

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
SISTEMAS
NÍVEL DOUTORADO**

LEANDRO ZVIRTES

**SISTEMÁTICA DE PLANEJAMENTO PARA A ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS NO
CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0**

São Leopoldo

2022

LEANDRO ZVIRTES

**SISTEMÁTICA DE PLANEJAMENTO PARA A ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS NO
CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Orientador(a): Prof. Dr. Giancarlo Medeiros Pereira

São Leopoldo
2022

Z96s Zvirtes, Leandro.
Sistemática de planejamento para a adoção de tecnologias no contexto da indústria 4.0 / por Leandro Zvirtes. – 2022.
75 f. : il. ; 30 cm.

Tese (doutorado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, São Leopoldo, RS, 2022.
“Orientador: Dr. Giancarlo Medeiros Pereira”.

1. Planejamento. 2. Adoção de tecnologias.
3. Indústria 4.0. 4. Tomada de decisão.
5. Barreiras. 6. Mitigadores. I. Título.

CDU: 658.5:004

LEANDRO ZVIRTES

**SISTEMÁTICA DE PLANEJAMENTO PARA A ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS NO
CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS).

Aprovado em (dia) (mês) (ano)

BANCA EXAMINADORA

Dr. Giancarlo Medeiros Pereira – UNISINOS

Dr. Gabriel Sperandio Milan – UNISINOS

Dr. Mirian Borchardt – UNISINOS

Dr. André Bittencourt Leal – UDESC

Dr. Marcos Aurélio Araújo Santos – FACIMP

Dr. Luiz Reni Trento – CONSULTOR

Dedico esta Tese à minha esposa Maria Simone e aos meus filhos Francisco e Pedro. A eles por todo o incentivo e apoio incondicional, por sua compreensão e paciência comigo durante a realização desta jornada e por me inspirar a superar todos os obstáculos encontrados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial:

Aos meus pais Roque (*in memorian*) e Adelaide e minha irmãs Leila (*in memorian*) e Leda, por todo esforço e incentivo ao longo da minha vida acadêmica, o que me permitiu alcançar a conclusão deste sonho.

Ao meu Orientador e amigo Prof. Dr. Giancarlo Medeiros Pereira, por toda sua atenção e dedicação na orientação do doutoramento e na condução do trabalho. Sem dúvida um profissional ímpar, como pesquisador e orientador, mas também um ser humano incrível e diferenciado.

Aos colegas de doutoramento, Luiz Reni Trento e Michele de Souza, pelo seu apoio e companheirismo durante a realização desta Tese.

À Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, por me conceder o afastamento para que eu pudesse cursar e desenvolver os estudos de doutoramento.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas da Unisinos – PPGEPS, em especial aos professores que participaram da Banca de Qualificação, Mirian Borchardt e Gabriel Sperandio Milan e ao professor André Bittencourt Leal da UDESC, que contribuíram significativamente para o aprimoramento deste trabalho.

“Se você não mudar a direção, terminará exatamente onde começou”
Antigo Provérbio Chinês

RESUMO

A adoção de soluções da Indústria 4.0 tem sido amplamente estudada na indústria e no meio acadêmico. No entanto, pouco se sabe sobre estratégias para melhorar a conexão entre planejamento e implementação de forma a mitigar os riscos associados à adoção dessas novas tecnologias. Esta Tese concentrou sua investigação no processo de planejamento para adoção da indústria 4.0 e tem como objetivo principal propor uma sistemática para a adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0. Uma pesquisa qualitativa exploratória foi conduzida por meio de coleta de dados junto a profissionais que estão diretamente envolvidos no processo de adoção ou gestão de tecnologias no contexto da Indústria 4.0 e atuam em empresas de manufaturas que adotam ou utilizam as tecnologias em uma país emergente (Brasil). As descobertas da pesquisa proporcionaram o desenvolvimento de uma sistemática de sete etapas para aprimorar o planejamento para adoção das tecnologias no contexto da indústria 4.0 e que pode contribuir para melhorar a tomada de decisão das empresas a nível tático e estratégico na adoção dessas tecnologias, proporcionando a racionalização de recursos e investimentos. Essas etapas começam com o aprimoramento do conhecimento interno e com a seleção de problemas que as tecnologias da Indústria 4.0 poderiam resolver, continua com a definição da maturidade desejada e a elaboração do plano piloto. Em seguida, o alinhamento do plano piloto com a estratégia da empresa, implementação e avaliação. A sistemática proposta é nova na literatura existente. Além da sistemática com o sequenciamento de etapas, são apresentadas ainda um conjunto de proposições que além de contribuir para tornar mais assertiva a tomada de decisão por parte das empresas que estão em processo de adoção ou utilizam tecnologias no contexto da Indústria 4.0, podem ainda originar novas pesquisas e estudos futuros. Esta Tese também contribui com os profissionais do setor ao servir como roteiro para implementação das iniciativas da indústria 4.0, oportunizando uma melhor compreensão das dificuldades impostas pelas barreiras e tornando mais assertiva a escolha das ações mitigadoras.

Palavras-chave: planejamento; adoção de tecnologias, indústria 4.0; tomada de decisão, barreiras; mitigadores.

ABSTRACT

The adoption of Industry 4.0 solutions has been widely studied in industry and academia. However, little is known about strategies to improve the connection between planning and implementation in order to mitigate the risks associated with the adoption of these new technologies. This Thesis focused its investigation on the planning process for the adoption of Industry 4.0 and its main objective is to propose a systematic for the adoption of technologies in the context of Industry 4.0. An exploratory qualitative research was conducted by collecting data from professionals who are directly involved in the process of adopting or managing technologies in the context of Industry 4.0 and working in manufacturing companies that adopt or use technologies in an emerging country (Brazil). The research findings provided the development of a seven-step systematic to improve the planning for the adoption of technologies in the context of industry 4.0 and that can contribute to improve the decision-making of companies at a tactical and strategic level in the adoption of these technologies, providing the rationalization of resources and investments. These steps start with the improvement of internal knowledge and with the selection of problems that Industry 4.0 technologies could solve, continue with the definition of the desired maturity and the elaboration of the pilot plan. Then, the alignment of the pilot plan with the company's strategy, implementation and evaluation. The proposed system is new in the existing literature. In addition to the systematic with the sequencing of steps, a set of propositions are also presented that, in addition to contributing to make decision-making more assertive by companies that are in the process of adopting or using technologies in the context of Industry 4.0, can also lead to new research and future studies. This Thesis also contributes to professionals in the sector by serving as a roadmap for the implementation of industry 4.0 initiatives, providing a better understanding of the difficulties imposed by barriers and making the choice of mitigating actions more assertive.

Key-words: planning; technology adoption, industry 4.0; decision-making, barriers; mitigators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo Tentativo de Pesquisa	40
Figura 2 - Codificação dos resultados	42
Figura 3 – Sistemática de Planejamento para Adoção de Tecnologias no Contexto da Indústria 4.0.....	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Barreiras à adoção da Indústria 4.0	25
Quadro 2 - Mitigação de Barreiras.	27
Quadro 3 - Perfil das empresas pesquisadas.....	34
Quadro 4 - Perfil dos profissionais das empresas a serem entrevistados.....	35
Quadro 5 - Perguntas propostas na primeira rodada de entrevistas.	36
Quadro 6 - Perguntas propostas na segunda rodada de entrevistas.	36
Quadro 7 - Barreiras à Indústria 4.0 e seus mitigadores.	44

LISTA DE SIGLAS

IOT	<i>Internet of Things</i> – (Internet das Coisas)
PCPM	Planejamento, Controle e Produção de Materiais
RH	Recursos Humanos
ROI	Retorno sobre o Investimento
SKU	<i>Stock Keeping Unit</i> - (Unidade de Armazenamento)
TI	Tecnologia da Informação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	12
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	15
1.3 PROBLEMA	16
1.4 OBJETIVOS	18
1.4.1 Objetivo geral	18
1.4.2 Objetivos específicos	18
1.5 JUSTIFICATIVA	18
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 INDÚSTRIA 4.0	20
2.2 BARREIRAS À ADOÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0.....	22
2.3 MITIGAÇÃO DE BARREIRAS.....	26
2.4 ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 E O CENÁRIO DA COMPLEXIDADE.....	28
3 METODOLOGIA	32
4 PROPOSTA DE SISTEMÁTICA PARA ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0	39
4.1 MITIGAÇÃO DE BARREIRAS.....	41
4.2 COMO E QUANDO APLICAR MITIGADORES	45
4.2.1 Qualificação da equipe	47
4.2.2 Análise do problema	48
4.2.3 Avaliação da maturidade	48
4.2.4 Plano piloto	49
4.2.5 Alinhamento estratégico	50
4.2.6 Implantação do piloto	51
4.2.7 Avaliação do piloto	51
5 DISCUSSÃO	53
5.1 QUALIFICAÇÃO, TRABALHO E RENDA.....	53
5.2 TOMADA DE DECISÃO	55
5.3 O PROCESSO	57
6 CONCLUSÃO	60
6.1 CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS	61

6.2 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS E GERENCIAIS.....	62
6.3 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	63
REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

A adoção de tecnologias da Indústria 4.0 na fabricação permite uma produção flexível, melhora as cadeias de suprimentos e leva a uma gestão empresarial mais eficiente, com impactos tecnológicos, econômicos e sociais significativos (CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; HORVÁTH; SZABÓ, 2019; YANG; FU; ZHANG, 2021). No entanto, a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 nem sempre é bem-sucedida, pois muitas empresas enfrentam situações de ameaças proeminentes ao futuro da manufatura (CORREANI et al., 2020; CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; YANG; FU; ZHANG, 2021). As hostilidades ambientais, como mudanças rápidas nas condições ambientais, ciclos de vida reduzidos dos produtos (RENI et al., 2021) expectativas dos clientes e competição entre organizações/países (OLY et al., 2021) colocam em questão a relação entre investimentos significativos em tecnologias para a transformação digital e a entrega de ganho financeiro (CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021). O fracasso geralmente é causado pela desconexão entre a formulação e a implementação da estratégia (CORREANI et al., 2020; CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; RAJ et al., 2019), o que pode resultar em dúvidas e dificuldades durante a transformação/adoção das tecnologias da Indústria 4.0 (CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; HORVÁTH; SZABÓ, 2019; RAJ et al., 2019; YANG; FU; ZHANG, 2021).

