D. (2014). Developing Likert-scale questionnaires. In N. Sonda & A. Krause (Eds.), *JALT2013 Conference Proceedings*. Tokyo: JALT
- Ngepah, N., Saba, C.S., Kajewole, D.O. (2024). The impact of industry 4.0 on South Africa's manufacturing sector. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(1), 100226. DOI: 10.1016/j.joitmc.2024.100226
- Ochuba, N.A., Usman, F.O., Okafor, E.S., Akinrinola, O., Amoo, O.O. (2024). Predictive analytics in the maintenance and reliability of satellite telecommunications infrastructure: a conceptual review of strategies and technological advancements. *Engineering Science & Technology Journal*, 5(3), 704-715. DOI: 10.51594/estj.v5i3.866

- Oesterreich, T.D., Teuteberg, F., (2016). Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in Industry*, 83, 121–139. DOI: 10.1016/j.compind.2016.09.006
- Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M.A.; Haddad, H., Kitukutha, N. (2021). Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability. *Sustainability*, 12, 4674. DOI: 10.3390/su12114674.
- Olsson, A. K., Eriksson, K. M., Carlsson, L. (2025). Management toward Industry 5.0: a co-workership approach on digital transformation for future innovative manufacturing. *European Journal of Innovation Management*, 28(1), 65-84. DOI: 10.1108/EJIM-09-2023-0833
- Orazi, F.; Sofritti, F. (2024). Innovation 4.0 Policies in Italy: Strengths and Weaknesses of the Innovation Ecosystem of the “Transition 4.0” Plan from an International Perspective. *Societies*, 14, 42. DOI: 10.3390/soc14030042
- Oztemel, E., Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *J Intell Manuf*, 31, 127–182. DOI: 10.1007/s10845-018-1433-8
- Page, M.J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D. et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(71). DOI: 10.1136/bmj.n71
- Paiva, T., Ribeiro, M., Coutinho, P. (2020). R&D Collaboration, Competitiveness Development, and Open Innovation in R&D. *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.*, 6, 116. DOI: 10.3390/joitmc6040116
- Pandya, D., Kumar, G. (2023). Applying Industry 4.0 technologies for the sustainability of small service enterprises. *Serv Bus* 17, 37–59. DOI: 10.1007/s11628-022-00507-7
- Pandya, D., Kumar, G. and Singh, S. (2024). Aligning sustainability goals of industrial operations and marketing in Industry 4.0 environment for MSMEs in an emerging economy", *Journal of Business & Industrial Marketing*, 39(3), 581-602. DOI: 10.1108/JBIM-04-2022-0183
- Pardo-Garcia, C., Barac, M. (2020). Promoting Employability in Higher Education: A Case Study on Boosting Entrepreneurship Skills. *Sustainability*, 12, 4004. DOI: 10.3390/su12104004
- Passaro, R., Quinto, I., Scandurra, G., Thomas, A. (2023). The drivers of eco-innovations in small and medium-sized enterprises: A systematic literature review and research directions. *Business Strategy and the Environment*, 32(4),1432-1450. DOI:10.1002/bse.3197
- Pertheban, T.R., Thurasamy, R., Marimuthu, A., Venkatachalam, K.R., Annamalah, S., Paraman, P., Hoo, W.C. (2023). The impact of proactive resilience strategies on organizational performance: Role of ambidextrous and dynamic capabilities of SMEs in manufacturing sector. *Sustainability*, 15(16),12665. DOI:10.3390/su151612665
- Pfaff, Y.M. (2023). Agility and digitalization: why strategic agility is a success factor for mastering digitalization – evidence from Industry 4.0 implementations across a supply chain. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 53(5/6),660-684. DOI:10.1108/IJPDLM-06-2022-0200
- Pinto, M.R., Salume, P.K., Barbosa, M.W., de Sousa, P.R. (2023). The path to digital maturity: A cluster analysis of the retail industry in an emerging economy. *Technology in Society*, 72, 102191. DOI: 10.1016/j.techsoc.2022.102191

- Plathottam, S.J., Rzonca, A., Lakhnori, R., Iloeje, C.O. (2023). A review of artificial intelligence applications in manufacturing operations. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, 5(3), e10159. DOI: 10.1002/amp2.10159
- Plummer, P. (2017). Focus group methodology. Part 1: Design considerations. *Int. J. Ther. Rehabilitation*, 24, 297–301. DOI: 10.12968/ijtr.2017.24.7.297
- Polzin, F., Sanders, M., Serebriakova, A. (2021). Finance in global transition scenarios: Mapping investments by technology into finance needs by source. *Energy Econ.*, 99, 105281. DOI: 10.1016/j.eneco.2021.105281
- Pulicherla, K.K., Adapa, V., Ghosh, M., Ingle, P. (2022). Current efforts on sustainable green growth in the manufacturing sector to complement “make in India” for making “self-reliant India”, *Environmental Research*, 206, 112263. DOI: 10.1016/j.envres.2021.112263
- Purwanto, A., Juliana, J. (2022). The effect of supplier performance and transformational supply chain leadership style on supply chain performance in manufacturing companies. *Uncertain Supply Chain Manag.*, 10, 511–516. DOI: 10.5267/j.uscm.2021.12.001
- Qureshi, K.M.; Mewada, B.G.; Buniya, M.K.; Qureshi, M.R.N.M. (2023). Analyzing Critical Success Factors of Lean 4.0 Implementation in Small and Medium Enterprises for Sustainable Manufacturing Supply Chain for Industry 4.0 Using PLS-SEM. *Sustainability*, 15, 5528. DOI: 10.3390/su15065528
- Rahardjo, B., Wang, F. K., Yeh, R. H., Chen, Y. P. (2023). Lean manufacturing in industry 4.0: a smart and sustainable manufacturing system. *Machines*, 11(1), 72. DOI: 10.3390/machines11010072
- Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., Jabbour, A., Rajak, S. (2020). Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. *International Journal of Production Economics* 224, 107546. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.107546
- Realyvásquez-Vargas, A., Arredondo-Soto, K.C., Carrillo-Gutiérrez, T., Ravelo, G. (2018). Applying the Plan-Do-Check-Act (PDCA) cycle to reduce the defects in the manufacturing industry. A case study. *Applied Sciences*, 8(11), 2181. DOI:10.3390/app8112181
- Rizki, D. F. (2023). Application of Lean Management Principles on Improving Operational Efficiency in the Manufacturing Industry. *Riwayat: Educational Journal of History and Humanities*, 6(4), 2781-2786. DOI: 10.24815/jr.v6i4.35598
- Rocha, A.B.T, Oliveira, K.B., Espuny, M., Reis, J.S.M., Oliveira, O.J. (2022). Business transformation through sustainability based on Industry 4.0. *Heliyon*, 8(8), e10015. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10015
- Rockart, J. F. (1979). Chief executives define their own data needs. *Harvard Business Review*, 57(2), 81-93.
- Rodrigues, A.C.C. (2021). Policy, regulation, development and future of biodiesel industry in Brazil. *Clean. Eng. Technol.*, 4, 100197. DOI: 10.1016/j.clet.2021.100197
- Rohayati, Y., Abdillah, A. (2024). Digital Transformation for Era Society 5.0 and Resilience: Urgent Issues from Indonesia. *Societies*, 14(12), 266. DOI: 10.3390/soc14120266
- Rojas, C.N., Peñafiel, G.A.A., Buitrago, D.F.L., Romero, C.A.T. (2021). Society 5.0: A Japanese Concept for a Superintelligent Society. *Sustainability*, 13, 6567. DOI: 10.3390/su13126567
- Rojas-Berrio, S., Rincon-Novoa, J., Sánchez-Monrroy, M., Ascúa, R.; Montoya-Restrepo, L.A. (2022). Factors Influencing 4.0 Technology Adoption in Manufacturing SMEs in an Emerging Country. *J. Small Bus. Strat.*, 32, 67–83. DOI: 10.53703/001c.34608.

- Rojko, A. (2017). Industry 4.0 Concept: Background and Overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (ijim)*, 11(5), 77–90. DOI: 10.3991/ijim.v11i5.7072
- Rossi, A.H.G., Marcondes, G.B., Pontes, J., Leitão, P., Treinta, F.T., De Resende, L.M.M., Mosconi, E., Yoshino, R.T. (2022). Lean Tools in the Context of Industry 4.0: Literature Review, Implementation and Trends. *Sustainability*, 14, 12295. DOI: 10.3390/su141912295
- Roy, D., Mashud, A.H.M. (2022). Optimizing profit in a controlled environment: Assessing the synergy between preservation technology and cap-and-trade policy. *J. King Saud Univ. Sci.*, 34, 101899. DOI: 10.1016/j.jksus.2022.101899
- Rubin, H.J., Rubin, I.S. (2005). *Qualitative interviewing: The art of hearing data* (2nd ed.). Sage Publications, Inc. DOI:10.4135/9781452226651
- Saabye, H., Kristensen, T.B., Wæhrens, B.V. (2020). Real-Time Data Utilization Barriers to Improving Production Performance: An In-depth Case Study Linking Lean Management and Industry 4.0 from a Learning Organization Perspective. *Sustainability*, 12, 8757. DOI: 10.3390/su12218757
- Saha, P.; Talapatra, S.; Belal, H.M.; Jackson, V. Unleashing the Potential of the TQM and Industry 4.0 to Achieve Sustainability Performance in the Context of a Developing Country. *Glob. J. Flex. Syst. Manag.* 2022, 23, 495–513. <https://doi.org/10.1007/s40171-022-00316-x>.
- Saniuk, S., Caganova, D., Saniuk, A. (2023). Knowledge and Skills of Industrial Employees and Managerial Staff for the Industry 4.0 Implementation. *Mob. Networks Appl.*, 28, 220–230. DOI: 10.1007/s11036-021-01788-4
- Santos, B.P., Alberto, A., Lima, T.D.F.M., Charrua-Santos, F.M.B. (2018). Industry 4.0: challenges and opportunities. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 4(1), 111–124. DOI: 10.32358/rpd.2018.v4.316
- Saroja, M., Garg, D., Luthra, S. (2021). Identification and analysis of circular supply chain management practices for sustainability: a fuzzy-DEMATEL approach. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 71(3), 722-747. DOI: 10.1108/IJPPM-11-2020-0613
- Sayem, A., Biswas, P.K., Khan, M.M.A., Romoli, L., Mura, M.D. (2022). Critical Barriers to Industry 4.0 Adoption in Manufacturing Organizations and Their Mitigation Strategies. *J. Manuf. Mater. Process.* 2022, 6, 136. DOI: 10.3390/jmmp6060136
- Scarlat, C., Bărar, D.A.S. (2023). Towards a Transcultural Approach for Inter-Professional Communication in Complex IT Project Teams—Aiming to Avoid Cross-Functional and Cross-Hierarchical Conflicts. *Systems*, 12(1), 10. DOI: 10.3390/systems12010010
- Scavarda, A., Daú, G., Scavarda, L.F., Azevedo, B.D., Korzenowski, A.L. (2020). Social and ecological approaches in urban interfaces: A sharing economy management framework. *Science of the total environment*, 713, 134407. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134407
- Scavarda, A., Daú, G., Scavarda, L.F., Caiado, R.G.G. (2019) An Analysis of the Corporate Social Responsibility and the Industry 4.0 with Focus on the Youth Generation: A Sustainable Human Resource Management Framework. *Sustainability*, 11, 5130. DOI: 10.3390/su11185130
- Scavarda, L.F., Reichhart, A., Hamacher, S., & Holweg, M. (2010). Managing product variety in emerging markets. *International Journal of Operations & Production Management*, 30(2), 205-224. DOI: 10.1108/01443571011018716
- Schery, C.A.D., Vignon, Y.R., Caiado, R.G.G., Santos, R.S., Congro, M., Corseuil, E.T., Roehl, D. (2023). BIM critical factors and benefits for public sector: From a systematic

review to an empirical fuzzy multicriteria approach. *Braz. J. Oper. Prod. Manag.*, 20, 1837. DOI: 10.14488/bjopm.1837.2023

Schilling, L., Seuring, S. (2023). Linking the digital and sustainable transformation with supply chain practices. *International Journal of Production Research*, 62(3), 949–973. DOI: 10.1080/00207543.2023.2173502