Esta Tese examina o processo de planejamento para a adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0 (com base nas experiências dos praticantes), pois o planejamento e a execução cuidadosos podem reduzir riscos, garantir ganhos financeiros em projetos de digitalização, alavancar a Indústria 4.0 nas organizações e aumentar a competitividade das empresas. Essas tecnologias são vistas como meios promissores para melhorar significativamente as funções da cadeia de suprimentos, como planejamento, compras, produção e logística (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019; YANG; FU; ZHANG, 2021). Conforme previsão do Fórum Econômico Mundial (em parceria com a McKinsey & Company), o impacto monetário esperado da Quarta Revolução Industrial para 2025 pode chegar à US\$ 3,7 trilhões (LEURENT; BOER, 2018). Um bom planejamento também pode impulsionar os investimentos nas tecnologias que dão suporte à Indústria 4.0 (DE

SOUSA JABBOUR et al., 2018; HORVÁTH; SZABÓ, 2019; KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; RAJ et al., 2019). De acordo com uma pesquisa da McKinsey com profissionais de manufatura e cadeia de suprimentos, 93% planejam se concentrar na resiliência de sua cadeia de suprimentos a fim de evitar rupturas no fluxo de bens e operações e 90% planejam investir em talentos para digitalização (AGRAWAL et al., 2020).

A literatura também apresenta alguns desafios para as tecnologias da Indústria 4.0, nomeadamente barreiras econômicas, de recursos humanos, técnicas e de gestão. As barreiras econômicas incluem o alto custo dessas tecnologias (BUER; STRANDHAGEN; CHAN, 2018; KACHE; SEURING, 2017; KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018). As barreiras relacionadas aos recursos humanos incluem deficiências de conhecimento e habilidades (DE SOUSA JABBOUR et al., 2018) ou interrupção de empregos existentes (HADDUD et al., 2017a). As barreiras técnicas incluem dúvidas sobre a informação (BUER; STRANDHAGEN; CHAN, 2018; XU; XU; LI, 2018), a infraestrutura necessária (KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018), a complexidade da implementação (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019) ou nível de maturidade da solução (XU; XU; LI, 2018). As dificuldades na gestão da mudança são problemas de gestão que também podem dificultar a adoção de novas tecnologias (BEATRIZ et al., 2018; HADDUD et al., 2017a; MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018).

No entanto, diferentes ações podem mitigar as barreiras indicadas acima. As barreiras relacionadas aos recursos humanos podem ser mitigadas por meio da capacitação de profissionais (ARDITO et al., 2019; CUNHA et al., 2020; MOEUF et al., 2020), disseminação do conhecimento (TORTORELLA et al., [s.d.]), especialmente para a atenção dos gestores do processo de mudança (DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; HORVÁTH; SZABÓ, 2019). As barreiras de gestão podem ser mitigadas por meio de uma maior compreensão das oportunidades e desafios associados à Indústria 4.0 (CIMINI et al., 2020; CULOT et al., 2020; WEKING et al., 2020). Tal entendimento pode ser obtido revisando os objetivos da organização compradora (HORVÁTH; SZABÓ, 2019; STENTOFT; RAJKUMAR, 2020), melhorando o alinhamento dos diferentes setores internos (GHOBAKHLOO, 2020; ZANGIACOMI et al., 2020), ou focando no cliente e na eficiência (MARTINEZ, 2019).

Apesar de apontar fatores atenuantes para as barreiras, a literatura carece ainda de clareza de como aplicá-los e qual o melhor momento para fazê-lo. Além

disso, o processo de planejamento para a adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0 ainda enfrenta o desafio de superar as dificuldades decorrentes dos interesses conflitantes de compradores e vendedores (CHAKER; ZABLAH; NOBLE, 2018). De fato, tanto os compradores quanto os vendedores estão interessados em maximizar seus ganhos. Por um lado, os vendedores estão interessados em atingir as metas de vendas que lhes são impostas, às vezes por comportamentos oportunistas que podem aumentar significativamente os ganhos do profissional de vendas. No entanto, o desejo de aumentar os rendimentos pode levar os vendedores a oferecer soluções que não são necessárias ao comprador e nem estão de acordo com sua demanda (CHAKER; ZABLAH; NOBLE, 2018). Tal oportunismo ou desalinhamento entre oferta e demanda contribui para o reforço do ceticismo e falta de confiança do comprador (BLASCO-ARCAS et al., 2020).

Por outro lado, os compradores podem ter diversas dúvidas/preocupações ou limitações financeiras. A combinação de dúvidas e limitações financeiras pode criar barreiras ao valor percebido pelos compradores das novas tecnologias da Indústria 4.0. Ademais, o conjunto de interações dos inúmeros atores envolvidos e a arquitetura tecnológica da Indústria 4.0 sugerem a existência de um cenário complexo (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). A não consideração dessa complexidade dificulta a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 pelos compradores, comprometendo sua competitividade no mercado global (IVANOV et al., 2021). Esta Tese visa desvendar ações que permitam aos compradores adotar soluções tecnológicas que possam retornar o máximo na relação custo-benefício.

Os resultados e recomendações da Tese, deram origem a uma sistemática de planejamento para adoção das tecnologias no contexto da Indústria 4.0 que pode minimizar as barreiras à adoção das tecnologias da Indústria 4.0. A sistemática, considerando a execução lógica e sequencial do conjunto de etapas proposto é novidade na literatura existente. Sua aplicação sequencial pode contribuir para melhorar o processo de tomada de decisão tanto tática como estratégica, identificando “quais” ações podem mitigar barreiras à adoção da Indústria 4.0, “como” aplicá-las e “quando” é o melhor momento para aplicar cada ação de mitigação. A primeira etapa abrange a qualificação das equipes e identifica os problemas que as novas tecnologias podem solucionar. A sistemática segue com a definição da maturidade existente e desejada. A análise dessa maturidade permite a elaboração do plano piloto. A seguir, a sistemática propõe o alinhamento do plano

piloto com a estratégia da empresa. A última etapa abrange a implementação e avaliação do plano piloto. Ao considerar todas essas etapas, os compradores de tecnologias digitais podem reduzir as dúvidas de custo-benefício (KAMBLE; GUNASEKARAN; DHONE, 2020), facilitando assim a aprovação de altos investimentos (KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; KIEL; ARNOLD; VOIGT, 2017; OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016; RAJ et al., 2019; RICHTER; XU; WILCOX, 2015).

Esta Tese está estruturada da seguinte forma: o primeiro capítulo descreve a contextualização do tema, delimitação, problema, os objetivos e a justificativa da Tese. O capítulo seguinte descreve os fundamentos teóricos relacionados à Indústria 4.0, às barreiras e mitigadores de adoção da Indústria 4.0 e também ao processo de adoção de tecnologias considerando as complexidades das cadeias de suprimentos. No capítulo 3, é realizada a descrição da metodologia da pesquisa, incluindo o enquadramento, explicação e análise das informações relacionadas às práticas e mecanismos reais. No capítulo seguinte, as descobertas são apresentadas no formato de uma proposta de sistemática para aprimorar o planejamento para adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0. Juntamente com as etapas da sistemática, são apresentadas ações e benefícios associados a cada etapa, além de ações mitigadoras que contribuem indicando como e quando é possível mitigar barreiras e reduzir a complexidade no planejamento para adoção dessas tecnologias. No capítulo da discussão, são apresentadas proposições que contribuem para nortear ainda mais a sistemática proposta. Por fim, são apresentadas as contribuições do estudo, além de limitações e sugestões para pesquisas futuras.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esta tese concentrou sua investigação no processo de planejamento para implantação da Indústria 4.0. O enfoque foi delimitado ao processo de planejamento para a adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0 por parte de empresas compradoras de tecnologias da Indústria 4.0. Nesse contexto do processo de planejamento, o foco foi direcionado a identificação de barreiras à adoção das

tecnologias da Indústria 4.0 e quais ações podem mitigá-las e como e quando aplicá-las para obter um melhor resultado.

Considerando que o termo "tecnologias da Indústria 4.0" é um termo amplo e pode se tornar muito abrangente, incluindo diversas tecnologias com elementos digitais, decidimos que esta Tese quando se refere a tecnologias da Indústria 4.0, se refere principalmente, mas sem querer ser exaustiva, às tecnologias consideradas habilitadoras e particularmente mais significativas no contexto da Indústria 4.0, conforme literatura: *Big Data* e *Data Analytics*; Robôs colaborativos; Simulação digital; Integração de Sistemas (horizontais e verticais); Internet das coisas (*Internet of things* - IOT); Cibersegurança (*Cyber Security*); Computação em nuvem (*Cloud Computing*); Manufatura aditiva e Realidade aumentada (CIMINI et al., 2020; FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019; GHOBAKHLOO, 2020; HORVÁTH; SZABÓ, 2019; RÜSSMANN et al., 2015; SANTOS et al., 2018; STENTOFT et al., 2020; XU; XU; LI, 2018).

Ademais, no contexto da pesquisa, a Tese concentrou sua investigação em uma amostra de 14 empresas de manufatura, localizadas no Brasil e com atuação global, focando apenas em empresas de manufatura, com perfil de compradoras/usuários de tecnologias relacionadas à Indústria 4.0.

1.3 PROBLEMA

A melhoria na tomada de decisão das empresas no âmbito tático e estratégico no processo de planejamento para implantação da Indústria 4.0 é vista como estratégica por muitas empresas para uma gestão eficaz de seus recursos e alcance das metas da organização (IVANOV et al., 2021). Contudo, observa-se na literatura a necessidade de mais pesquisas empíricas para desenvolver estratégias e modelos que permitam a mitigação de barreiras, ao mesmo tempo que proporcione uma racionalização de recursos e investimentos (CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; IVANOV et al., 2021; PETRILLO et al., 2018; RAJ et al., 2019; SONY; NAIK, 2020). A falta de estratégias para implementação das novas tecnologias, assim como escassos recursos, são como "crateras" no caminho da Indústria 4.0 e a superação dessas barreiras envolve o desenvolvimento de planos e roteiros que guiem

corretamente os investimentos das instituições na adoção da Indústria 4.0 (PETRILLO et al., 2018; RAJ et al., 2019; SCHRÖDER, 2016; SONY; NAIK, 2020).