Sebrae. (2021). Confirma as diferenças entre microempresa, pequena empresa e MEI. Available at: <https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/entenda-as-diferencas-entre-microempresa-pequena-empresa-e-mei,03f5438af1c92410VgnVCM100000b272010aRCRD>. <Acessado em 01 mai 2021>

Sebrae. (2024). Conheça a Lei Geral das Microempresas e Empresas de Pequeno Porte e entenda como a regra atua em cada conceito de empresa. <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/entenda-as-diferencas-entre-microempresa-pequena-empresa-e-mei,03f5438af1c92410VgnVCM100000b272010aRCRD> <acessado em 17 set 2024>

Seuring, S., Müller, M. (2008). From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, 16(15), 1699–1710. DOI: 10.1016/j.jclepro.2008.04.020

Shah, S.A.A., Jajja, M.S.S., Chatha, K.A., Farooq, S. (2020). Servitization and supply chain integration: An empirical analysis. *Int. J. Prod. Econ.*, 229, 107765. DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107765

Shahzadi, G., Jia, F., Chen, L., John, A. (2024). AI adoption in supply chain management: a systematic literature review. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 35(6), 1125–1150. DOI: 10.1108/JMTM-09-2023-0431

Shamba, D., Day, L.T., Bin Zaman, S., Sunny, A.K., Tarimo, M.N., Peven, K., Khan, J., Thakur, N., Talha, T.U.S., Ashish K.C., et al. (2021). Barriers and enablers to routine register data collection for newborns and mothers: EN-BIRTH multi-country validation study. *BMC Pregnancy Childbirth*, 21, 1–14. DOI: 10.1186/s12884-020-03517-3

Shanmugam, K., Razak, M.A. (2021). Assessment on process safety management implementation maturity among major hazard installations in Malaysia. *Process. Saf. Environ. Prot.* 2021, 149, 485–496. DOI: 10.1016/j.psep.2020.11.013

Sharma, M., Kamble, S., Mani, V., Sehrawat, R., Belhadi, A., Sharma, V. (2021). Industry 4.0 adoption for sustainability in multi-tier manufacturing supply chain in emerging economies, *Journal of Cleaner Production*, 281, 125013, ISSN 0959-6526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125013

Sharma, M.; Luthra, S.; Joshi, S.; Kumar, A. (2022). Analysing the impact of sustainable human resource management practices and industry 4.0 technologies adoption on employability skills. *Int. J. Manpow.*, 43, 463–485. DOI: 10.1108/ijm-02-2021-0085

Sharma, M.; Luthra, S.; Joshi, S.; Kumar, A.; Jain, A. (2023). Green logistics driven circular practices adoption in industry 4.0 Era: A moderating effect of institution pressure and supply chain flexibility. *J. Clean. Prod.*, 383, 135284. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135284

Sharma, R.C., Kohli, D. (2023). Embracing Digital Transformation for Sustainable Development: The Synergy between Learning Organizations, Human Resource Management, and Service Quality. *Journal of Chinese Human Resources Management*, 14(3), 3-17. DOI: 10.47297/wspchrmWSP2040-800501.20231403

Sharma, R.K. (2021). Quality Management and MSMEs. In *Quality Management Practices in MSME Sectors*; Springer Tracts in Mechanical Engineering; Springer: Singapore, 1–23. <https://www.springerprofessional.de/en/quality-management-practices-in-msme-sectors/18611886>

Shevyakova, A.; Munsh, E.; Arystan, M.; Petrenko, Y. (2021). Competence development for Industry 4.0: Qualification requirements and solutions. *Insights Reg. Dev.*, 3, 124–135. DOI: 10.9770/ird.2021.3.1(7)

Shoukoohyar, S., Seddigh, M.R. (2020). Uncovering the dark and bright sides of implementing collaborative forecasting throughout sustainable supply chains: An exploratory approach. *Technol. Forecast. Soc. Chang.*, 158, 120059. DOI: 10.1016/j.techfore.2020.120059

Silvestre, B. S., Silva, M. E., Cormack, A., Thomé, A. M. T. (2020). Supply chain sustainability trajectories: learning through sustainability initiatives. *International Journal of Operations & Production Management*, 40(9), 1301-1337. DOI: 10.1108/IJOPM-01-2020-0043

Sima, V., Gheorghe, I.G., Subić, J., Nancu, D. (2020). Influences of the Industry 4.0 Revolution on the Human Capital Development and Consumer Behavior: A Systematic Review. *Sustainability*, 12, 4035. DOI: 10.3390/su12104035

Singh, A., Madaan, G., Hr, S., Kumar, A. (2023). Smart manufacturing systems: a futuristics roadmap towards application of industry 4.0 technologies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 36(3), 411-428. DOI: 10.1080/0951192X.2022.2090607

Skalli, D., Charkaoui, A., Cherrafi, A., Garza-Reyes, J. A., Antony, J., Shokri, A. (2024). Analyzing the integrated effect of circular economy, Lean Six Sigma, and Industry 4.0 on sustainable manufacturing performance from a practice-based view perspective. *Business Strategy and the Environment*, 33(2), 1208-1226. DOI: 10.1002/bse.3546

Slaper, T.F.; Hall, T.J. (2011). The triple bottom line: What is it and how does it work. *Indiana Bus. Rev.*, 86, 4–8. <http://www.ibrc.indiana.edu/ibr/2011/spring/article2.html>

Sousa, R., Voss, C. A. (2008). Contingency research in operations management practices. *Journal of Operations Management*, 26(6), 697-713. DOI: 10.1016/j.jom.2008.06.001

Sparrow, D.E.; Kruger, K.; Basson, A.H. (2022). An Architecture to Facilitate the Integration of Human Workers in Industry 4.0 Environments. *Int. J. Prod. Res.*, 60, 4778–4796. DOI: 10.1080/00207543.2021.1937747

Srhir, S., Jaegler, A., Montoya-Torres, J.R. (2023). Uncovering Industry 4.0 technology attributes in sustainable supply chain 4.0: A systematic literature review. *Business Strategy and the Environment*, 32(7), 4143-4166. DOI: 10.1002/bse.3358

Stake, R. E. (1995). *The Art of Case Study Research*. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.

Ștefan, A.M., Rusu, N.R., Ovreiu, E., Ciuc, M. (2024). Empowering Healthcare: A Comprehensive Guide to Implementing a Robust Medical Information System—Components, Benefits, Objectives, Evaluation Criteria, and Seamless Deployment Strategies. *Applied System Innovation*, 7(3), 51. DOI: 10.3390/asi7030051

Steg, L., Veldstra, J., de Kleijne, K., Kılıç, Ş., Lucena, A.F., Nilsson, L.J., Sugiyama, M., Smith, P., Tavoni, M., de Coninck, H., et al. (2022). A method to identify barriers to and enablers of implementing climate change mitigation options. *One Earth*, 5, 1216–1227. DOI: 10.1016/j.oneear.2022.10.007

Stokes, D., Bergin, R. (2006). Methodology or “methodolatry”? An evaluation of focus groups and depth interviews. *Qualitative Market Research*, 9(1), 26-37. DOI: 10.1108/13522750610640530

Story, W.K., Deitz, G.D., Richey, R.G. (2021). Influence of supply chain technology responsiveness on supply chain and market performance. *J. Mark. Theory Pr.*, 29, 480–497. DOI: 10.1080/10696679.2021.1872388

- Subramanian, G., Patil, B.T., Gardas, B.B. (2021). Evaluation of enablers of cloud technology to boost industry 4.0 adoption in the manufacturing micro, small and medium enterprises. *J. Model. Manag.* 2021, 16, 944–962. DOI: 10.1108/jm2-08-2020-0207
- Sufiyan, M, Haleem, A., Khan, S. Khan, M. (2019). Evaluating food supply chain performance using hybrid fuzzy MCDM technique. *Sustainable Production and Consumption*, 20, 40–57. DOI: 10.1016/j.spc.2019.03.004
- Sundarakani, B., Manikas, I., Gunasekaran, A. (2024). The role of digital transformation in achieving sustainable supply chain management in Industry 4.0: an editorial review perspective. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 1-9. DOI: 10.1080/13675567.2024.2332123
- Sutrisno, S. (2023). The Role of Partnerships and Business Networks in the Growth of MSMEs in the Digital Age. *Technology and Society Perspectives (TACIT)*, 1(3), 122-131. DOI: 10.61100/tacit.v1i3.61
- Taddei, E., Sassanelli, C., Rosa, P., Terzi, S. (2022). Circular supply chains in the era of industry 4.0: A systematic literature review. *Comput. Ind. Eng.*, 170, 108268. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108268
- Tang, Y.M., Chau, K.Y., Fatima, A., Waqas, M. (2022). Industry 4.0 technology and circular economy practices: business management strategies for environmental sustainability. *Environ Sci Pollut* 29, 49752–49769. DOI: 10.1007/s11356-022-19081-6
- Taqi, H.M.M., Nur, S.S.A., Salman, S., Ahmed, T., Sarker, S., Ali, S.M., Sankaranarayanan, B. (2023). Behavioural factors for Industry 4.0 adoption: implications for knowledge-based supply chains. *Operations Management Research*, 16(3), 1122-1139. DOI:10.1007/s12063-022-00338-9
- Tarihoran, A.D.B., Hubeis, M., Jahroh, S., Zulfainarni, N. (2023). Market-based dynamic capabilities for MSMEs: Evidence from Indonesia's ornamental fish industry. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 9(3), 100123. DOI:10.1016/j.joitmc.2023.100123
- Teece, D.J. (2007). Explicating Dynamic Capabilities: The Nature and Microfoundations of (Sustainable) Enterprise Performance. *Strategic Management Journal*, 28(13), 1319-1350. DOI:10.1002/smj.640
- Teece, D.J. (2014). The Foundations of Enterprise Performance: Dynamic and Ordinary Capabilities in an (Economic) Theory of Firms. *Academy of Management Perspectives*, 28(4), 328-352. <http://www.jstor.org/stable/43822373>
- Teece, D.J., Pisano, G., Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 18(7), 509-533. DOI:10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z
- The World Bank. How does the World Bank classify countries? Available at: <https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/378834-how-does-the-world-bank-classify-countries>. Access: May, 1st, 2021
- Thomé, A. M. T., Ceryno, P. S., Scavarda, A., & Remmen, A. (2016a). Sustainable infrastructure: A review and a research agenda. *Journal of Environmental Management*, 184, 143–156. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.09.080
- Thomé, A. M., Scavarda, L. F., Scavarda, A. J. (2016). Conducting systematic literature review in operations management. *Production Planning & Control* 27(5), 408–420. DOI: 10.1080/09537287.2015.1129464
- Tian, M., Chen, Y., Tian, G., Huang, W., Hu, C. (2023). The role of digital transformation practices in the operations improvement in manufacturing firms: A practice-based

- view. *International Journal of Production Economics*, 262, 108929. DOI: 10.1016/j.ijpe.2023.108929
- Tiraboschi, M., Seghezzi, F. (2016). Il Piano nazionale Industria 4.0: una lettura lavoristica - In: *Labour & Law Issues*, 2(2), 1-41. DOI: 10.6092/issn.2421-2695/6493
- Tortora, A.M., Maria, A., Valentina, D.P., Iannone, R., Pianese, C. (2021). A survey study on Industry 4.0 readiness level of Italian small and medium enterprises. *Procedia Comput. Sci.*, 180, 744–753. DOI: 10.1016/j.procs.2021.01.321
- Tortorella, G.; Saurin, T.A.; Fogliatto, F.S.; Tlapa, D.; Moyano-Fuentes, J.; Gaiardelli, P.; Seyedghorban, Z.; Vassolo, R.; Mac Cawley, A.F.; M, V.S.; et al. (2022). The impact of Industry 4.0 on the relationship between TPM and maintenance performance. *J. Manuf. Technol. Manag.*, 33, 489–520. DOI: 10.1108/jmtm-10-2021-0399
- Tricco, A.C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K.K., Colquhoun, H., Levac, D., Moher, D., Peters, M.D.J., Horsley, T., Weeks, L.; et al. (2018). PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR): Checklist and Explanation. *Ann. Intern. Med.*, 169, 467–473. DOI: 10.7326/M18-0850
- Tripathi, S., Gupta, M. (2021). Identification of challenges and their solution for smart supply chains in Industry 4.0 scenario: a neutrosophic DEMATEL approach. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 40(1), 70-94. DOI: 10.1504/IJLSM.2021.117691
- Truitt, D.L. (2011). The Effect of Training and Development on Employee Attitude as it Relates to Training and Work Proficiency. *Sage Open*, 1, 215824401143333. DOI: 10.1177/2158244011433338
- Trujillo-Gallego, M., Sarache, W., de Sousa Jabbour, A.B.L. (2022). Digital technologies and green human resource management: Capabilities for GSCM adoption and enhanced performance. *Int. J. Prod. Econ.*, 249, 108531. DOI: 10.1016/j.ijpe.2022.108531
- Trujillo-Gallego, M., Sarache, W., Sellitto, M.A. (2021). Identification of practices that facilitate manufacturing companies' environmental collaboration and their influence on sustainable production. *Sustain. Prod. Consum.*, 27, 1372–1391. DOI: 10.1016/j.spc.2021.03.009
- Tsai, Y.-T., Lasminar, R.G. (2021). Proactive and reactive flexibility: How does flexibility mediate the link between supply chain information integration and performance? *Int. J. Eng. Bus. Manag.*, 13, 184797902110076. DOI: 10.1177/18479790211007624
- Tsutsui, W.M. (1996). W. Edwards Deming and the origins of quality control in Japan. *The Journal of Japanese Studies*, 22(2), 295-325. DOI:10.2307/132975
- United Nations Development Programme. Human Development Reports. (2020). Available at: <http://hdr.undp.org/en>. Access: May, 1st, 2021
- United Nations. World Economic Situation and Prospects. (2020). Available at: https://unctad.org/system/files/official-document/wesp2020_en.pdf. Access: May, 1st, 2021
- van Erp, T., Carvalho, N.G.P., Gerolamo, M.C., Gonçalves, R., Rytter, N.G.M., Gladysz, B. (2024). Industry 5.0: A new strategy framework for sustainability management and beyond, *Journal of Cleaner Production*, 142271. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142271
- Vaezinejad, S., Kouhizadeh, M., Schniederjans, D., Sarkis, J. (2024). Digital Technologies and the Circular Economy: A Theoretical Perspective. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4748938> or DOI:10.2139/ssrn.4748938
- Varela, L., Putnik, G., Romero, F. (2022). The concept of collaborative engineering: a systematic literature review. *Production & Manufacturing Research*, 10(1), 784-839. DOI: 10.1080/21693277.2022.2133856

Vidal, G.H.d.P.; Caiado, R.G.G.; Scavarda, L.F.; Ivson, P.; Garza-Reyes, J.A. (2022). Decision support framework for inventory management combining fuzzy multicriteria methods, genetic algorithm, and artificial neural network. *Comput. Ind. Eng.*, 174, 108777. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108777>.

VIM, International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms. JCGM. 2012, 200, 3rd. ed.

Wadood, S.A., Sadiq Jajja, M.S., Chatha, K.A., Farooq, S. (2023). Lean, sustainability and the triple bottom line performance: a systems perspective-based empirical examination. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 72:6, 1719-1739. DOI: 10.1108/IJPPM-06-2021-0347

Wagire, A.A., Joshi, R., Rathore, A.P.S., Jain, R. (2021). Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: Learning from theory and practice. *Prod. Plan. Control*, 32, 603–622. DOI: 10.1080/09537287.2020.1744763

Wang, Y., Toseef, M., Gong, Y. (2021). IT Process Alignment in Business Strategy: Examining the Role of Transactional Leadership and Organization Culture. *Information*, 12, 237. DOI: 10.3390/info12060237

Wei, C. C., Oluwaseyi, O. A., & Chew, G. G. (2024). Exploring environmental sustainability practices in MSMEs: Insights from Malaysia. *International Journal of Management and Sustainability*, 13(1), 76–90. DOI: 10.18488/11.v13i1.3600

Weking, J., Stöcker, M., Kowalkiewicz, M., Böhm, M., Krcmar, H. (2020). Leveraging industry 4.0 – A business model pattern framework. *International Journal of Production Economics*, 25, 107588. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.107588

Wikarek, J., Sitek, P. (2021). Proactive and reactive approach to employee competence configuration problem in planning and scheduling processes. *Appl. Intell.* 2021, 52, 3445–3464. DOI: 10.1007/s10489-021-02594-x

Wine, O., Spiers, J.; Burns, K.K., van Manen, M., Vargas, A.O. (2022). A case study unpacking the collaborative research process: Eight essential components. *Environ. Sci. Policy*, 131, 209–220. DOI: 10.1016/j.envsci.2022.02.006

Wu, J., Guo, S., Huang, H., Liu, W., Xiang, Y. (2018). Information and communications technologies for sustainable development goals: State-of-the-art, needs and perspectives. *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 20(3), 2389–2406. DOI: 10.1109/COMST.2018.2812301

Xu, B., Guertler, M.R., Sick, N. (2023). Analyzing Industry 4.0 Adoption Barriers of Small and Medium-sized Enterprises and Existing Support. *2023 IEEE Engineering Informatics*, 1-10. DOI: 10.1109/IEEECONF58110.2023.10520600

Xu, X., Lu, Y., Vogel-Heuser, B., Wang, L. (2021). Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. *J. Manuf. Syst.*, 61, 530–535. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006

Yang, Y., Liu, Q., Song, J., Zhou, M. (2021). The influence mechanism of financial shared service mode on the competitive advantage of enterprises from the perspective of organizational complexity: A force field analysis. *Int. J. Account. Inf. Syst.*, 42, 100525. DOI: 10.1016/j.accinf.2021.100525

Yaqub, M.Z., Alsabban, A. (2023). Industry-4.0-Enabled Digital Transformation: Prospects, Instruments, Challenges, and Implications for Business Strategies. *Sustainability*, 15, 8553. DOI: 10.3390/su15118553

Yazdi, P.G., Azizi, A., Hashemipour, M. (2019). A hybrid methodology for validation of optimization solutions effects on manufacturing sustainability with time study and simulation approach for SMEs. *Sustainability*, 11(5), 1454. DOI: 10.3390/su11051454

- Yin, R.K. (1994). Discovering the Future of the Case Study. *Method in Evaluation Research*. *Evaluation Practice*, 15(3), 283-290. DOI:10.1177/109821409401500309
- Yin, R.K. (2014). *Case Study Research Design and Methods* (5th ed.). Thousand Oaks, CA: Sage. 282. DOI:10.3138/cjpe.30.1.108
- Yu, L., Fang, H., Rong, Y., Min, J., Xing, Y. (2023). A Novel Picture Fuzzy Set-Based Decision Approach for Consumer Trust Project Risk Assessment. *Systems*, 11, 160. DOI: 10.3390/systems11030160
- Yülek, M.A. (2018). The Industrialization Process: A Streamlined Version. In: *How Nations Succeed: Manufacturing, Trade, Industrial Policy, and Economic Development*. Palgrave Macmillan, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-13-0568-9_8
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X
- Zafar, M. H., Langås, E. F., Sanfilippo, F. (2024). Exploring the synergies between collaborative robotics, digital twins, augmentation, and industry 5.0 for smart manufacturing: A state-of-the-art review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89, 102769. DOI: 10.1016/j.rcim.2024.102769
- Zavadskas, E.K., Turskis, Z. (2010). A New Additive Ratio Assessment (Aras) Method in Multicriteria Decision-Making/Naujas Adityvinis Kriterijų Santykių Įvertinimo Metodas (Aras) Daugiakriteriniams Uždaviniams Spręsti. *Technol. Econ. Dev. Econ.* 2010, 16, 159–172. DOI: 10.3846/tede.2010.10
- Zhang, H., Meng, F., Wang, G., Saraswathi, E., Ruby, D. (2022a). Research on the Dynamic Monitoring System of Intelligent Digital Teaching. *J. Interconnect. Networks*, 22, 2147016. DOI: 10.1142/s0219265921470162
- Zhang, H., Yang, L., Walker, R., Wang, Y. (2022). How to influence the professional discretion of street-level bureaucrats: Transformational leadership, organizational learning, and professionalization strategies in the delivery of social assistance. *Public Manag. Rev.*, 24, 208–232. DOI: 10.1080/14719037.2020.1805919
- Zhang, Y., Liu, S., Tan, J., Jiang, G., Zhu, Q. (2018). Effects of risks on the performance of business process outsourcing projects: The moderating roles of knowledge management capabilities. *Int. J. Proj. Manag.*, 36, 627–639. DOI: 10.1016/j.ijproman.2018.02.002
- Zhao, J., Wang, C., Xu, L. (2019). Decision for pricing, service, and recycling of closed-loop supply chains considering different remanufacturing roles and technology authorizations. *Comput. Ind. Eng.*, 132, 59–73. DOI: 10.1016/j.cie.2019.04.019
- Zhao, X., Wang, P., Pal, R. (2021). The effects of agro-food supply chain integration on product quality and financial performance: Evidence from Chinese agro-food processing business. *Int. J. Prod. Econ.* 2021, 231, 107832. DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107832

Apêndices

Apêndice A - Questionário do Pannel de Especialistas

[Adaptado de Machado et al. (2021)]

QUESTIONÁRIO A1 (Primeira rodada - Pannel de Especialistas)

Seção Parte 1 - Pesquisa sobre barreiras e facilitadores para a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em cadeias de suprimentos sustentáveis de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Responsável: Doutorando: Eduardo Augusto Machado, e Professores: D.Sc. Luiz Felipe Scavarda / D.Sc. Rodrigo Caiado

Você está sendo convidado a participar voluntariamente de uma pesquisa/entrevista. Este documento, denominado Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), tem o objetivo de garantir seus direitos como participante, e você pode manter uma cópia deste documento se desejar. Por favor, leia cuidadosamente e com calma, aproveitando para esclarecer suas dúvidas. Caso tenha dúvidas antes ou mesmo após indicar seu acordo eletronicamente, você pode esclarecê-las com os pesquisadores no momento da pesquisa, presencialmente ou online. Não haverá prejuízos se você não aceitar participar ou retirar sua autorização a qualquer momento. Sua identificação não será utilizada.

Objetivos: A principal justificativa para a realização desta pesquisa/entrevista é validar barreiras e facilitadores para a integração d Indústria 4.0 e da sustentabilidade em cadeias de suprimentos das micro, pequenas e médias empresas (MPMEs). Tanto as barreiras quanto os facilitadores serão apresentados a você, que por sua vez deve responder indicando a intensidade de cada item em relação à sua respectiva importância para as MPMEs. Ao final de cada um dos parâmetros de estudo (barreiras e facilitadores), você pode indicar livremente novas barreiras e facilitadores que ainda não foram considerados e que você entende que devem ser listados.

Procedimentos: Inicialmente, marque a primeira opção indicando que você deseja participar como voluntário. Em seguida, insira seus dados e seu e-mail, caso deseje receber os resultados tratados estatisticamente e um relatório final da pesquisa. Por favor, responda às perguntas sobre barreiras e facilitadores com base em seu conhecimento e experiência. Nas seções seguintes, avalie indicando o grau de intensidade das barreiras e facilitadores em termos de importância e influência para as MPMEs.

Glossário:

****Barreira:** Força resistente que dificulta a realização de atividades [Kouhizadeh et al. (2021)].

****Facilitador:** Também caracterizado como um indutor, um fator crítico de sucesso. Fatores críticos de sucesso podem ser entendidos como ações organizacionais necessárias para garantir o sucesso e a competitividade, apoiando os processos de mudança organizacional de uma empresa [Rockart (1979)].

****Indústria 4.0 (I4.0):** Tendência à digitalização e automação do ambiente de manufatura [Oesterreich & Teuteberg (2016)], confluência de tecnologias de várias tecnologias digitais [Koh et al. (2019)], novo estágio ou paradigma da produção industrial, focando nos resultados do processo de transformação [Weking et al. (2020)]. Visa ligar tecnologias

disruptivas a sistemas de manufatura, combinando operações inteligentes e gestão da cadeia de suprimentos (OSCM) [Caiado et al. (2021)].