Embora a literatura apresente diferentes ações que podem mitigar as barreiras e apesar da eficácia prática de muitos dos fatores atenuantes, a literatura não é clara sobre "como" e "quando" cada uma dessas ações deve ser aplicada na tomada de decisão de adoção de tecnologias da Indústria 4.0 (IVANOV et al., 2021; RAJ et al., 2019). Além disso, a literatura também não é clara sobre as medidas mitigadoras e como elas podem superar as barreiras devido às diferentes condições dos caminhos para a transformação digital (CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; YANG; FU; ZHANG, 2021) nem como as barreiras econômicas e financeiras impactam no desempenho das novas tecnologias (CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021). Essas lacunas sugerem a necessidade de planejar cuidadosamente a adoção desses potenciais mitigadores (ou facilitadores). Com o objetivo de contribuir para o preenchimento destas lacunas, esta Tese investiga às seguintes questões de pesquisa (QP).

QP1 – Como mitigar as barreiras às tecnologias da Indústria 4.0 em empresas de manufatura?

QP2 – Como melhorar as decisões táticas e estratégicas para garantir os ganhos esperados das tecnologias da Indústria 4.0?

De acordo com relatórios da McKinsey, apenas cerca de 30% das empresas mundiais conseguem capturar valor das soluções da Indústria 4.0 em escala hoje (GARMS et al., 2019). Essa dificuldade de captura de valor poderia ser superada aplicando um modelo para planejamento e implementação das novas tecnologias da Indústria 4.0 aqui descritas. O modelo poderia contribuir para mitigar as barreiras à Indústria 4.0 e aprimorar a tomada de decisão por parte das empresas tanto nos níveis táticos como estratégicos, reduzindo riscos e garantindo ganhos financeiros em projetos de digitalização (CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; IVANOV et al., 2021; RAJ et al., 2019; YANG; FU; ZHANG, 2021).

1.4 OBJETIVOS

A seguir, descreve-se o objetivo geral da pesquisa e o seu desdobramento em objetivos específicos.

1.4.1 Objetivo geral

Propor uma sistemática para a adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0.

1.4.2 Objetivos específicos

- a) Propor ações e benefícios para cada etapa da sistemática de planejamento.
- b) Identificar e apresentar proposições para mitigação das barreiras à adoção das tecnologias da Indústria 4.0.
- c) Identificar formas de reduzir o cenário da complexidade.
- d) Apresentar fluxo de ações que possibilite aprimorar a tomada decisão na adoção das tecnologias da Indústria 4.0.

1.5 JUSTIFICATIVA

Identifica-se na literatura que a ausência de uma estratégia de planejamento para implementação da indústria 4.0, juntamente com a escassez de recursos estão entre as principais barreiras que dificultam uma maior adoção da Indústria 4.0 (CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; IVANOV et al., 2021; RAJ et al., 2019). Sugere-se que as empresas encontrem caminhos que aprimorem a elaboração do planejamento para implementação da Indústria 4.0, de forma a responder “como” e “quando” aplicar ações para minimizar as barreiras que dificultam a sua adoção e equilibrar a relação investimentos/ganhos financeiros.

Esta tese se justifica por apresentar resultados que podem contribuir para responder esta lacuna da literatura, e aprimorar o processo de planejamento para adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0 por parte de compradores

(CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; IVANOV et al., 2021; RAJ et al., 2019; YANG; FU; ZHANG, 2021). Ressalta-se ainda, que não foi identificado na literatura trabalhos que proponham uma sistemática de planejamento para adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0, com uma sequência de etapas para mitigação de barreiras como a que esta pesquisa está propondo. O desenvolvimento de um fluxo sequencial de etapas para planejar a adoção de tecnologias da Indústria 4.0, juntamente com a proposição de ações, pode possibilitar aos gestores uma melhor compreensão das dificuldades impostas pelas barreiras no dia a dia da empresa, bem como tornar mais assertiva as ações de mitigação sobre as barreiras identificadas. Além disso, o desenvolvimento de uma sistemática para planejamento da adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0 pode servir para subsidiar gerentes e diretores de empresas, como um roteiro a ser utilizado na adoção dessas tecnologias. A elaboração de um planejamento para adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0 de forma organizada pode possibilitar as empresas obterem maior sucesso na adoção das iniciativas da Indústria 4.0, bem como evitar que recursos valiosos sejam desperdiçados em projetos malsucedidos.

Outro ponto importante a ser destacado na justificativa desta Tese é o seu enfoque em economias emergentes. O enfoque nessas economias justifica-se pela crescente importância desses países na economia global e no contexto da economia digital. Dados do ranking das maiores economias classificadas pelo comércio mundial, indicam que os países emergentes representam 50% desse grupo (REYES-HEROLES; TRAIBERMAN; VAN LEEMPUT, 2020). Essa importância econômica sugere a existência de um grande mercado para as novas tecnologias digitais, tanto nas transações com países desenvolvidos ou outros países emergentes (REYES-HEROLES; TRAIBERMAN; VAN LEEMPUT, 2020). A alavancagem na adoção das tecnologias da Indústria 4.0 nesses mercados pode contribuir para um aumento considerável do nível de produtividade da indústria local e impactar na melhoria do desenvolvimento da economia regional.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A análise da literatura sobre a adoção de tecnologias da indústria 4.0 em empresas de manufatura indica que as organizações enfrentam dificuldades no processo de tomada de decisão para identificar “como” e “quando” estabelecer ações que permitam superar as barreiras que dificultam a adoção destas tecnologias (CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; IVANOV et al., 2021; RAJ et al., 2019; YANG; FU; ZHANG, 2021) .

Tomar decisões mais assertivas, exige dos gestores conhecimento e compreensão detalhada acerca das tecnologias a serem adotadas, dos motivos que levam a adoção dessas tecnologias e do cenário onde elas serão implementadas, das barreiras que dificultam o processo de adoção e também das possíveis ações que podem contribuir para mitigar as barreiras identificadas (CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; YANG; FU; ZHANG, 2021). Nesse contexto, este embasamento teórico discorre sobre conceitos da Indústria 4.0, as barreiras à sua adoção, ações mitigadoras de barreiras e adoção de tecnologias da Indústria 4.0 e o cenário da complexidade.

2.1 INDÚSTRIA 4.0

O conceito de Indústria 4.0 foi introduzido ao mundo pelo governo alemão em 2011, em uma iniciativa conjunta entre executivos, empresas e academia (KAGERMANN et al., 2013). Chamado Estratégia High Tech 2020 o programa tinha o propósito de manter as empresas alemãs competitivas (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019). Outras iniciativas para estimular o desenvolvimento da Indústria 4.0 também começaram a ser desenvolvidas em diversos países, principalmente naqueles mais desenvolvidos. Essas iniciativas são voltadas para a construção de um sistema inteligente que envolve trabalhadores, infraestrutura, tecnologia e indústria (YIN; STECKE; LI, 2018). No Brasil, o governo brasileiro por meio da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), em conjunto com Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, criou o programa denominado “Rumo à Indústria 4.0” (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019).

O conceito de Indústria 4.0 representa um novo estágio industrial dos sistemas de fabricação, integrando métodos de produção e informações com um conjunto de tecnologias emergentes e convergentes que, através da conectividade, passam a agregar valor a todo o ciclo de vida do produto (ARDITO et al., 2019; FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019; KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018). O princípio fundamental é a conectividade, integrar máquinas e plantas industriais com sistemas de informação que possam trabalhar de forma independente e gerenciar uns aos outros (LIAO et al., 2017; MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019).

Não existe uma definição única de Indústria 4.0. Algumas pesquisas seguem um conceito de I4.0 caracterizando-a como avanços tecnológicos, redesenho organizacional e desenvolvimento do gerenciamento de operações (LIAO; WU; PHAM, 2020; OZTEMEL; GURSEV, 2018). Outras pesquisas colocam a Indústria 4.0 como uma revolução, integrando as tecnologias aos princípios de gestão nas cadeias de manufatura e suprimentos (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019; IVANOV et al., 2021; XU et al., 2019).

Nesse contexto e considerando as transformações vivenciadas nesse início de século XXI, a definição de conceito proposta por (IVANOV et al., 2021), parece ser a mais consistente e alinhada aos objetivos desta Tese dentro de uma visão focada no processo de gestão das cadeias de manufatura e suprimentos.

A Indústria 4.0 é uma integridade de tecnologias, conceitos organizacionais e princípios de gestão subjacentes a uma rede econômica, responsiva, resiliente e sustentável, orientada por dados e dinamicamente e estruturalmente adaptável às mudanças no ambiente de demanda e fornecimento por meio de um rápido rearranjo e realocação de seus componentes e capacidades.

Para viabilizar a adoção da Indústria 4.0, inúmeras soluções de tecnologias podem ser utilizadas no processo. A literatura aborda, como as principais, um conjunto de nove tecnologias que foram propostas para desdobrar o guarda-chuva da Indústria 4.0 (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019; GHOBAKHLOO, 2020; HORVÁTH; SZABÓ, 2019; RÜSSMANN et al., 2015; STENTOFT et al., 2020; XU; XU; LI, 2018): (1) *Big Data e Analytics*; (2) Robôs colaborativos; (3) Simulação digital; (4) Integração de Sistemas (horizontais e verticais); (5) Internet das coisas (*Internet of things* - IOT) – inclui sensores; (6) Cibersegurança (*Cyber Security*); (7)

Computação em nuvem (*Cloud Computing*); Manufatura aditiva (8) e (9) Realidade aumentada.