****Tecnologias I4.0:** IoT (Internet das Coisas); CPS (Sistemas Ciber-Físicos); BDA (Big Data Analytics); Cibersegurança; Computação em Nuvem; AM (Manufatura Aditiva)/Impressão 3D (3DP); AR (Realidade Aumentada)/VR (Realidade Virtual); Robótica Avançada; Blockchain.

****Cadeia de suprimentos sustentável:** Gestão dos fluxos de materiais, informações e capitais, bem como cooperação entre empresas ao longo da cadeia de suprimentos, tendo objetivos das três dimensões do desenvolvimento sustentável (econômico, ambiental e social) [Seuring & Müller (2008)].

****Países em desenvolvimento:** Conceito muito heterogêneo, as designações “desenvolvido” e “em desenvolvimento” são destinadas para conveniência estatística e não necessariamente expressam um julgamento sobre o estágio alcançado por um determinado país ou região no processo de desenvolvimento. De um modo geral, são países com um Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) entre 0,555 e 0,799 [The World Bank (2021); United Nations Development Programme (2021); United Nations (2021)].

****Microempresa:** Faturamento anual igual ou inferior a R\$360.000,00 (US\$72.000,00—paridade US\$ 1 = R\$5), também caracterizada como empresas com até 9 (nove) empregados [Sebrae (2021)].

****Pequena empresa:** Receita anual igual ou inferior a R\$4.800.000,00 e superior a R\$360.000,00 (menos de US\$ 960.000,00 e mais de US\$72.000,00—paridade US\$ 1 = R\$5), também caracterizada como empresas com 10 a 49 empregados (serviços e comércio) e entre 20 a 99 empregados (indústria) [Sebrae (2021)].

****Média empresa:** Faturamento anual igual ou inferior a R\$ 20.000.000,00 e superior a R\$4.800.000,00 (menos de US\$ 5.000.000,00 e mais de US\$960.000,00—paridade US\$1 = R\$5) também caracterizada como empresas com 50 a 99 empregados (serviços e comércio) e entre 100 a 499 empregados (indústria) [Sebrae (2021)].

Você aceita participar como voluntário nesta pesquisa?

☐ Sim / ☐ Não

Por favor, insira seu endereço de e-mail se desejar receber os resultados da pesquisa:

Seção Parte 2 - Perfil

Qual é o seu tempo acumulado (em anos) de experiência com ou em MPMEs? _____

Com que tamanho de empresa é a sua experiência acumulada com ou em MPMEs?

☐ Micro e pequenas empresas

☐ Médias empresas

☐ Todas (micro, pequenas e médias empresas)

Qual é o seu conhecimento/experiência com tecnologias I4.0?

☐ Nenhum

☐ Até 2 anos

☐ De 3 a 5 anos

☐ Mais de 5 anos

Qual é o seu conhecimento/experiência com sustentabilidade em cadeias de suprimentos?

☐ Nenhum

☐ Até 4 anos

☐ De 5 a 9 anos

☐ Mais de 10 anos

Seção Parte 3 - BARREIRAS

Esta seção lista barreiras para a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em cadeias de suprimentos sustentáveis. O objetivo é indicar o grau de importância de cada uma dessas barreiras para as MPMEs.

(☐) Nenhum; (☐) Muito Baixo; (☐) Baixo; (☐) Médio; (☐) Alto; (☐) Muito Alto; (☐) Totalmente

- Problemas de cibersegurança
- Custo de melhoria & condição econômica da OSCM
- Falta de apoio da autoridade reguladora/pobre legislação
- Falta de compromisso da alta administração
- Problemas de interoperabilidade
- Empregabilidade
- Falta de expertise técnica
- Necessidades de recursos e energia alternativos
- Desafios de design para reutilização e recuperação de produtos
- Barreiras organizacionais, restrições de capacidade
- Resistência à mudança/práticas de gestão da mudança e adoção de inovação para a sociedade
- Problemas de gerenciamento e armazenamento de dados
- Desigualdades de oportunidades e riscos de digitalização

Existem BARREIRAS que você deseja adicionar que não estão listadas? (Se na sua opinião a lista está completa, responda apenas 'não', se você acredita que há uma ou mais BARREIRAS que devem ser incluídas na lista, escreva na sequência que desejar):

Seção Parte 4 - FACILITADORES

Esta seção lista facilitadores para a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em cadeias de suprimentos sustentáveis. O objetivo é que você indique quão importante cada um desses facilitadores é para as MPMEs.

(☐) Nenhum; (☐) Muito Baixo; (☐) Baixo; (☐) Médio; (☐) Alto; (☐) Muito Alto; (☐) Totalmente

- Processo interno de inovação
- Inovação aberta
- Gestão da mudança
- Capacidades dinâmicas
- Modelos de negócios inovadores e design de serviços
- Integração de clientes e fornecedores
- Apoio de parceiros não convencionais
- Pressões governamentais e institucionais
- Redes colaborativas
- Técnicas de design de serviços e modelos de negócios inovadores
- Redesenho e estrutura descentralizada
- Alinhamento estratégico
- Prontidão para I4.0
- Adoção de componentes de fábrica inteligente
- Soluções centradas em dados
- Fluxo de dados consistente
- Design modular
- Transparência da informação e segurança de dados
- Filosofia sustentável
- Foco em recursos naturais renováveis
- Integração interdisciplinar e holística

- Economia compartilhada
- Pensamento de ciclo de vida e processos circulares
- Compartilhamento de conhecimento
- Comunicação eficaz
- Esquemas de incentivo individual
- Empoderamento dos funcionários
- Experimentação
- Educação e treinamento focados em habilidades sociais e técnicas
- Liderança transformacional
- Compromisso da alta administração

Existem FACILITADORES que você deseja adicionar que não estão listados? (Se na sua opinião a lista está completa, responda apenas 'não', se você acredita que há um ou mais FACILITADORES que devem ser incluídos na lista, escreva na sequência que desejar):

QUESTIONÁRIO A2 (Segunda rodada—Painel de Especialistas)

Seção Parte 1—Parte complementar da primeira rodada do painel com especialistas sobre barreiras e facilitadores para a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em cadeias de suprimentos sustentáveis de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)

Pesquisa complementar com especialistas

Responsável: Doutorando: Eduardo Augusto Machado, e Professores: Dr. Luiz Felipe Scavarda/Dr. Rodrigo Caiado

Prezado(a) especialista, seu questionário foi considerado completo e atendeu a todos os requisitos de validação. Durante o processo de coleta de dados do questionário, foram filtradas 3 (três) novas BARREIRAS e 2 (dois) novos FACILITADORES. Precisamos que você avalie a relevância dessas 3 BARREIRAS e 2 FACILITADORES respondendo às 2 seções extras deste complemento de pesquisa. Este questionário complementar é rápido de completar, e agradecemos sua atenção.

Nota: Os "termos de consentimento informado (TCI)" que você concordou no questionário principal são estritamente mantidos.

Seção Parte 2—Aceitação/e-mail do especialista

Você aceita participar como voluntário neste complemento de pesquisa?

() Sim/() Não. Indique seu e-mail: _____

Seção Parte 3—BARREIRAS

Esta seção apresenta barreiras que foram filtradas das nomeações na pergunta aberta para essa questão.

São três BARREIRAS extras para sua avaliação:

- Aspectos culturais
- Subutilização do conhecimento acadêmico/universidades
- Falta de investimento em P&D

São duas perguntas para cada BARREIRA, se você, como especialista, entender que:

(a) É realmente uma BARREIRA para a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em cadeias de suprimentos sustentáveis de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)?

(b) Indique o grau de importância de cada barreira extra para as MPMEs.

Você considera 'Aspectos culturais/características' uma barreira para a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em cadeias de suprimentos sustentáveis de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)?

☐ Sim/☐ Não

Se você considera 'Aspectos culturais' uma barreira, indique quanto importante é para as MPMEs. NOTA: Se você NÃO CONSIDERAR (marcou 'NÃO' na pergunta anterior, marque a opção NENHUMA):

☐ Nenhuma; ☐ Muito Baixa; ☐ Baixa; ☐ Média; ☐ Alta; ☐ Muito Alta; ☐ Totalmente

Você considera 'Subutilização do conhecimento acadêmico/universidades' uma barreira para a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em cadeias de suprimentos sustentáveis de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)?

☐ Sim/☐ Não

Se você considera 'Subutilização do conhecimento acadêmico/universidades' uma barreira, indique quanto importante é para as MPMEs. NOTA: Se NÃO CONSIDERAR (você marcou 'não' na pergunta anterior, marque a opção NENHUMA):

☐ Nenhuma; ☐ Muito Baixa; ☐ Baixa; ☐ Média; ☐ Alta; ☐ Muito Alta; ☐ Totalmente

Você considera 'Falta de investimento em P&D' uma barreira para a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em cadeias de suprimentos sustentáveis de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)?

☐ Sim/☐ Não

Se você considera 'Falta de investimento em P&D' uma barreira, indique quanto importante é para as MPMEs. NOTA: Se você NÃO CONSIDERAR (marcou 'NÃO' na pergunta anterior, marque a opção NENHUMA):

☐ Nenhuma; ☐ Muito Baixa; ☐ Baixa; ☐ Média; ☐ Alta; ☐ Muito Alta; ☐ Totalmente

Seção Parte 4—FACILITADORES

Esta seção apresenta facilitadores que foram filtrados das nomeações na pergunta aberta para essa questão.

São dois FACILITADORES extras para sua avaliação:

- Melhor gestão de Certificações, Normas e Regulamentos
- Valorização de P&D/Centros de Pesquisa

São duas perguntas para cada FACILITADOR, se você, como especialista, entender que:

(a) É realmente um FACILITADOR para a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em cadeias de suprimentos sustentáveis de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)?

(b) Indique o grau de importância de cada facilitador extra para as MPMEs.

Você considera 'Melhor Gestão de Certificações, Normas e Regulamentos' um facilitador para a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em cadeias de suprimentos sustentáveis de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)?

☐ Sim/☐ Não

Se você considera 'Melhor Gestão de Certificações, Normas e Regulamentos' um facilitador, indique quanto importante é para as MPMEs. NOTA: Se você NÃO CONSIDERAR (marcou 'NÃO' na pergunta anterior, marque a opção NENHUMA):

☐ Nenhuma; ☐ Muito Baixa; ☐ Baixa; ☐ Média; ☐ Alta; ☐ Muito Alta; ☐ Totalmente

Você considera 'Valorização de P&D/Centros de Pesquisa' um facilitador para a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0) em cadeias de suprimentos sustentáveis de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)?

☐ Sim/☐ Não

Se você considera 'Valorização de P&D/Centros de Pesquisa' um facilitador, indique quão importante é para as MPMEs. NOTA: Se você NÃO CONSIDERAR (marcou 'NÃO' na pergunta anterior, marque a opção NENHUMA):

☐ Nenhuma; ☐ Muito Baixa; ☐ Baixa; ☐ Média; ☐ Alta; ☐ Muito Alta; ☐ Totalmente

Apêndice B - DEMATEL

Existem diferentes abordagens para o Fuzzy-DEMATEL. Nesta pesquisa, ele foi utilizado para a escala e como uma forma de agregação com distribuição triangular para dois grupos (micro e pequenas empresas, e médias empresas). Em seguida, é realizada a fuzzificação considerando as respostas desses dois grupos. Após esta etapa, ocorre a desfuzzificação, onde são gerados valores que indicam quais fatores (barreiras e facilitadores) são causa ou efeito. A agregação dos dois grupos gera um terceiro grupo agregado que utiliza a média dos valores de apropriação obtidos anteriormente.

(B1) Criação da correspondência dos termos linguísticos e valores.

(B2) Agregar resultados e obter uma matriz de relação direta fuzzy pareada (X):

Um instrumento de pesquisa composto baseado em comparações entre pares de barreiras é preenchido por especialistas. A avaliação dos especialistas é adicionada calculando as pontuações médias e formando matrizes de relação direta agregadas. Quando o número de fatores é n , a matriz de comparação de pares, X , é $n \times n$. Cada elemento dentro desta matriz, X_{ij} , representa o nível de influência do fator i sobre o fator j . A influência de cada fator sobre si mesmo, que forma a diagonal da matriz de relação direta, é anulada. A matriz geral de relação direta de pares é apresentada, seguindo [Jassbi et al. (2011)]:

$$\tilde{z} = \frac{(\tilde{z}^1 \oplus \tilde{z}^2 \oplus \dots \oplus \tilde{z}^p)}{p}$$

$$\tilde{Z} = \begin{bmatrix} \tilde{z}_{11} & \tilde{z}_{12} & \dots & \tilde{z}_{1n} \\ \tilde{z}_{21} & \tilde{z}_{21} & 0 & \tilde{z}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{z}_{n1} & \tilde{z}_{n2} & \dots & \tilde{z}_{nn} \end{bmatrix}$$

Relação da matriz Fuzzy X usando:

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{21} & 0 & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{n1} & \tilde{x}_{n2} & \dots & \tilde{x}_{nn} \end{bmatrix}$$

Onde:

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{\tilde{z}_{ij}}{r} = \left(\frac{l_{ij}}{r}, \frac{m_{ij}}{r}, \frac{n_{ij}}{r} \right)$$

$$r = \max_{k \leq i \leq n} \left(\sum_{j=1}^n u_{ij} \right).$$

(B3) Normalize a matriz de relação direta e calcule a matriz de relação total (T) que determina a relação entre os fatores onde I é a matriz identidade:

Após calcular as matrizes acima, a matriz fuzzy de relação total $\tilde{T}$ é computada. A matriz fuzzy de relação total é definida como: [Lin & Wu (2004)], tem-se:

$$\tilde{T} = \lim_{k \rightarrow \infty} (\tilde{X}^1 + \tilde{X}^2 + \dots + \tilde{X}^k)$$

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} \tilde{t}_{11} & \tilde{t}_{12} & \dots & \tilde{t}_{1n} \\ \tilde{t}_{21} & \tilde{t}_{22} & 0 & \tilde{t}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{t}_{n1} & \tilde{t}_{n2} & \dots & \tilde{t}_{nn} \end{bmatrix}$$

In which $\tilde{t}_{ij} = (l''_{ij}, m''_{ij}, u''_{ij})$ and

$$\begin{aligned} [l''_{ij}] &= X_l \times (I - X_l^{-1}), [m''_{ij}] = X_l \times (I - X_m^{-1}), [u''_{ij}] \\ &= X_l \times (I - X_u^{-1}) \end{aligned}$$

(B4) Determine as somas das linhas e das colunas de T:

Dado que T_{ij} é a variável de comparação do fator i sobre o fator j na matriz de relação total, T, onde i, j = 1, 2, ..., n, as somas das linhas (D_i) e das colunas (R_j) para cada linha i e coluna j são obtidas usando as expressões:

$$D_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad \forall i$$

$$R_j = \sum_{i=1}^n t_{ij} \quad \forall j$$

Ao produzir a matriz $\tilde{T}$, então são calculados $\tilde{D}_i + \tilde{R}_j$ e $\tilde{D}_i - \tilde{R}_j$ nos quais $\tilde{D}_i$ e $\tilde{R}_j$ são a soma das linhas e a soma das colunas de $\tilde{T}$, respectivamente. Para finalizar o procedimento, todos os valores calculados de $\tilde{D}_i + \tilde{R}_j$ e $\tilde{D}_i - \tilde{R}_j$ são defuzificados através de um método de defuzificação adequado. Em seguida, haverá dois conjuntos de números: $(\tilde{D}_i + \tilde{R}_j)^{\text{def}}$ que mostra quão importantes são os objetivos estratégicos, e $(\tilde{D}_i - \tilde{R}_j)^{\text{def}}$ que mostra qual objetivo estratégico é causa e qual é efeito. Geralmente, se o valor $(\tilde{D}_i - \tilde{R}_j)^{\text{def}}$ for positivo, os objetivos pertencem ao grupo de causas, e se o valor $(\tilde{D}_i - \tilde{R}_j)^{\text{def}}$ for negativo, os objetivos pertencem ao grupo de efeitos.

(B5) Determine os valores gerais de proeminência e efeito líquido dos fatores:

O valor geral pelo qual um fator está sendo influenciado e sua influência sobre outros fatores caracterizam a proeminência geral (P). A diferença entre o impacto que um fator tem sobre os outros e o impacto recebido pelos outros caracteriza o valor do efeito líquido (Ei). P_i e E_i podem ser calculados pelas expressões:

$$P_i = \{D_i + R_j | i = j\}$$

$$E_i = \{D_i - R_j | i = j\}$$

(C6) Formule os Diagramas de Causa-Efeito DEMATEL:

O último passo é a representação gráfica para cada fator (barreiras e facilitadores) dos valores calculados de proeminência e efeito líquido em um eixo bidimensional. O eixo X é o valor proeminente, o eixo Y é o valor de efeito líquido. O valor limite θ é definido pela expressão:

$$\theta = \text{mean}(T) + SDT$$

Apêndice C - Questionário Survey **<Adaptado de Machado et al. (2024)>**

O que impulsiona a Indústria 4.0 (I4.0) sustentável? O papel das barreiras e facilitadores para a transformação digital de forma sustentável na linha de triplo resultado (TBL) em cadeias de suprimentos (CSs) de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)

Parte 1 de 7 - TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Responsáveis: Estudante de doutorado: Eduardo Augusto Machado e Professores: PhD Luiz Felipe Scavarda / PhD Rodrigo Caiado

Você está sendo convidado a participar voluntariamente de uma pesquisa/entrevista. Este documento, denominado Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), destina-se a garantir seus direitos como participante, e você pode manter uma cópia dele, se desejar. Por favor, leia cuidadosamente e com calma, aproveitando a oportunidade para esclarecer suas dúvidas. Caso surjam dúvidas durante a pesquisa, você pode esclarecê-las com os pesquisadores no momento da pesquisa. Não haverá danos se você não aceitar participar ou retirar sua autorização a qualquer momento. Suas informações não serão utilizadas.

Em contrapartida, se desejar, ao participar desta pesquisa preenchendo o questionário completamente, você receberá um relatório consolidado com informações sobre as tabulações e os resultados obtidos na análise conjunta das respostas ao questionário.

Objetivo: As principais justificativas para a realização desta pesquisa/entrevista são (i) entender a relação entre as "barreiras críticas e facilitadores associados à integração" e "a integração da Indústria 4.0 e sustentabilidade" nas cadeias de suprimentos de MPMEs, (ii) determinar a importância relativa/grau das barreiras e facilitadores, e (iii) validar os principais indicadores para estudar o fenômeno de integração da Indústria 4.0 Sustentável em MPMEs. Para isso, é apresentado abaixo um conjunto de itens (indicadores), relacionados a esses constructos (barreiras, facilitadores e integração) da adoção da I4.0 sob a perspectiva TPP (tecnologia, processo, pessoas), adotando as lentes da TBL (linha de triplo resultado) em cadeias de suprimentos de MPMEs. Solicitamos gentilmente que responda a esses itens, indicando a intensidade de cada item em relação ao seu respectivo grau de importância para MPMEs. No final do questionário, você pode comentar livremente sobre sua experiência na integração de sustentabilidade e I4.0 em CSs, e o nível de maturidade na sua organização atual.

Procedimentos: Inicialmente, marque a primeira opção indicando que deseja participar como voluntário. Em seguida, insira seus dados e seu e-mail, caso deseje receber os resultados tratados estatisticamente e um relatório final da pesquisa. Por favor, responda às perguntas com base no seu conhecimento e experiência.

GLOSSÁRIO:

Barreira: Força resistente que dificulta a realização de atividades.

Facilitador: Também caracterizado como um driver, promotor ou um fator crítico de sucesso. Fatores críticos de sucesso podem ser entendidos como ações organizacionais necessárias para garantir o sucesso e a competitividade, apoiando os processos de mudança organizacional de uma empresa.

Indústria 4.0 (I4.0): Tendência à digitalização e automação do ambiente de manufatura, confluência de tecnologias de uma variedade de tecnologias digitais, novo estágio ou paradigma da produção industrial, focando nos resultados do processo de transformação digital. Visa vincular tecnologias disruptivas aos sistemas de manufatura, combinando operações inteligentes e gestão da cadeia de suprimentos (OSCM).

Exemplos de Tecnologias da I4.0: IoT (Internet das Coisas); CPS (Sistemas Ciber-Físicos); BDA (Análise de Big Data); Cibersegurança; Computação em Nuvem; AM (Manufatura Aditiva)/3DP (Impressão 3D), AR (Realidade Aumentada)/VR (Realidade Virtual); Robótica Avançada; Blockchain.

Integração da cadeia de suprimentos digital: A integração vertical liga o produto físico e a camada de manufatura com níveis hierárquicos, sistemas e processos de gestão. A integração horizontal liga sistemas de manufatura verticalmente integrados e redes em uma solução de ponta a ponta, permitindo análises, previsões, gestão e comunicações otimizadas em toda a cadeia de suprimentos.

A integração vertical diz respeito à integração de vários sistemas de TI nos diferentes níveis hierárquicos dentro de uma fábrica (por exemplo, atuadores e sensores de produção, sistemas empresariais e desenvolvimento de produtos) e é uma característica central da visão da Indústria 4.0.

A integração horizontal refere-se à integração dos vários sistemas de TI utilizados nas diferentes etapas dos processos de manufatura e planejamento de negócios.

A integração digital de ponta a ponta em toda a cadeia de valor é a extensão da integração horizontal para se tornar a integração de toda a cadeia de valor, abrangendo todo o ciclo de vida do produto.

Nota 1: Fonte das barreiras e facilitadores apresentados neste questionário: Adaptado de Machado, E.; Scavarda, L.F.; Caiado, R.G.G.; Thomé, A.M.T. (2021). Barriers and Enablers for the Integration of Industry 4.0 and Sustainability in Supply Chains of MSMEs. Sustainability, 13, 11664. [DOI: 10.3390/su132111664](https://doi.org/10.3390/su132111664)

1. Você concorda em participar desta pesquisa? (Seus dados pessoais NÃO serão utilizados ou publicados)

☐ Sim ☐ Não

2. Endereço de e-mail (para envio dos resultados da pesquisa, se solicitado):

3. Você deseja receber os resultados da pesquisa (versão consolidada)?

☐ Sim ☐ Não

Parte 2 de 7 – Perfil e Informações Gerais

4. Data de nascimento:* _____(Exemplo: 7 de janeiro de 2019)

5. Em que tipo de empresa é a sua experiência acumulada?

Nota: Você pode marcar mais de uma opção

Marque todas que se aplicam:

☐ Microempresas (<10 funcionários; <= EUR 2 milhões / ano de faturamento)

☐ Pequenas empresas (<50 funcionários; <= EUR 10 milhões / ano de faturamento)

☐ Médias empresas (<250 funcionários; <= EUR 50 milhões / ano de faturamento)

☐ Grandes empresas (>251 funcionários; > EUR 51 milhões / ano de faturamento)

6. Qual é o seu conhecimento/experiência acumulado com Sustentabilidade na Cadeia de Suprimentos?

Notas: (i) Dimensões da sustentabilidade são: econômica, ambiental ou social; (ii) Cadeia de suprimentos: fornecedores, clientes/consumidores, parceiros estratégicos, entre outros.

7. Qual é o seu conhecimento/experiência acumulado com tecnologias da Indústria 4.0?

Marque apenas um oval:

☐ Nenhuma ☐ Menos de 3 anos ☐ De 3 a menos de 5 anos ☐ 5 ou mais anos

8. Em quais países predominantes você acumulou sua experiência profissional?

Nota: por favor, liste até três países, usando vírgula para separar cada país do outro.

9. Como você classifica o setor econômico predominante de sua experiência profissional?

Fonte: Adaptado da Comissão Europeia (2022)

Nota: Se for outro setor, por favor, especifique.

Marcar apenas uma opção.