Além destas tecnologias, alguns autores sugerem a adição de outras tecnologias a esta lista: Inteligência artificial, Tecnologias móveis, Tecnologias de Identificação por Radiofrequência (RFID) e Sistemas de localização em tempo real (RTLS) (ASTRID et al., 2018; STENTOFT et al., 2020)

A adoção dessas tecnologias configura um novo cenário, representa uma evolução tecnológica no meio industrial, e atrai gestores da indústria com os potenciais benefícios econômicos que podem ser advindos da superação dos desafios e barreiras à sua adoção (HORVÁTH; SZABÓ, 2019; XU; XU; LI, 2018). Porém, um grande número de dúvidas ainda paira sobre gestores e executivos, principalmente no tocante à como superar esses desafios e barreiras que dificultam o processo de implantação das novas tecnologias, além de dúvidas sobre os esforços e recursos necessários a serem investidos e a viabilidade do retorno que estes investimentos podem trazer para a organização (KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; XU; XU; LI, 2018).

2.2 BARREIRAS À ADOÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0

Os aspectos financeiros são uma barreira para Indústria 4.0 (HOYER; GUNAWAN; REAICHE, 2020). De acordo com a literatura, a adoção de novas soluções pode exigir grandes investimentos (BREUNIG et al., 2017; KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016; RICHTER; XU; WILCOX, 2015). Essa barreira é exacerbada pela incerteza sobre o retorno econômico dos investimentos (KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; MCKINSEY&COMPANY, 2016; OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016). Preocupações e incertezas também podem intensificar as barreiras para a Indústria 4.0, particularmente, incertezas relacionadas à falta de conhecimento ou capacidade técnica (STENTOFT et al., 2020).

A falta de recursos humanos qualificados é outra barreira para Indústria 4.0 (KIEL; ARNOLD; VOIGT, 2017; MCKINSEY&COMPANY, 2016; OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016). Entre os impactos da falta de recursos humanos qualificados,

cita-se a perpetuação de uma cultura que não incentiva a formação digital de recursos humanos (BREUNIG et al., 2017; DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; LOPES DE SOUSA JABBOUR et al., 2018). Essa falta de treinamento pode afetar o ambiente interno, causando demissões (BUER; STRANDHAGEN; CHAN, 2018; KIEL; ARNOLD; VOIGT, 2017; OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016; RYAN; WATSON, 2017) ou desigualdades em termos de habilidade, qualificação e remuneração (SCHWAB, 2017). Uma combinação desses fatores parece reforçar a barreira aos recursos humanos, levando profissionais de diferentes níveis hierárquicos a preferirem soluções tradicionais (HADDUD et al., 2017a; LEE; LEE, 2015; SCHRÖDER, 2016). Além disso, a falta de profissionais pode tornar a alta administração insegura. Essa insegurança pode levar esses gestores a adotar uma postura mais prudente. De acordo com a literatura, a combinação de prudência e limitações financeiras dificulta o desenvolvimento de um plano para implementação digital (PETRILLO et al., 2018; SCHRÖDER, 2016).

Problemas internos relacionados ao potencial ou desempenho da nova tecnologia podem dificultar a adoção das soluções da Indústria 4.0. Esse é especialmente o caso da integração de tecnologias da Indústria 4.0, que impactam a eficiência dos processos de fabricação e a estratégia das empresas (STENTOFT; RAJKUMAR, 2020). A falha em abordar esses impactos pode causar uma parada completa da produção (SONY; NAIK, 2020). Outros problemas estão relacionados à proteção de dados e ao gerenciamento correto das informações (BREUNIG et al., 2017; BUER; STRANDHAGEN; CHAN, 2018; MCKINSEY&COMPANY, 2016; MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018; RICHTER; XU; WILCOX, 2015). A dificuldade de garantir a integridade e precisão dos dados parece ser agravada pelo grande volume de informações e/ou as preocupações em compartilhar essas informações com colaboradores (BUER; STRANDHAGEN; CHAN, 2018; XU; XU; LI, 2018; ZHOU; LIU; ZHOU, 2016). A barreira tecnológica interna parece ainda ser influenciada pelo estágio de desenvolvimento da tecnologia. De acordo com a literatura, os investimentos em tecnologias precoces e mal testadas podem não ter continuidade ou não fornecer o resultado prometido ao longo do tempo (LEE; LEE, 2015; PETRILLO et al., 2018). Isso pode aumentar a complexidade e os desafios de adoção de novas soluções.

Problemas externos relacionados à tecnologia incluem a ausência de uma infraestrutura digital adequada para alcançar a integração proposta pela Indústria 4.0

(BUNTZ, 2016; KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018). Outros problemas estão associados à implementação das tecnologias. É o caso da complexidade das soluções adotadas ou das dificuldades de integração de todos os canais (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019; HOYER; GUNAWAN; REAICHE, 2020). A falha em resolver esses problemas pode causar deficiências em um sistema integrado e interconectado (RAJ et al., 2019). Os riscos de violação da segurança da informação são outra barreira para a Indústria 4.0. Esses riscos parecem aumentar com o aumento da conectividade ou expansão do canal de relacionamento (MCKINSEY&COMPANY, 2016; OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016; PETRILLO et al., 2018; RICHTER; XU; WILCOX, 2015).

Os desafios de gestão também são uma barreira para a adoção de novas soluções. Parte desses desafios pode ser atribuída à compreensão incipiente da gestão da Indústria 4.0. O aprimoramento desse entendimento precisa abranger as alternativas de gerenciamento das mudanças ocasionadas pelas novas tecnologias, uma vez que algumas mudanças podem gerar resistências internas em diferentes níveis hierárquicos da organização (HORVÁTH; SZABÓ, 2019). Além disso, a complexidade de algumas soluções pode causar problemas operacionais na transição para a Indústria 4.0. Resolver esses problemas requer uma melhor gestão do processo de mudança das organizações (DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; LOPES DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018). Estratégias alternativas de gerenciamento do relacionamento com outras empresas também são necessárias, pois barreiras internas podem afetar negativamente a cooperação entre as partes. De acordo com a literatura, menos cooperação pode dificultar a integração da cadeia de valor (BREUNIG et al., 2017; MCKINSEY&COMPANY, 2016; PETRILLO et al., 2018; RICHTER; XU; WILCOX, 2015). A ausência de normas e leis que regulem as mudanças e inovações tecnológicas é outra barreira que exige atenção dos gestores (KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016). O Quadro 1 apresenta as principais barreiras à adoção da Indústria 4.0 identificadas na literatura.

Quadro 1 - Barreiras à adoção da Indústria 4.0

Barreiras	Resumo	Referencias
Econômica	Alto investimento em implementação	(BREUNIG et al., 2017; BUER; STRANDHAGEN; CHAN, 2018; GEISSBAUER et al., 2014; KACHE; SEURING, 2017; KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016)
	Falta de clareza quanto ao benefício econômico	(KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; MCKINSEY&COMPANY, 2016; OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016)
Recursos Humanos	Falta de cultura digital interna e treinamento	(BREUNIG et al., 2017; DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; LOPES DE SOUSA JABBOUR et al., 2018)
	Falta de habilidades digitais	(BREUNIG et al., 2017; GEISSBAUER et al., 2014; HUNG, 2016; KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; MCKINSEY&COMPANY, 2016; OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016; PETRILLO et al., 2018)
	Interrupção de empregos existentes	(BUER; STRANDHAGEN; CHAN, 2018; HADDUD et al., 2017b; KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; RYAN; WATSON, 2017)
	Desigualdade	(SCHWAB, 2017)
Técnica	Desafios para garantir a qualidade de dados	(BUER; STRANDHAGEN; CHAN, 2018; XU; XU; LI, 2018; ZHOU; LIU; ZHOU, 2016)
	Riscos de violações de segurança	(BREUNIG et al., 2017; BUER; STRANDHAGEN; CHAN, 2018; GEISSBAUER et al., 2014; LEE; LEE, 2015; MCKINSEY&COMPANY, 2016; OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016; PETRILLO et al., 2018; XU; XU; LI, 2018)
	Falta de infraestrutura técnica	(BUNTZ, 2016; KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; SCHRÖDER, 2016; XU; XU; LI, 2018)
	Complexidade na implantação de soluções	(FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019)
	Baixo nível de maturidade da tecnologia desejada	(LEE; LEE, 2015; PETRILLO et al., 2018; XU; XU; LI, 2018)
Gerencial	Falta de uma estratégia digital ao lado da escassez de recursos	(PETRILLO et al., 2018; SCHRÖDER, 2016)
	Falta de padrões, regulamentações e formas de certificação	(KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016)
	Gestão de mudança ineficaz nas organizações	(DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; LOPES DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018)
	Resistência à mudança e seus impactos	(HADDUD et al., 2017b; LEE; LEE, 2015; SCHRÖDER, 2016)
	Desafios na integração da cadeia de valor	(BREUNIG et al., 2017; BUER; STRANDHAGEN; CHAN, 2018; GEISSBAUER et al., 2014; KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; MCKINSEY&COMPANY, 2016; PETRILLO et al., 2018; XU; XU; LI, 2018; ZHOU; LIU; ZHOU, 2016)

Fonte: Elaborado pelo autor - adaptado de (RAJ et al., 2019).

2.3 MITIGAÇÃO DE BARREIRAS

A implementação bem-sucedida da Indústria 4.0 exige atenção de seus profissionais (CUNHA et al., 2020; SONY; NAIK, 2020). A literatura indica que as organizações que promovem a aprendizagem e o compartilhamento de conhecimento podem obter benefícios mais significativos da Indústria 4.0 (TORTORELLA; FETTERMANN, 2018) e que o treinamento de funcionários pode facilitar a integração da Indústria 4.0 e a produção ambientalmente sustentável (DE SOUSA JABBOUR et al., 2018). Na verdade, a falta de conhecimento, habilidades e cultura dos processos digitais pode provocar resistência à Indústria 4.0. Essa resistência pode ser mitigada com o apoio da alta administração (MÜLLER, 2019; PEREIRA et al., 2019) ou pelo treinamento e sensibilização dos envolvidos (MOEUF et al., 2020). O treinamento precisa se concentrar em codificação, segurança de TI (Tecnologia da Informação) e interfaces homem-máquina (KAZANCOGLU; OZKAN-OZEN, 2018). Além dos temas técnicos, o treinamento deve contribuir para a formação de um perfil operacional autônomo. Essa contribuição demanda atenção a tópicos não técnicos (CIMINI et al., 2020). Também é necessária atenção à composição da equipe de implementação (KAZANCOGLU; OZKAN-OZEN, 2018; LOPES DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; PEREIRA et al., 2020). Essas equipes devem incluir líderes criativos que conheçam as relações organizacionais e intraorganizacionais de suas empresas (DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; HORVÁTH; SZABÓ, 2019). Em outros casos, pode ser necessário contratar cientistas de dados capazes de transformar dados em conhecimento relevante (ARDITO et al., 2019) ou reajustar funções de gestão (HORVÁTH; SZABÓ, 2019).