☐ Indústrias automotiva, naval e aeronáutica ☐ Biotecnologia ☐ Químicos

☐ Setor da construção ☐ Cosméticos ☐ Educação

☐ Indústrias de engenharia elétrica e eletrônica (EEI) ☐ Entretenimento

☐ Finanças ☐ Diretiva de armas de fogo ☐ Indústria de alimentos e bebidas

- ☐ Governo ☐ Indústrias marítimas ☐ Engenharia mecânica ☐ Militar
☐ Organizações não governamentais (ONGs) + Instituições do terceiro setor
☐ Indústrias online (por exemplo: jogos de azar) e transformação digital
☐ Serviços postais ☐ Equipamentos de pressão e aparelhos a gás
☐ Ecossistema de proximidade e economia social ☐ Profissionais autônomos
☐ Indústrias de matérias-primas, metais, minerais e baseadas em florestas (agricultura...)
☐ Varejo e atacado ☐ Indústrias têxteis, de moda e criativas ☐ Turismo
☐ Brinquedos ☐ Outros: _____

Parte 3 de 7 – Pesquisa de BARREIRAS para a Integração Sustentável da I4.0 em SCs de MPMEs

Por favor, expresse sua avaliação de concordância ou discordância com as seguintes BARREIRAS para a integração da I4.0 com a visão de triplo resultado (TBL) para sustentabilidade em cadeias de suprimentos (CSs) de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs), de acordo com a escala proposta. Marque a célula que corresponde ao grau de relevância que você atribui a cada uma delas e adicione outra se considerar necessário, respeitando a seguinte escala:

ESCALA PARA INDICADORES DE BARREIRAS:

1 - Discordo fortemente / 2 - Discordo / 3 - Neutro / 4 - Concordo / 5 - Concordo fortemente / Sem opinião

10. Diante do constructo "Falta de Conhecimento Técnico" (B1), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos seguintes indicadores:

Marcar apenas uma opção por linha.

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente
Falta de treinamento de funcionários (FCT1)					
Falta de metodologia e práticas de compartilhamento de conhecimento (FCT2)					

11. Diante do constructo "Questões de Segurança Cibernética" (B2), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos seguintes indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente
Processos inadequados para monitoramento e controle (PC1)					
Fraquezas em casos de ataques e ameaças associadas ao mau uso da segurança da tecnologia da informação disponível (PC2)					

12. Diante do constructo "Resistência à Mudança, Práticas de Gestão da Mudança e Adoção de Inovação" (B3), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos seguintes indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente
Falta de estímulo à inovação como forma de exploração e desenvolvimento da capacidade da empresa (RC1)					
Falta de gestão eficaz e/ou sistema de governança e conformidade (RC2)					

13. Diante do constructo "Falta de Investimento em P&D" (B4), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos seguintes indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente
Falta de condições financeiras e/ou estrutura organizacional (FI1)					
Falta de apoio da alta administração (FI2)					

14. Diante do constructo "Custos de Atualização e Condição Econômica da OSCM" (B5), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos seguintes indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente
Procedimentos incorretos ou baixo nível/dificuldade de reutilização e recuperação de produtos (CMC1)					
Baixo nível de priorização na seleção e uso de produtos, serviços e empresas com práticas sustentáveis ao longo da cadeia de suprimentos (CMC2)					

15. Diante do constructo "Falta de Apoio da Autoridade Reguladora, Legislação Fraca" (B6), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos seguintes indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente

Baixo nível de envolvimento e
sinergia da autoridade
reguladora com a empresa
(FA1)

Legislação limitada ou obsoleta
associada a inovações
recorrentes inerentes ao avanço
tecnológico (FA2)

16. Diante do constructo "Falta de Comprometimento da Alta Administração" (B7), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos seguintes indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente
Falta de estímulo para gestão compartilhada e colaborativa (FC1)					

Falta de comunicação eficiente,
campanhas de conscientização
(FC2)

17. Diante do constructo "Recursos Alternativos e Necessidades Energéticas" (B8), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos seguintes indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente
Falta de condições técnicas ou maturidade tecnológica para adequação (RAN1)					

Falta de fundos para
investimentos em tecnologias
apropriadas (RAN2)

Parte 4 de 7 – Pesquisa de FACILITADORES para a Integração Sustentável da I4.0 em CSs de MPMEs

Por favor, expresse sua avaliação de concordância ou discordância com os seguintes FACILITADORES para a integração da I4.0 com a visão de triplo resultado (TBL) para sustentabilidade em cadeias de suprimentos (CSs) de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs), de acordo com a escala proposta. Marque a célula que corresponde ao grau de relevância que você atribui a cada uma delas e adicione outra se considerar necessário, respeitando a seguinte escala:

ESCALA PARA INDICADORES DE FACILITADORES: 1 - Discordo fortemente / 2 - Discordo / 3 - Neutro / 4 - Concordo / 5 - Concordo fortemente / Sem opinião

18. Diante do constructo "Comprometimento da Alta Administração e Alinhamento Estratégico" (E1), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente
Existência de investimentos sustentáveis em tecnologia da informação (CRE1)					
Nível de decisão e eficácia estratégica (CRE2)					

19. Diante do constructo "Empoderamento dos Funcionários + Compartilhamento de Conhecimento + Comunicação Eficaz" (E2), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente
Existência de práticas/formação para o desenvolvimento de atitudes em relação à importância da implementação sustentável das tecnologias da Indústria 4.0 (CEC1)					
Programa para o desenvolvimento de habilidades específicas e especialistas (CEC2)					

20. Diante do constructo "Processo interno de inovação" (E3), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente
Liderança transformacional para inovação organizacional (PII1)					
Aumento da adoção de capacidades de manufatura digital (PII2)					

21. Diante do constructo "Soluções centradas em dados + Fluxo de dados consistente" (E4), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente
Investimentos consistentes em soluções centradas e integradas de informação (SCF1)					

Fluxo de dados que garanta usabilidade (SCF2)

22. Diante do constructo "Integração Interdisciplinar e Holística + Pensamento de Ciclo de Vida e Processos Circulares" (E5), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente
Integração estratégica das operações e processos (IIHP1)					
Uso de sistemas de monitoramento dinâmico (IIHP2)					

23. Diante do constructo "Integração de Cliente e Fornecedor" (E6), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente
Implementar comunicação eficaz na cadeia de suprimentos (ICP1)					
Melhorar a satisfação do cliente (ICP2)					

24. Diante do constructo "Pressões Governamentais e Institucionais" (E7), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente
Autorização, inspeção e regulação das operações (PGI1)					
Comprometimento da gestão e estrutura organizacional na responsividade da gestão às pressões externas (PGI2)					

25. Diante do constructo "Valorização de Centros de P&D/Pesquisa" (E8), como você classifica seu grau de discordância ou concordância em relação ao impacto dos indicadores:

	Discordar Fortemente	Discordar	Neutro	Concordar	Concordar Fortemente

Ações/programas para melhoria da qualidade e/ou inovação em produtos/serviços em conjunto com os centros de P&D (VI1)

Responsividade na troca tecnológica (VI2)

Parte 5 de 7 - Pesquisa: INTEGRAÇÃO da I4.0 aos mecanismos de pessoas, processos e tecnologia (PPT) e à sustentabilidade da TBL nas cadeias de suprimentos de MPMEs

Por favor, defina e expresse sua avaliação de concordância ou discordância com a seguinte

INTEGRAÇÃO da I4.0 nas cadeias de suprimentos (CSs) de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs), para:

5.1) Mecanismos de PPT;

5.2) sustentabilidade da tríple linha de base (TBL), de acordo com cada escala proposta.

5.1 - INTEGRAÇÃO DA I4.0 AOS MECANISMOS PPT

ESCALA: 1 - Nenhum ou Muito leve / 2 - Leve / 3 - Moderado / 4 - Forte / 5 - Muito forte

26. Diante do constructo "Falta de Conhecimento Técnico" (B1), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					
Processo (organizacional)					
Tecnologia					

27. Diante do constructo "Questões de Segurança Cibernética" (B2), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					
Processo (organizacional)					
Tecnologia					

28. Diante do constructo "Resistência à Mudança, Práticas de Gestão da Mudança e Adoção de Inovação" (B3), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					
Processo (organizacional)					
Tecnologia					

29. Diante do constructo "Falta de Investimento em P&D" (B4), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					
Processo (organizacional)					
Tecnologia					

30. Diante do constructo "Custos de Atualização e Condição Econômica da Gestão da Cadeia de Suprimentos (OSCM)" (B5), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					
Processo (organizacional)					
Tecnologia					

31. Diante do constructo "Falta de Apoio da Autoridade Reguladora, Legislação Fraca" (B6), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					
Processo (organizacional)					
Tecnologia					

32. Diante do constructo "Falta de Comprometimento da Alta Administração" (B7), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					

Processo (organizacional)

Tecnologia

33. Diante do constructo "Recursos Alternativos e Necessidades Energéticas" (B8), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					
Processo (organizacional)					
Tecnologia					

34. Diante do constructo "Comprometimento da Alta Administração e Alinhamento Estratégico" (E1), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					
Processo (organizacional)					
Tecnologia					

35. Diante do constructo "Empoderamento dos Funcionários + Compartilhamento de Conhecimento + Comunicação Eficaz" (E2), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					
Processo (organizacional)					
Tecnologia					

36. Diante do constructo "Processo de Inovação Interna" (E3), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					
Processo (organizacional)					
Tecnologia					

37. Diante do constructo "Soluções Centradas em Dados + Fluxo de Dados Consistente" (E4), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					
Processo (organizacional)					
Tecnologia					

38. Diante do constructo "Integração Interdisciplinar e Holística + Pensamento de Ciclo de Vida e Processos Circulares" (E5), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					
Processo (organizacional)					
Tecnologia					

39. Diante do constructo "Integração de Cliente e Fornecedor" (E6), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					
Processo (organizacional)					
Tecnologia					

40. Diante do constructo "Pressões Governamentais e Institucionais" (E7), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					
Processo (organizacional)					
Tecnologia					

41. Diante do constructo "Valorização de Centros de P&D/Pesquisa" (E8), como você avalia o grau de impacto nos seguintes fatores da Indústria 4.0 para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Pessoas (cultura e liderança, habilidades interpessoais...)					

Processo (organizacional)

Tecnologia

5.2 - INTEGRAÇÃO DA I4.0 ÀS DIMENSÕES SUSTENTÁVEIS DA TBL

ESCALA: 1 - Nenhum ou Muito leve / 2 - Leve / 3 - Moderado / 4 - Forte / 5 - Muito forte

42. Diante do constructo "Falta de Conhecimento Técnico" (B1), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					
Social (segurança, saúde, emprego...)					

43. Diante do constructo "Questões de Segurança Cibernética" (B2), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					
Social (segurança, saúde, emprego...)					

44. Diante do constructo "Resistência à Mudança, Práticas de Gestão da Mudança e Adoção de Inovação" (B3), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					
Social (segurança, saúde, emprego...)					

45. Diante do constructo "Falta de Investimento em P&D" (B4), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					

Social (segurança, saúde,
emprego...)

46. Diante do constructo "Custos de Atualização e Condição Econômica da Gestão da Cadeia de Suprimentos (OSCM)" (B5), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					
Social (segurança, saúde, emprego...)					

47. Diante do constructo "Falta de Apoio da Autoridade Reguladora, Legislação Fraca" (B6), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					
Social (segurança, saúde, emprego...)					

48. Diante do constructo "Falta de Comprometimento da Alta Administração" (B7), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					
Social (segurança, saúde, emprego...)					

49. Diante do constructo "Recursos Alternativos e Necessidades Energéticas" (B8), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					
Social (segurança, saúde, emprego...)					

50. Diante do constructo "Comprometimento da Alta Administração e Alinhamento Estratégico" (E1), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					
Social (segurança, saúde, emprego...)					

51. Diante do constructo "Empoderamento dos Funcionários + Compartilhamento de Conhecimento + Comunicação Eficaz" (E2), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					
Social (segurança, saúde, emprego...)					

52. Diante do constructo "Processo de Inovação Interna" (E3), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					
Social (segurança, saúde, emprego...)					

53. Diante do constructo "Soluções Centradas em Dados + Fluxo de Dados Consistente" (E4), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					
Social (segurança, saúde, emprego...)					

54. Diante do constructo "Integração Interdisciplinar e Holística + Pensamento de Ciclo de Vida e Processos Circulares" (E5), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
--	----------------------------	------	----------	-------	-------------



Econômica		
Ambiental		
Social (segurança, saúde, emprego...)		

55. Diante do constructo "Integração de Cliente e Fornecedor" (E6), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					
Social (segurança, saúde, emprego...)					

56. Diante do constructo "Pressões Governamentais e Institucionais" (E7), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					
Social (segurança, saúde, emprego...)					

57. Diante do constructo "Valorização de Centros de P&D/Pesquisa" (E8), como você avalia o grau de impacto nas seguintes dimensões de sustentabilidade para integração nas operações e gestão da cadeia de suprimentos:

	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte
Econômica					
Ambiental					
Social (segurança, saúde, emprego...)					

Parte 6 de 7 - MATURIDADE DA I4.0 EM RELAÇÃO AOS MECANISMOS PPT E À PERSPECTIVA DA TBL

6.1 - Diante da "Integração Sustentável de Tecnologias da Indústria 4.0 nas Cadeias de Suprimentos (CSs) de Micro, Pequenas e Médias Empresas (MPMEs)", como você classifica o nível de maturidade na integração da Indústria 4.0 nas cadeias de suprimentos (CSs) de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs) em relação ao papel de PESSOAS, PROCESSOS e TECNOLOGIA:

Inexistente (Processos de comunicação manual entre os atores)	Conceitual (Cooperação digital dentro de equipes isoladas)	Gerenciado (Cooperação digital entre funções e atores intracompanhia, mas ainda reativa)	Avançado (Atores levam a cooperação digital para o nível de processo e há um estímulo pró-ativo para compartilhamento)	Auto- otimizado (Cultura colaborativa digital profundamente enraizada em toda a empresa)
--	---	--	---	--

PESSOAS

PROCESSOS

TECNOLOGIA

6.2 - Diante da “Integração da integração sustentável das tecnologias da Indústria 4.0 nas CSs das MPMEs”, como você classifica a integração das dimensões da sustentabilidade nas cadeias de suprimentos (CSs) das micro, pequenas e médias empresas (MPMEs)?:

Nenhuma integração	Pouco integrado	Moderadamente integrado	Muito integrado	Completamente integrado
-----------------------	--------------------	----------------------------	--------------------	----------------------------

PILAR/DIMENSÃO DE
SUSTENTABILIDADE
ECONÔMICA
dentro das Cadeias de
Suprimentos (CSs) das
MPMEs

PILAR/DIMENSÃO DE
SUSTENTABILIDADE
AMBIENTAL
dentro das Cadeias de
Suprimentos (CSs) das
MPMEs

PILAR/DIMENSÃO DE
SUSTENTABILIDADE
SOCIAL
dentro das Cadeias de
Suprimentos (CSs) das
MPMEs

Parte 7 de 7 - Perguntas gerais com visão de longo prazo

Nota: três perguntas abertas

58. Na sua perspectiva, você considera que a integração de tecnologias da Indústria 4.0 de forma sustentável nas cadeias de suprimentos (CSs) de micro, pequenas e médias empresas (MPMEs) será fundamental para a perenidade da organização? Se sim, por favor, especifique COMO e POR QUÊ.

59. Se desejar, por favor, indique até 3 (três) benefícios que as Micro, Pequenas e Médias Empresas (MPMEs) terão ao adotar tecnologias da Indústria 4.0 de forma sustentável na gestão de operações e cadeia de suprimentos? Justifique cada benefício indicado.

60. Se desejar, por favor, indique até 3 (três) práticas que as Micro, Pequenas e Médias Empresas (MPMEs) podem adotar ao aplicar tecnologias da Indústria 4.0 de forma sustentável na gestão de operações e cadeia de suprimentos? Justifique cada prática indicada.

Apêndice D – Notas dos especialistas

[Adaptado de Machado et al. (2021)]

Tabela D1 – Notas dos especialistas para barreiras.

	ESP1	ESP2	ESP3	ESP4	ESP5	ESP6	ESP7	ESP8	ESP9	ESP10	ESP11	ESP12	ESP13	ESP14	ESP15	ESP16	ESP17	ESP18	ESP19	ESP20	ESP21	ESP22	ESP23	ESP24	ESP25
B1	8	7	9	5	6	8	8	8	7	0	8	8	9	7	8	5	9	7	9	7	8	4	9	9	7
B2	4	7	9	4	5	8	8	8	7	5	8	5	5	5	5	8	4	5	5	5	5	4	4	4	8
B3	3	5	4	0	5	6	8	8	7	3	6	5	8	7	6	7	3	7	4	5	5	5	5	4	6
B4	6	5	6	7	5	7	8	7	7	7	4	7	5	6	8	7	2	5	4	3	4	2	4	3	4
B5	4	5	4	2	5	3	4	5	6	4	6	6	4	4	3	5	2	0	4	3	4	4	3		4
B6	4	4	1	4	6	2	8	4	6	4	5	8	7	8	6	7	4	5	8	4	8	3	5	7	
B7	6	6	4	3	6	7	8	6	7	4	7	5	5	6	6	7	2	7	7	6	4	6	6	4	
B8	3	4	3	0	5	3	5	6	4	4	5	5	6	8	6	4	4	5	4	4	6	4	4	2	
B9	4	0	2		3	5	4	5	5	4	0	5	2	6	7	4	7	4	4	5	5	4	4	4	
B10	4	6	2	6	6	4	5	4	5	6	5	6	4	8	7		5	5	3	4	8	5	5	4	
B11	5	6	7	7	6	7	5	5	6	6	5	6	8	7	6	7	2	7	6	5	5	4	5	5	
B12	4	4	7	3	7	3	5	5	7	3	6	9	6	3	6	7	4	0	3	3	5	3	6	4	
B13	3	5	4	4	5	4	4	4	0	4	2	4	4	2	7	0	6	0	4	4	4	5	5	3	
BE14	5	5	5	5	6	6	7	5	7	0	5	5	8	6	5	6	5	3	5	7	4	5	5	3	
BE15	7	4	6	6	5	7	5	4	4	4	6	6	4	4	8	6	7	6	5	3	4	5	3	5	
BE16	5	4	7	7	7	4	8	8	8	5	6	6	4	7	5	6	5	9	9	8	5	6	5	9	

Tabela D2 – Notas dos especialistas para facilitadores.

	ESP1	ESP2	ESP3	ESP4	ESP5	ESP6	ESP7	ESP8	ESP9	ESP10	ESP11	ESP12	ESP13	ESP14	ESP15	ESP16	ESP17	ESP18	ESP19	ESP20	ESP21	ESP22	ESP23	ESP24	ESP25
F1	6	7	7	7	7	7	6	6	7	7	6	6	5	6	6	7	6	7	7	6	4	7	6	6	4
F2	6	5	7	7	7	4	6	5	5	5	5	6	5	4	7	7	7	7	5	6	5	6	4	5	4
F3	5	6	3	5	7	7	6	7	5	5	5	6	5	5	7	7	3	7	6	6	4	5	5	6	4
F4	4	5	7	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	6	7	6	6	6	5	4	6	6	6	5
F5	6	5	7	6	7	6	5	6	7	5	5	6	6	3	6	7	6	6	5	4	4	7	4	5	5
F6	4	6	7	7	7	6	6	6	7	4	5	6	5	6	6	7	7	5	7	7	4	6	5	6	4
F7	4	5	2	4	7	4	6	4	5	3	4	5	4	6	6	6	6	5	4	6	4	6	5	4	4
F8	6	4	3	6	6	4	5	5	7	4	7	6	7	7	6	7	6	5	6	5	4	7	4	4	4
F9	6	6	6	3	6	3	6	6	6	6	6	6	5	3	7	6	7	7	4	6	4	6	4	6	4
F10	5	7	6	6	7	6	5	5	7	4	6	6	5	7	7	7	5	7	6	5	4	7	4	5	4
F11	5	4	5	5	7	6	4	4	7	4	4	6	5	5	6	6	6	1	5	4	4	4	5	4	5
F12	7	7	6	6	7	7	6	6	6	7	7	7	7	6	6	7	7	6	7	6	4	7	6	5	5
F13	6	6	5	7	6	4	5	5	6	5	5	6	5	7	7	7	5	6	5	5	4	5	5	5	4
F14	6	6	6	7	7	4	6	6	6	3	6	6	6	7	7	7	4	5	6	6	4	6	6	5	5
F15	6	7	6	6	7	4	5	6	7	4	7	6	4	5	6	7	4	6	5	6	5	5	5	5	3
F16	6	5	5	6	7	4	6	6	7	6	6	7	6	5	7	7	5	6	6	6	3	5	5	5	4
F17	4	6	3	6	7	5	6	5	7	3	5	6	5	2	7	6	5	5	5	3	5	4	4	4	5
F18	5	6	6	7	6	3	6	6	7	6	7	7	4	6	7	7	5	5	6	7	4	6	6	7	5
F19	5	4	4	4	6	6	5	4	5	4	3	7	4	2	6	7	4	5	5	5	5	4	5	5	3
F20	5	2	1	6	7	4	6	5	6	4	3	6	4	2	6	6	4	6	4	6	4	7	6	6	4
F21	5	5	3	5	7	7	6	6	7	6	6	6	6	5	7	6	5	5	5	5	4	6	4	6	3
F22	4	3	5	4	6	4	5	5	7	4	4	6	4	2	6	6	6	5	4	3	4	5	4	5	4
F23	5	6	6	5	6	7	6	6	6	3	6	6	6	2	6	6	3	5	6	6	5	4	4	4	4
F24	6	6	7	5	7	3	6	6	6	7	6	6	6	6	7	7	6	6	7	5	4	6	5	6	5
F25	6	7	6	7	7	5	6	7	7	6	6	7	6	4	7	7	7	5	6	6	4	5	6	6	4
F26	5	4	6	4	6	6	6	6	7	3	4	7	4	6	7	6	3	5	6	4	4	3	6	4	5
F27	6	6	7	6	7	6	6	7	7	6	6	7	6	7	7	7	6	6	7	6	5	7	6	5	5
F28	6	6	5	7	7	5	6	6	7	5	6	5	5	4	6	7	4	6	5	4	4	5	4	6	4
F29	6	4	4	6	7	7	6	6	6	5	4	6	4	6	7	7	6	7	7	4	3	7	3	6	5
F30	5	6	6	6	7	6	5	6	6	5	6	5	6	6	7	7	6	5	6	4	7	4	5	4	4
F31	6	7	7	7	7	7	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	6	7	7	4	7	6	7	5
FE32	5	3	7	4	5	6	5	7	6	5	1	5	3	5	7	6	5	7	4	4	5	6	5	4	4
FE33	5	3	7	5	7	3	6	6	6	6	6	6	4	7	6	6	4	5	4	5	5	7	6	6	4

Apêndice E – Níveis de impacto para PPT e TBL

Tabela E1. Níveis de Impacto das Barreiras (PPT).

INTEGRAÇÃO I4.0 PARA PPT	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte	AMOSTRA TOTAL
B1 Pessoas	1	1	5	7	20	22
B1 Processos	0	4	6	30	15	55
B1 Tecnologia	1	2	8	21	23	55
B2 Pessoas	0	4	12	19	20	55
B2 Processos	2	1	8	30	14	55
B2 Tecnologia	0	4	5	19	27	55
B3 Pessoas	0	1	4	23	27	55
B3 Processos	0	3	11	31	10	55
B3 Tecnologia	0	3	11	23	18	55
B4 Pessoas	1	5	10	25	14	55
B4 Processos	2	1	6	24	22	55
B4 Tecnologia	1	5	13	19	17	55
B5 Pessoas	0	6	14	22	13	55
B5 Processos	1	6	14	24	10	55
B5 Tecnologia	1	5	14	20	15	55
B6 Pessoas	5	6	15	21	9	55
B6 Processos	1	4	16	23	9	55
B6 Tecnologia	2	3	14	27	9	55
B7 Pessoas	3	4	15	25	8	55
B7 Processos	0	3	11	29	12	55
B7 Tecnologia	0	2	7	29	17	55
B8 Pessoas	2	5	17	23	8	55
B8 Processos	4	5	13	23	10	55
B8 Tecnologia	0	3	10	23	16	55

Tabela E2. Níveis de Impacto dos Facilitadores (PPT).