Identificar e aproveitar oportunidades que usam novas soluções pode ajudar a eliminar barreiras internas para a Indústria 4.0 (CULOT et al., 2020). Para isso, novas soluções devem ser capazes de melhorar o atendimento ao cliente. Melhor atendimento ao cliente requer atenção à eficiência operacional, entendimento da operação e desenvolvimento de soluções tecnológicas (MARTINEZ, 2019). A literatura indica que os gestores devem fornecer condições para o desenvolvimento de uma visão sistêmica de novas soluções (ARDITO et al., 2019; CUNHA et al., 2020). As novas soluções identificadas devem então ser comparadas com os produtos e/ou processos da organização. Esse esforço pode revelar a possibilidade de criação de produtos ou serviços (WEKING et al., 2020), de melhor integração da

cadeia de suprimentos ou de uso de robôs (CHIARINI; BELVEDERE; GRANDO, 2020). Explorar essas oportunidades pode exigir mudanças na gestão da empresa. É o caso da criação de condições para a realização de ações interdisciplinares (KAZANCOGLU; OZKAN-OZEN, 2018), com foco enxuto (CIMINI et al., 2020), ou que melhorem o uso de recursos críticos escassos (RAJ et al., 2019). Além disso, é necessário envolver as funções/unidades de gestão, marketing, RH e TI (GHOBAKHLOO, 2020; ZANGIACOMI et al., 2020). Este engajamento pressupõe o alinhamento entre a estratégia organizacional da empresa e os objetivos dos diferentes stakeholders (STENTOFT et al., 2020), bem como uma revisão periódica dos objetivos estipulados (PREINDL; NIKOLOPOULOS; LITSIOU, 2020). O Quadro 2 apresenta as oportunidades identificadas na literatura para mitigar as barreiras à adoção da Indústria 4.0 associadas a recursos humanos e gerenciais.

Quadro 2 - Mitigação de Barreiras.

Mitigador	Resumo	Referencias
Recursos Humanos	Treinamento focado em capacitação e redução de resistência	(ARDITO et al., 2019; CUNHA et al., 2020; DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; KAZANCOGLU; OZKAN-OZEN, 2018; MOEUF et al., 2020)
	Perfil de trabalho <i>freelance</i>	(CIMINI et al., 2020)
	Equipe de trabalho e gestão do conhecimento	(DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; KAZANCOGLU; OZKAN-OZEN, 2018; TORTORELLA et al., [s.d.])
	Liderança criativa e reajuste das funções de gestão	(DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; HORVÁTH; SZABÓ, 2019)
Gerencial	Entendimento das barreiras para a Indústria 4.0	(KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; RAJ et al., 2019)
	Capacidade de identificar e aproveitar oportunidades e desafios relacionados à rápida evolução da Indústria 4.0	(ARDITO et al., 2019; CIMINI et al., 2020; CULOT et al., 2020; CUNHA et al., 2020; DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; KAZANCOGLU; OZKAN-OZEN, 2018; WEKING et al., 2020)
	Revisão de objetivos e estratégias	(GHOBAKHLOO, 2020; HORVÁTH; SZABÓ, 2019; PREINDL; NIKOLOPOULOS; LITSIOU, 2020; STENTOFT; RAJKUMAR, 2020; TELUKDARIE et al., 2018)
	Alinhamento entre as funções / unidades de gestão, operações, marketing, RH e TI	(GHOBAKHLOO, 2020; ZANGIACOMI et al., 2020)
	Foco no cliente e eficiência	(MARTINEZ, 2019)
	Foco em estratégias como servitização, design ao custo, integração da cadeia de suprimentos e integração de máquinas e equipamentos	(CHIARINI; BELVEDERE; GRANDO, 2020)

	eletrônicos e banco de dados, bem como estratégia <i>lean</i>	
	Melhoria no uso de recursos críticos	(RAJ et al., 2019)

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4 ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 E O CENÁRIO DA COMPLEXIDADE

A adoção de tecnologias da Indústria 4.0 na indústria de manufatura tem se mostrado cada vez mais importante e promissora no atual ambiente global de negócios (DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; YANG; FU; ZHANG, 2021). Sua adoção abarca uma transformação significativa dos processos e operações de produção, resultando em um avanço significativo nos sistemas de manufatura (SRIVASTAVA et al., 2022). Nesse ambiente global de negócios, tem se ampliado a demanda por pesquisas que forneçam uma compreensão mais clara das transformações da adoção da Indústria 4.0 e dos seus impactos na gestão da manufatura e da cadeia de suprimento (IVANOV et al., 2021). Observa-se que há ainda uma necessidade de melhor entendimento de como o valor de negócio é gerado ou ampliado pela adoção das tecnologias da Indústria 4.0 (COLLI; STINGL; WAEHRENS, 2022; MÜLLER; BULIGA; VOIGT, 2018), bem como, também falta compreensão de como as empresas implementam essas tecnologias (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019).

Isso ocorre principalmente devido à complexidade criada pelas demandas do cenário digital inerentes à arquitetura tecnológica da Indústria 4.0, pelos inúmeros atores envolvidos e pelo grande volume de interação entre eles e pela própria arquitetura complexa de alguns sistemas de manufatura (FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019; LEE; BAGHERI; KAO, 2015; SRIVASTAVA et al., 2022). Esse conjunto de fatores, acaba por gerar um cenário complexo com efeitos que se inter-relacionam ou se mostram interdependentes e geram a necessidade de ações de contingências (GHADGE et al., 2020; GHOBAKHLOO, 2020).

Nesse contexto, as diferenças nas cadeias de suprimentos também se traduzem em diferenças nas formas e variedade do cenário da complexidade, abrangendo desde varejo até produtos químicos, automotivos e eletrônicos, entre outros (SERDARASAN, 2013). Como exemplo, nas cadeias de varejo destacam se

como principais fatores da complexidade, a alta variedade de produtos e SKUs (*Stock Keeping Unit* - Unidades de Armazenamento), variação da demanda, variação de requisitos de capacidade, rede com alto número de fornecedores e pontos de distribuição geograficamente dispersos (SERDARASAN, 2013). Na cadeia de produtos químicos, os principais fatores de complexidade que se apresentam são a rede complexa da cadeia de suprimentos, a dispersão geográfica, as mudanças nas leis e instruções e a estrutura de transporte e regulamentação sobre materiais perigosos e seu transporte (FERRIO; WASSICK, 2008; SERDARASAN, 2013). Na cadeia automotiva, o alto número de variedades de peças e fornecedores, e suas abordagens enxuta se traduzem como os principais fatores da complexidade (SERDARASAN, 2013; TURNER; WILLIAMS, 2005). Na cadeia de suprimentos de eletrônicos, a complexidade decorre principalmente do alto número de SKUs, grande variedade de produtos complexos, elevado número de fornecedores e clientes além de uma cadeia de suprimentos complexa, aliada as demandas e incertezas do mercado (SERDARASAN, 2013).

Essa complexidade ocasiona uma série de dúvidas e incertezas na alta administração e gerência das empresas, principalmente sobre a viabilidade dos benefícios da adoção das tecnologias da indústria 4.0 (GARMS et al., 2019), impactando em aumento do ceticismo e tornando se um obstáculo para a iniciativas de adoção de tecnologias da Indústria 4.0 (GARMS et al., 2019; GEISSBAUER et al., 2018)

Para enfrentar esses desafios relacionados à complexidade, SRIVASTAVA et al. (2022), sugere ampliar pesquisas associadas à lacuna de habilidades, principalmente naquelas relacionadas as exigências da Indústria 4.0 (BAENA et al., 2017) e também associadas às capacidades organizacionais das empresas (IVANOV et al., 2021). Isso exige das organizações uma visão coerente e interdisciplinar da Indústria 4.0, principalmente no tocante as tecnologias e as habilidades das equipes que atuam no processo de implementação (IVANOV et al., 2021; SRIVASTAVA et al., 2022).

Entender os fatores que geram a complexidade pode ajudar a desenvolver estratégias corretas ao lidar com essa complexidade (SERDARASAN, 2013). Pesquisas sugerem que, uma visão mais ampla e interdisciplinar da Indústria 4.0, pode ser obtida se a considerarmos como um sistema aberto (IVANOV et al., 2021), sistema esse que interage com ambientes e evolui a partir dessas interações.

Sistemas abertos possuem como principais características o controle, a autoadaptação e a auto-organização (IVANOV et al., 2021), características que podem contribuir para uma melhor exequibilidade da cadeia de suprimentos em larga escala (IVANOV; DOLGUI, 2020). Outras pesquisas sugerem considerar a Teoria da Complexidade para avaliar novos insights sobre as operações e gestão da cadeia de suprimentos, onde os agentes interconectados se adaptam e manifestam auto-organização para reagir ao ambiente externo dinâmico (HALL; MATOS; SILVESTRE, 2012; NAJJAR; YASIN, 2021). Neste contexto, a única ênfase na teoria da complexidade seria capitalizar os princípios oferecidos pela teoria (por exemplo, adaptação e auto-organização) para entender a dinâmica de vários níveis das cadeias de suprimentos. Interconexões complexas entre vários fornecedores, fabricantes, montadores, distribuidores e varejistas são inerentes às cadeias de suprimentos (PATHAK et al., 2007). Ao gerenciar a complexidade inerente à interconectividade de suas redes de suprimentos, as organizações também podem aprender com os benefícios de serem adaptáveis em seu comportamento (PATHAK et al., 2007).