INTEGRAÇÃO I4.0 PARA PPT	Nenhum ou muito leve	Leve	Moderado	Forte	Muito forte	AMOSTRA TOTAL
F1 Pessoas	0	4	8	23	20	55
F1 Processos	1	2	8	25	19	55
F1 Tecnologia	1	1	16	25	12	55
F2 Pessoas	2	1	8	32	12	55
F2 Processos	2	1	4	32	16	55
F2 Tecnologia	3	3	14	22	14	55
F3 Pessoas	2	3	12	22	16	55
F3 Processos	2	3	6	24	20	55
F3 Tecnologia	3	4	17	20	11	55
F4 Pessoas	3	5	18	16	13	55
F4 Processos	1	4	15	20	15	55
F4 Tecnologia	2	8	16	27	2	55
F5 Pessoas	0	1	11	20	23	55
F5 Processos	3	3	11	22	16	55
F5 Tecnologia	1	1	22	16	15	55
F6 Pessoas	1	4	16	17	18	55
F6 Processos	1	3	12	22	17	55
F6 Tecnologia	1	4	9	23	18	55
F7 Pessoas	2	1	7	17	16	55
F7 Processos	0	7	17	16	15	55
F7 Tecnologia	1	7	14	16	17	55
F8 Pessoas	2	3	19	18	13	55
F8 Processos	4	3	19	18	11	55
F8 Tecnologia	1	4	8	27	15	55

Tabela E3. Níveis de Impacto das Barreiras (TBL).

INTEGRAÇÃO I4.0 COM TBL	Nenhuma ou muito leve	Leve	Moderada	Forte	Muito forte	AMOSTRA TOTAL
B1 Econômico	0	3	7	25	20	55
B1 Ambiental	0	5	13	27	10	55
B1 Social	0	4	16	23	12	55
B2 Econômico	0	4	8	16	27	55
B2 Ambiental	3	5	22	16	9	55
B2 Social	0	5	21	19	10	55
B3 Econômico	0	3	14	24	14	55
B3 Ambiental	1	2	18	24	10	55
B3 Social	0	2	18	23	12	55
B4 Econômico	0	6	15	16	18	55
B4 Ambiental	3	5	16	23	8	55
B4 Social	0	8	19	19	9	55
B5 Econômico	0	4	6	25	20	55
B5 Ambiental	0	3	19	22	11	55
B5 Social	0	3	18	24	10	55
B6 Econômico	2	2	22	18	11	55
B6 Ambiental	0	3	8	16	28	55
B6 Social	3	8	15	16	13	55
B7 Econômico	0	2	12	26	15	55
B7 Ambiental	0	3	18	24	10	55
B7 Social	0	3	20	23	9	55
B8 Econômico	0	2	17	18	18	55
B8 Ambiental	0	3	18	24	10	55
B8 Social	0	8	19	21	7	55

Tabela E4. Níveis de Impacto dos Facilitadores (TBL).

INTEGRAÇÃO I4.0 COM TBL	Nenhuma ou muito leve	Leve	Moderada	Forte	Muito forte	AMOSTRA TOTAL
F1 Econômico	0	4	12	22	17	55
F1 Ambiental	1	6	13	22	13	55
F1 Social	2	3	14	28	8	55
F2 Econômico	0	5	21	22	7	55
F2 Ambiental	1	6	19	20	9	55
F2 Social	0	5	18	23	9	55
F3 Econômico	0	3	16	20	15	55
F3 Ambiental	0	5	16	24	10	55
F3 Social	1	5	16	20	13	55
F4 Econômico	0	7	16	24	8	55
F4 Ambiental	1	5	20	16	13	55
F4 Social	2	5	20	15	13	55
F5 Econômico	0	4	12	21	18	55
F5 Ambiental	1	7	12	17	18	55
F5 Social	1	5	16	20	13	55
F6 Econômico	0	4	8	20	23	55
F6 Ambiental	0	7	19	17	12	55
F6 Social	0	9	17	20	7	55
F7 Econômico	0	3	14	17	21	55
F7 Ambiental	0	7	12	14	22	55
F7 Social	0	3	15	17	20	55
F8 Econômico	0	4	13	22	16	55
F8 Ambiental	0	3	14	26	12	55
F8 Social	2	6	23	18	6	55

APÊNDICE F – Questionário do múltiplo estudo de caso

PARTE 1 - FORMULÁRIO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Você está sendo convidado a se voluntariar para uma entrevista pessoal. Este documento, denominado Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), destina-se a garantir seus direitos como participante. Por favor, leia com atenção e calma, aproveitando para esclarecer suas dúvidas. Se houver dúvidas durante a pesquisa, você pode esclarecê-las com o pesquisador durante a entrevista. Não haverá danos se você não aceitar participar ou retirar sua autorização a qualquer momento. As informações ou nomes pessoais da sua empresa não serão expostos. Em troca, se desejar, você receberá o artigo produzido quando publicado.

Contexto de pesquisa:

O presente método de pesquisa baseia-se em um estudo de casos múltiplos (MEC) com seis micro, pequenas e médias empresas (MPMEs) brasileiras, realizado por meio de entrevistas individuais com cada representante/responsável por cada empresa. Pode haver mais de um entrevistado por empresa, de acordo com a avaliação do entrevistador, dependendo da realidade encontrada em cada caso.

O objetivo principal desta pesquisa:

O principal objetivo desta pesquisa é oferecer orientação para apoiar MPMEs e MEs na jornada para integrar a sustentabilidade e a Indústria 4.0 (S-I4.0) nas cadeias de suprimentos. Esta pesquisa se baseia em Machado et al. (2021; 2024), que realizaram uma primeira tentativa nessa direção, propondo um novo Framework S-I4.0 com variações específicas para MPMEs e MEs. No entanto, ainda não foi aplicado em ambientes reais, e não há insights sobre como seu uso pode servir como orientação prática para MPMEs, apoiando essas organizações em sua jornada S-I4.0. Além disso, no âmbito das MPMEs, há literatura carente do uso de teoria e modelos de adoção de tecnologia (Loo et al., 2023).

Conduzindo a entrevista:

- Coletar informações sobre a empresa (dados gerais, histórico, posição na cadeia de suprimentos, processos fundamentais, tecnologias mais relevantes, forma de trabalho dos profissionais/colaboradores, relacionamento com os principais fornecedores, parceiros/aliados, clientes, entre outros).
- Apresentar barreiras, facilitadores e seus respectivos indicadores para a integração do S-I4.0 nas cadeias produtivas das MPMEs, verificando a concordância do entrevistado.
- Apresentar relações de causa, efeito e influência das barreiras e facilitadores apresentados no Framework, verificando com o entrevistado sua concordância e adesão à empresa.
- Por fim, apresentar o Framework para cada MPME (MPE ou ME, dependendo do porte da empresa que está sendo entrevistada), verificando

com o entrevistado sua concordância e aderência relacionada à aplicabilidade do Framework na empresa.

Observações:

- Em todas as etapas da entrevista, consolidar as respostas fornecidas pelo(s) entrevistado(s), registrando-as por meio de um relatório individualizado para cada uma das MPMEs pesquisadas.
- Registre considerações adicionais quando relevantes para a análise do entrevistador.
- Solicitar à empresa que disponibilize documentos (modelos, propostas, procedimentos, formulários, ...) apresentados durante a entrevista ou complementares a ela em diretório virtual, proporcionando acesso ao entrevistador pelo prazo de 150 (cento e cinquenta) dias.
- O nome da empresa e respectivo(s) entrevistado(s) não serão utilizados na publicação da pesquisa. Os dados recolhidos serão publicados de forma a não abordar diretamente a empresa, evitando assim a respectiva associação.

GLOSSÁRIO:

Barreira: Força resistente que dificulta a realização de atividades.

Facilitador: Também caracterizado como um impulsionador, promotor ou fator crítico de sucesso. Os fatores críticos de sucesso podem ser entendidos como ações organizacionais necessárias para garantir o sucesso e a competitividade, apoiando os processos de mudança organizacional de uma empresa.

Indústria 4.0 (I4.0): Tendência de digitalização e automação do ambiente fabril, a confluência de tecnologias de várias tecnologias digitais, nova etapa ou paradigma de produção industrial, com foco nos resultados do processo de transformação digital. O objetivo é vincular tecnologias disruptivas a sistemas de manufatura, combinando operações inteligentes e gerenciamento da cadeia de suprimentos (OSCM).

Exemplos de tecnologias i4.0: IoT (Internet das Coisas); CPS (Sistemas Ciberfísicos); BDA (Análise de Big Data); Cibersegurança; Computação em nuvem; AM (Manufatura Aditiva)/3DP (Impressão 3D), AR (Realidade Aumentada)/VR (Realidade Virtual); Robótica Avançada; Cadeia de blocos.

Sustentabilidade: Conceito relacionado à capacidade de satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades. Tem como objetivo garantir o bem-estar das gerações futuras através do equilíbrio entre as dimensões econômica, ambiental e social através do conceito de triple bottom line (TBL/3BL, também conhecido como pessoas, lucro, planeta). O conceito de sustentabilidade promove uma visão holística e responsável do papel das organizações na sociedade. No mundo real, engloba a adoção de práticas e tecnologias que visam minimizar o impacto negativo das atividades humanas no meio ambiente e na sociedade, garantindo a viabilidade econômica de longo prazo.

Nota 1: Fonte de barreiras e facilitadores apresentados para entrevista: Machado, E.; Scavarda, L.F.; Caiado, R.G.G.; Thomé, A.M.T. (2021). *Barriers and Enablers for the Integration of Industry 4.0 and Sustainability in Supply Chains of MSMEs*. Sustainability, 13, 11664. <https://doi.org/10.3390/su132111664>

Nota 2: Fonte do Framework apresentado para entrevista: Adaptado de Machado, E.A.; Scavarda, L.F.; Caiado, R.G.G.; Santos, R.S. (2024). *Industry 4.0 and Sustainability Integration in the Supply Chains of Micro, Small, and Medium Enterprises through People, Process, and Technology within the Triple Bottom Line Perspective*. Sustainability, 16, 1141. <https://doi.org/10.3390/su16031141>

Nota 3: Falta de uso da teoria e modelos de adoção de tecnologia: Loo, M.K., Ramachandran, S., Raja Yusof, R.N. (2023). *Unleashing the potential: Enhancing technology adoption and innovation for micro, small and medium-sized enterprises (MSMEs)*. *Cogent Economics & Finance*, 11(2). DOI:10.1080/23322039.2023.2267748

Rio de Janeiro, Dia/Mês/Ano.

NOME

EMPRESA (FUNÇÃO)

Parte 2 - PERGUNTAS

Começa com uma apresentação da pesquisa, seu escopo e o motivo da entrevista.

0 - Apresente-se brevemente e sua função e forneça uma visão geral do seu trabalho.

1 - Conte-nos brevemente sobre a empresa. (Nome, breve histórico, mercado em que atua, principais produtos/serviços, posição na cadeia de suprimentos, etc.)

2 - Quais são os processos fundamentais para a sua empresa? Como aplicá-los? (procedimentos? guilões? tarefas diárias realizadas pelos responsáveis?) Exemplos: aulas presenciais, remotas e híbridas; atendimento ao cliente; Certificações; venda; acompanhamento operacional de clientes; controles financeiros; gerenciamento de história, etc.

3 - Quais tecnologias a empresa utiliza? Quais são os mais importantes?

4 - Os profissionais trabalham internamente, externamente ou de forma híbrida?

5 - Em linhas gerais: Como é a relação com os principais fornecedores da empresa? E parceiros/aliados? E os clientes? Algum relacionamento com outro grupo de interesse é relevante para a empresa que você deseja mencionar?

6 - São relevantes as barreiras apresentadas para integrar o S-I4.0 nas cadeias de suprimentos em que sua empresa está inserida?

7 - São relevantes os facilitadores apresentados para integrar o S-I4.0 nas cadeias de suprimentos em que sua empresa está inserida?

8 - Para cada barreira e facilitador, são apresentados dois indicadores, você entende a relevância desses indicadores? Vale a pena afirmar que a construção desses indicadores com posterior acompanhamento será útil para você?

9 - As relações de causa, efeito e influência para as barreiras e facilitadores apresentados no Framework parecem apropriadas?

10 - Com base no Framework apresentado, você o vê como aplicável à sua empresa? Por quê?

11- Há algum aspecto importante que não foi incluído ou abordado minuciosamente na entrevista que deve ser considerado?

Para quaisquer tópicos ou pontos adicionais não planejados inicialmente, você poderia elaborar mais, fornecer mais detalhes ou oferecer mais exemplos?