A autoadaptação num sistema complexo, refere-se a um grande número de agentes que se comportam de acordo com seus próprios princípios de interação e relação local (ERDMANN, 2013; ESPINOSA; PORTER, 2011; PATHAK et al., 2007). As inúmeras relações e conexões entre os atores, se constitui numa rede de múltiplas entidades, que exige das organizações ação adaptativa em resposta as mudanças tanto no ambiente quanto no próprio sistema de entidades (CHOI; DOOLEY; RUNGTUSANATHAM, 2001; PATHAK et al., 2007). Essas entidades podem evoluir ao longo do tempo à medida que as entidades aprendem com suas interações (PATHAK et al., 2007). Tais sistemas são abertos, aprendem e evoluem de maneira adaptativa, registrando as informações para extrair regularidades e inseri-las dentro de cenários que são mudam continuamente à luz da experiência (CHOI; DOOLEY; RUNGTUSANATHAM, 2001; ERDMANN, 2013).

Um sistema complexo também é auto-organizado (PATHAK et al., 2007). A auto-organização é uma consequência das interações entre as entidades, sendo definida como um processo no qual novas estruturas, padrões e propriedades emergem sem serem impostas externamente ao sistema (PATHAK et al., 2007). A auto-organização geralmente parte de um ambiente de incerteza, no qual os atores se auto-organizam para tentar sobreviver. Nesse contexto, a forma dominante é

burocrática e procedimentos não são planejados para evolução do ambiente (CHOI; DOOLEY; RUNGTUSANATHAM, 2001; ERDMANN, 2013; PATHAK et al., 2007). Líderes constantemente tentam controlar as ações, interações e resultados dos agentes, fazendo-os agir conforme as “receitas da gerência”(ERDMANN, 2013; SCHNEIDER; SOMERS, 2006). A alavancagem da organização depende, principalmente, do reconhecimento dos problemas por todos os colaboradores, bem como, que a direção possa garantir que o resultado das ações seja reportado aos atores e que eles sejam capazes de compreendê-lo e de ajustarem seus comportamentos (ERDMANN, 2013). Para isso, o processo de auto-organização necessita de um eficiente sistema de informação que realize a comunicação de seus componentes entre si e com o ambiente, sendo o retorno da informação sobre os resultados das ações o que permite o ajustamento contínuo dos comportamentos e o aumento da previsibilidade do sistema (ERDMANN, 2013; NAJJAR; YASIN, 2021).

A adaptação dos agentes às mudanças do sistema e a auto-organização, possibilita evoluir para o aprendizado ao processo de gestão das organizações, mantendo o foco no aprendizado, no comprometimento, nas escolhas, nas responsabilidades e nas obrigações dos agentes envolvidos, visando o equilíbrio entre aquilo que deve ser feito e o forma como deve ser feito (ERDMANN, 2013; ESPINOSA; PORTER, 2011; SCHNEIDER; SOMERS, 2006). Nesse contexto, os agentes estão voltados para a aprendizagem contínua, melhorando a conexão da empresa com seu ambiente, com sua rede de relacionamento e no estabelecimento de parcerias externas com clientes e fornecedores (ERDMANN, 2013; ESPINOSA; PORTER, 2011). Essa autoaprendizagem permite as organizações se manterem flexíveis e abertas a novastendências e também as oportunidades e mudanças vindas do cenário interno e externo, bem como, aprimorar o desempenho empresarial através do compartilhamento de conhecimentos e experiências, com o desenvolvimento de redes interativas, proporcionando uma organização forte, competitiva e mais sustentável (CHOI; DOOLEY; RUNGTUSANATHAM, 2001; ERDMANN, 2013; ESPINOSA; PORTER, 2011).

3 METODOLOGIA

3.1 PROJETO DE PESQUISA

A adoção das tecnologias da indústria 4.0 pode alavancar a produtividade, desempenho e competitividade organizações. Identificar fatores que dificultam a sua adoção e formas de superá-los pode aprimorar os resultados das organizações e alavancar a adoção dessas tecnologias. Com o objetivo de contribuir para tornar mais assertiva a tomada de decisão de adoção de tecnologias da Indústria 4.0 e para preencher uma lacuna de conhecimento sobre como e "quando" essas ações devem ser aplicadas, esta pesquisa é a primeira que busca através da identificação e mapeamento de barreiras à adoção da Indústria 4.0 e de ações mitigadoras, propor uma sistemática de planejamento para adoção das tecnologias no contexto da Indústria 4.0.

Para isto, este estudo adotou uma abordagem de pesquisa qualitativa, considerando-se a necessidade e os argumentos apresentados nas seções anteriores que exigem um tipo de pesquisa qualitativa (YIN, 2009). Foram selecionadas 14 empresas com operações globais localizadas em um país emergente (Brasil). Essas empresas nos permitiram examinar perfis heterogêneos de adoção das novas tecnologias da Indústria 4.0 desenvolvidas em diferentes configurações de elementos, considerando segmento de mercado, especificidades locais como aspectos culturais, disponibilidade de mão de obra qualificada, custos, investimentos em novas tecnologias e ceticismo dos compradores. Esse desenho estratégico nos proporcionou variedade na amostra, característica desejável para observar comportamentos específicos sobre o escopo de nosso exercício empírico.

O estudo realizado foi de caráter exploratório, operacionalizado principalmente por meio de entrevistas individuais em profundidade. O desenho da pesquisa incluiu entrevistas com diretores, gerentes e coordenadores de diferentes áreas industriais, como planejamento, inovação, engenharia, projetos, produção e operações. Entrevistamos líderes de projetos que adotam novas tecnologias da Indústria 4.0, bem como líderes de seção de diferentes componentes do projeto, pois vários processos, como estratégias de transição para a Indústria 4.0 e compra de novas tecnologias, são gerenciados diretamente por esses profissionais. Por

meio de entrevistas com esses profissionais, foi possível obter uma visão crítica do cenário industrial em nível local e global e uma percepção mais precisa das oportunidades e dificuldades enfrentadas na adoção das novas tecnologias da Indústria 4.0.

A adoção de uma abordagem qualitativa justifica-se, dada a natureza multifacetada e contextualizada do tema. De acordo com a literatura, estudos qualitativos são recomendados para a pesquisa desenvolver e oferecer *insights* detalhados sobre processos organizacionais e individuais (EISENHARDT; GRAEBNER, 2007; MILES, M.B., HUBERMAN, A.M., 2004; YIN, R.K., 2009). Com base na revisão da literatura descrita no capítulo 2, foi escolhida uma abordagem de codificação para análise qualitativa de texto (SALDAÑA, 2015) e teoria fundamentada (CORBIN; STRAUSS, 1990).

A codificação utilizou o software ATLAS TI v.9, com o objetivo de apoiar a análise dos dados qualitativos das próximas etapas. Os códigos foram organizados em torno das barreiras que dificultam a adoção da Indústria 4.0 (barreiras econômicas, de recursos humanos, gerenciais e técnicas) e das ações que podem mitigar essas barreiras associadas a um cenário complexo. As informações foram sintetizadas em dois quadros (detalhes nos quadros 5 e 6). O primeiro quadro apresenta as macrobarreiras à adoção da Indústria 4.0 e busca identificar ações mitigadoras à essas barreiras. O segundo quadro considera o como e quando às ações mitigadoras identificadas na etapa anterior podem ser aplicadas.

Dois grupos diferentes de perguntas foram definidos para entrevistar os profissionais que estão diretamente envolvidos no processo de adoção ou gestão de tecnologias no contexto da Indústria 4.0 nas de manufaturas selecionadas para a pesquisa. Ambos os grupos de perguntas foram estruturados observando a codificação da revisão da literatura. As perguntas enfocam os impactos das barreiras na adoção das tecnologias no contexto da Indústria 4.0, quais as principais ações que podem contribuir para mitigar as barreiras e como e quando estas devem ser aplicadas para tornar mais assertiva a tomada decisão.

3.2 COLETA DE DADOS

As atividades associadas à coleta de dados deste estudo iniciaram-se com a definição do perfil das empresas a serem investigadas. Todas as selecionadas são consideradas como do setor da indústria de transformação e compradores/usuários de tecnologias no contexto da Indústria 4.0. Os critérios de seleção das empresas foram definidos considerando: a) empresas que já adotam ou estão em processo de adoção de tecnologias da Indústria 4.0, considerando a perspectiva de um país em desenvolvimento, agregando novos insights sobre a dinâmica local da Indústria 4.0 dentro da realidade de uma economia periférica. b) a crescente importância dos países emergentes na economia global e no contexto da economia digital. c) a representatividade desses atores no mercado global e a intenção da pesquisa de ouvir empresas que adotaram soluções tecnológicas relacionadas à Indústria 4.0.

Das 14 empresas selecionadas, oito delas, C.A, C.D, C.G, C.H, C.I, C.J, C.I, C.N, estão geograficamente localizadas na Europa ou na América do Norte. Essas empresas compartilham fortes semelhanças em suas respectivas características de atuação no mercado mundial, como competição pela liderança em seus segmentos de atuação, concentração de empresas estabelecidas em diversos países, diversidade de produtos, altos investimentos em P&D e inovação. Este perfil enriquece a pesquisa ao fornecer informações sobre as diferentes condições e experiências dos projetos com tecnologias da Indústria 4.0 em suas diferentes plantas em países desenvolvidos e em desenvolvimento. As outras 06 empresas, C.B, C.C, C.E, C.F, C.K, CM têm sede no Brasil, mas possuem plantas instaladas em outros países, principalmente nas Américas do Sul e do Norte. Suas experiências na adoção de tecnologias da Indústria 4.0 fornecem informações preciosas sobre as dificuldades e ganhos experimentados na adoção de novas tecnologias em países emergentes. O Quadro 3 destaca alguns atributos básicos das empresas investigadas.

Quadro 3 - Perfil das empresas pesquisadas.

Empresa	Código	2019 Receita (USD)	Produto
Empresa A	CA	30,2 bilhões	Fabricante de automóveis
Empresa B	CB	7,4 bilhões	Fabricante de alimentos processados
Empresa C	CC	0,14 bilhões	Fabricante de metais sanitários
Empresa D	CD	122 bilhões	Fabricante de automóveis
Empresa E	CE	0,23 bilhões	Fabricante de artefatos de defesa
Empresa F	CF	0,16 bilhões	Fabricante de artigos de plástico
Empresa G	CG	4,24 bilhões	Fabricante de produtos de beleza

Empresa H	CH	16 bilhões	Fabricante de alimentos e bebidas
Empresa I	CI	7,15 bilhões	Fabricante de autopeças
Empresa J	CJ	7,5 bilhões	Fabricante de autopeças
Empresa K	CK	0,8 bilhões	Fabricante de artigos de plástico
Empresa L	CL	39,2 bilhões	Fabricante de equipamentos agrícolas e florestais
Empresa M	CM	1,2 bilhões	Fabricante de autopeças
Empresa N	CN	1,5 bilhões	Fabricante de eletrodomésticos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os responsáveis por iniciativas relacionadas à tecnologia da Indústria 4.0 ou projetos da Indústria 4.0 foram contatados nas empresas selecionadas por email ou por telefone. Todos os indicados concordaram em participar da pesquisa pela importância e oportunidade do problema de pesquisa e também do seu interesse no assunto. O perfil dos entrevistados é mostrado no Quadro 4.

Empresa	Posição	Código	Experiência	Duração das entrevistas
CA	Diretor Planejamento	MA	07 anos	34 min
CB	Gerente de Inovação	MB	17 anos	41 min
CC	Coordenador de Produção	MC	23 anos	38 min
CD	Gerente de Produção	MD	31 anos	39 min
CE	Diretor de Operações	ME	18 anos	42 min
CF	Gerente de TI	MF	16 anos	45 min
CG	Gerente de Projetos	MG	23 anos	49 min
CH	Gerente de Inovação	MH	21 anos	43 min
CI	Diretor de Operações	MI	17 anos	45 min
CJ	Gerente de Produção	MJ	8 anos	37 min
CK	Gerente de Engenharia	MK	27 anos	40 min
CL	Gerente de Produto	ML	19 anos	38 min
CM	Gerente de Projetos de Inovação	MM	9 anos	47 min
CN	Gerente de PCPM (Planejamento, Controle e Produção de Materiais)	MN	16 anos	39 min

Quadro 4 - Perfil dos profissionais das empresas a serem entrevistados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A coleta de dados foi realizada por meio de entrevista presencial, dividida em duas etapas. A primeira etapa investigou as barreiras e mitigadores. Para a coleta de dados na primeira etapa, foram elaboradas dez questões. Essas questões foram baseadas na revisão da literatura e enfocaram as barreiras econômicas, de recursos humanos, gerenciais e técnicas, e mitigadores econômicos e técnicos relacionados aos recursos humanos e aspectos gerenciais. As perguntas propostas aos

respondentes na primeira etapa são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Perguntas propostas na primeira rodada de entrevistas.

Código	Questões
Econômica	<ol style="list-style-type: none"> 1. Como a barreira econômica afeta a adoção de tecnologias digitais ou Indústria 4.0? 2. Como pode a resistência à tecnologia de alto custo ou tecnologia com retorno incerto sobre o investimento ser mitigada?
Recursos Humanos	<ol style="list-style-type: none"> 3. Como as barreiras relacionadas aos recursos humanos afetam a adoção de tecnologias digitais ou Indústria 4.0? 4. Como os gestores ou profissionais são treinados para prospectar e implementar inovações? 5. Como você supera a resistência de outros gerentes ou funcionários à inovação?
Gerencial	<ol style="list-style-type: none"> 6. Como as barreiras gerenciais afetam a adoção de tecnologias digitais ou Indústria 4.0? 7. Como você tenta obter o apoio da alta administração para a análise / adoção de tecnologias inovadoras? 8. Como você desenvolve um plano estratégico para tecnologias digitais?
Técnica	<ol style="list-style-type: none"> 9. Como as barreiras técnicas afetam a adoção de tecnologias digitais ou Indústria 4.0? 10. Como você atenua os problemas relacionados à informação, falta de infraestrutura ou baixa maturidade da tecnologia?

Fonte: Elaborado pelo autor.

A segunda etapa investigou como e quando as descobertas da primeira etapa precisariam ser abordadas. Esta análise foi baseada na revisão da literatura sobre o curso de transformação resultante da adoção da Indústria 4.0 e suas consequências. As perguntas propostas aos respondentes na segunda etapa são mostradas no Quadro 6.

Quadro 6 - Perguntas propostas na segunda rodada de entrevistas.

Código	Questões
Comportamento complexo	<p>Essas são as barreiras e atenuantes identificados na etapa anterior. Com base nessas informações, qual é a sua resposta às seguintes perguntas:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. O que poderia dificultar a aplicação desses mitigadores? 2. O que poderia facilitar a aplicação desses mitigadores?
Autoadaptação	<ol style="list-style-type: none"> 3. Como os problemas indicados acima podem ser mitigados? 4. Quais mitigadores identificados se aplicam a quais barreiras?
Auto-organização	<ol style="list-style-type: none"> 5. Como você planejaria a aplicação dos mitigadores da questão anterior? 6. Quando cada um desses mitigadores deve ser considerado?
Autoaprendizagem	<ol style="list-style-type: none"> 7. Como você gerencia a autoaprendizagem das soluções identificadas?

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as entrevistas foram realizadas entre maio de 2021 e julho de 2021. Na primeira rodada do estudo, as entrevistas iniciaram com um estudo piloto nas empresas CE e CN. Na segunda rodada, o estudo piloto foi apresentado a algumas empresas. Esse estudo piloto teve como objetivo testar e validar os instrumentos de pesquisa.

Todas as empresas foram investigadas na íntegra posteriormente. A coleta de dados envolveu entrevistas semiestruturadas com os participantes, além da análise documental. Os encontros foram agendados pessoalmente pelo autor. O autor que realizou as entrevistas e registrou todas as informações relatadas, com a autorização dos participantes. Esses registros foram posteriormente transferidos para o Microsoft Word para edição de texto. As entrevistas foram encerradas quando duas condições foram atendidas: todos os protocolos de pesquisa forem aplicados e nenhuma nova evidência estava emergindo do entrevistado (CORBIN; STRAUSS, 2007). Posteriormente, os documentos foram submetidos e codificados no ATLAS TI. Ao final de cada entrevista foi solicitado aos participantes a possibilidade de fornecimento de dados secundários, como relatórios públicos e gerenciais, documentos eletrônicos publicamente disponíveis no site (internet) das empresas investigadas, para permitir a triangulação entre entrevistas e documentos.

3.3 CONFIABILIDADE, CREDIBILIDADE E CONFIRMABILIDADE

Para permitir futuras replicações, um conjunto de critérios foi aplicado para garantir a credibilidade e a confiabilidade. Esses critérios abrangem até que ponto as empresas se encaixam nos objetivos da pesquisa, compreensão, generalização, controle, transferibilidade, confiabilidade, confirmabilidade e integridade (CORBIN; STRAUSS, 2007; HIRSCHMAN, 1986; WALLENDORF; BELK, 1989).

A pesquisa considerou basicamente quatro etapas principais. A primeira etapa da pesquisa focou na identificação na literatura das principais barreiras que dificultam à adoção da Indústria 4.0, de ações mitigadoras que possibilitem reduzir essas barreiras e ainda na compreensão do cenário complexo associado à arquitetura tecnológica da Indústria 4.0 e pelos inúmeros atores envolvidos e pelo

grande volume de interação entre eles. Ainda nesta etapa as questões aplicadas no estudo foram elaboradas. A segunda etapa realizada foi a coleta de dados. Ela foi realizada por meio de entrevistas semiestruturadas com 14 profissionais em cargos de liderança, e estão diretamente envolvidos no processo de adoção ou gestão de tecnologias no contexto da Indústria 4.0. Os achados dos entrevistados indicaram compreensão do tema, sendo observada generalização na seleção de funcionários com diferentes funções e em empresas de diferentes tipos e níveis de maturidade. A validação dos resultados dos participantes e a transferibilidade com controle integrado refere-se à escolha dos profissionais que atuam em empresas que implantaram ou estão em processo de adoção de projetos de tecnologia da Indústria 4.0. A confiabilidade foi atendida com foco nas barreiras e ações mitigadoras desses projetos, enquanto a confirmabilidade relacionou-se à análise individual de cada caso. Essa análise incluiu todas as evidências das ações e iniciativas das empresas investigadas.

Após a análise de cada caso individualmente, na terceira etapa, foi realizada uma análise cruzada utilizando o software ATLAS TI. Essas análises visam identificar semelhanças e diferenças entre os entrevistados e as razões dessas semelhanças/diferenças. Em ambas as análises, os resultados foram codificados para compará-los e contrastá-los com os elementos extraídos da literatura. Essa codificação foi baseada na teoria fundamentada (CORBIN; STRAUSS, 1990). Os documentos revisados foram então apresentados aos entrevistados. Aspectos de integridade incluem anonimato e padrões éticos.

Na última etapa, com base nos resultados, foi realizada a discussão e contribui-se para o meio científico e também industrial com a proposição de uma sistemática de planejamento para adoção das tecnologias no contexto da Indústria 4.0, que permite aos interessados apontar quais ações podem ser aplicadas para mitigar as barreiras à essa adoção, como aplicar essas ações mitigadoras e quando é o melhor momento de aplicar cada ação de mitigação para tornar mais assertiva a tomada de decisão.

4 PROPOSTA DE SISTEMÁTICA PARA ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0

As organizações em economias emergentes muitas vezes enfrentam um cenário complexo para avançar na aplicação dos conceitos e tecnologias digitais da Indústria 4.0. Esse cenário complexo é decorrente da arquitetura tecnológica da Indústria 4.0 e das interações entre os atores envolvidos. Questões financeiras, recursos humanos, aspectos técnicos e gerenciais podem levar os compradores a não se interessarem em comprar com a melhor relação custo-benefício. A superação dessas barreiras exige atenção principalmente aos mitigadores relacionados aos recursos humanos e aos aspectos gerenciais. Além de atentar para esses mitigadores, a alavancagem da Indústria 4.0 exige a mitigação dessa complexidade. Essa consideração deve incluir a compreensão dos elementos técnicos, organizacionais e estratégicos que impactam no aumento da complexidade, bem como a adaptabilidade a esse cenário. Essa adaptabilidade pode acontecer por meio da auto-organização e também autoaprendizagem.

No entanto, a literatura não indica como os gestores podem mitigar as barreiras financeiras, de recursos humanos, técnicas ou gerenciais. Tampouco a literatura indica em que sequência devem ser utilizados os mitigadores dessas barreiras. A falta de conhecimento sobre esta sequência pode levar a falhas na abordagem de um mitigador. Essa falha não está relacionada ao mitigador em si, mas ao melhor momento para sua adoção. Neste contexto, ressalta-se a importância de ampla compreensão das barreiras, dos mitigadores e também da consideração da complexidade específica de cada modelo negócio e de suas cadeias de suprimentos a fim de alcançar melhores resultados na adoção de tecnologias da Indústria 4.0. A Figura 1 apresenta o modelo tentativo que orientou o desenvolvimento da pesquisa. A análise sugere como base a necessidade de compreensão das barreiras e mitigadores como melhor forma para a tomada de decisões mais assertivas na redução do cenário complexo da adoção das novas tecnologias visando identificar o melhor momento para abordar o par de barreiras e mitigadores.



Figura 1 - Modelo Tentativo de Pesquisa

Inicialmente o modelo tentativo da pesquisa focou no levantamento e mapeamento na literatura das principais barreiras que dificultam o processo de adoção da Indústria 4.0. A partir desse diagnóstico, foi possível identificar e compreender quais são e como essas barreiras impactam no processo de adoção da Indústria 4.0. A segunda etapa focou em identificar ações que possibilitam reduzir ou mitigar as barreiras já levantadas e mapeadas na literatura. Através do levantamento da literatura e dos achados das entrevistas, foi possível compreender que as ações mitigadoras associadas aos Recursos Humanos e a atividade Gerencial, são as que têm impacto em todo o conjunto de macrobarreiras financeiras, de recursos humanos, técnicas ou gerenciais identificadas. O amplo entendimento das barreiras e das ações mitigadoras possibilita também um melhor entendimento do comportamento complexo associado ao cenário digital da Indústria 4.0. Nesse contexto, a terceira etapa busca, por meio dos princípios de autoadaptação, auto-organização e autoaprendizagem, reduzir essa complexidade relacionada à arquitetura da indústria 4.0 e ao grande volume de interação entre os atores para tornar-se mais assertiva no estabelecimento de ações mitigadoras que possibilitem a redução das dificuldades impostas pelas barreiras.

As conclusões desta Tese apresentam quais as principais barreiras que devem ser mitigadas e um roteiro para aprimorar o processo de mitigação. Além disso, apresenta ainda proposições de ações que podem permitir aos gestores de empresas que estão adotando tecnologias da Indústria 4.0, uma melhor compreensão das dificuldades impostas pelas barreiras e tornar mais assertiva a sua tomada de decisão no processo de planejamento para adoção dessas

tecnologias. Abaixo estão os detalhes dos achados que abordam as questões de pesquisa propostas.

4.1 MITIGAÇÃO DE BARREIRAS

A primeira rodada de investigação inclui o que pode ser feito para mitigar as barreiras às tecnologias da Indústria 4.0. Considerando as barreiras econômicas, humanas, técnicas e gerenciais identificadas na literatura, os achados indicam que ações mitigadoras voltadas aos recursos humanos e gerenciais possibilitam obter melhores condições para mitigar as barreiras à adoção de tecnologias da Indústria 4.0. As entrevistas permitiram identificar ações para a mitigação de barreiras, considerando principalmente os aspectos de valorização dos fatores humanos e engajamento da equipe e os aspectos financeiros da adoção de novas tecnologias. Nesse contexto, cada grupo de achados foi dividido em dois subgrupos: ações e benefícios. As ações indicam o que precisa ser feito, enquanto os benefícios permitem avaliar a importância da ação. Os resultados revelam a necessidade de qualificar as equipes em diferentes momentos. Os profissionais podem analisar melhor os problemas da empresa que podem ser mitigados pelas tecnologias da Indústria 4.0 e avaliar a maturidade desejada pela empresa (considerando especificidades operacionais e estratégicas). Além disso, os profissionais melhoram seu desempenho ao planejar, implementar e avaliar o plano piloto. A associação de grupos e subgrupos é mostrada na Figura 2.

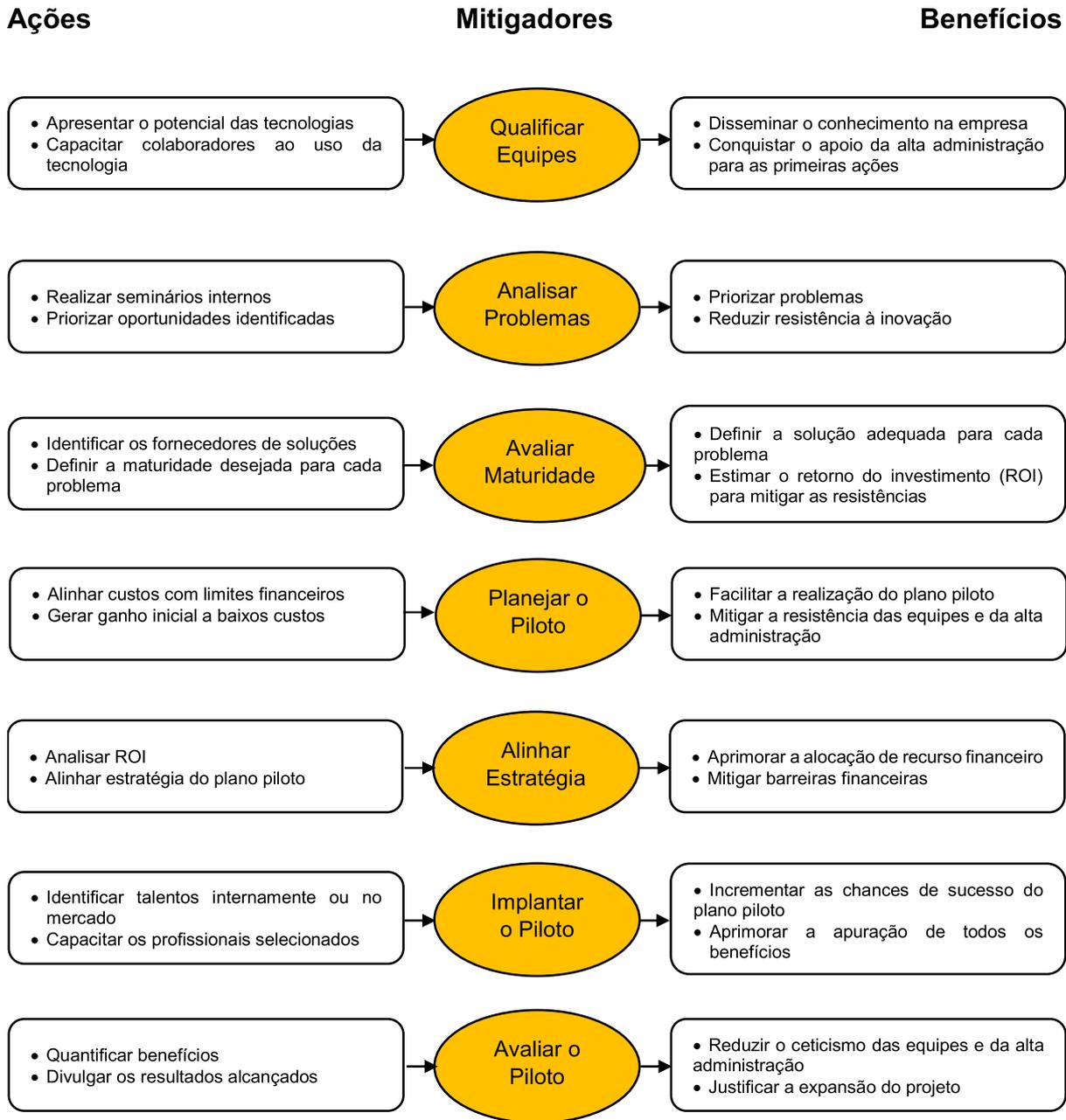


Figura 2 - Codificação dos resultados

A análise da conexão entre as barreiras derivadas da literatura e os mitigadores identificados a partir do estudo foi realizada na segunda rodada de entrevistas. Nesta fase, os entrevistados indicaram quais das barreiras, econômicas, de recursos humanos, técnicas e gerenciais, poderiam ser mitigadas por grupos de mitigadores (ver Quadro 7). A análise do referido quadro indica que a mitigação da barreira cultural exige considerar todos os grupos de ações indicados na Figura 2. Na opinião dos entrevistados, a não consideração dos múltiplos mitigadores

identificados pode perpetuar essa barreira. Em contraste, a mitigação de outras barreiras parece ser mais simples. É o caso das barreiras relacionadas à incerteza do ROI (Retorno do Investimento), à falta de RH qualificado ou a um modelo de parceria. A mitigação dessas barreiras requer atenção a apenas dois grupos de mitigadores. Outras barreiras podem exigir a consideração de diferentes mitigadores. Em suma, os entrevistados entendem que mitigar uma barreira requer a adoção de mais de um conjunto de ações mitigadoras. A análise no Quadro 7 também indica que a maioria das barreiras pode ser mitigada durante a avaliação do plano piloto. Duas outras ações parecem mitigar várias barreiras: avaliação da maturidade e implantação do plano piloto. Apesar da importância da qualificação das equipes, a atenção a essa ação só ajuda a mitigar a falta de RH qualificado ou a falta de vontade de inovar. O Quadro 7 aponta todas as barreiras apresentadas na literatura e os grupos de ações que podem mitigar essas barreiras.

Quadro 7 - Barreiras à Indústria 4.0 e seus mitigadores.

Codificação	Barreiras adaptadas da literatura	Mitigadores identificados no estudo						
		Qualificação da equipe	Análise do problema	Avaliação da maturidade	Plano Piloto	Alinhamento estratégico	Implantação do piloto	Avaliação do piloto
Econômica	Altos Custos				X	X		X
	Incerteza ROI			X				X
Recursos Humanos	Falta de RH qualificados	X					X	
	Barreiras culturais	X	X	X	X	X	X	X
	Resistência da alta administração		X		X			X
Técnica	Dúvida no processo			X			X	X
	Dúvida nos dados			X			X	X
	Dúvida na tecnologia			X			X	X
	Questão de Integração				X		X	X
Gerencial	Falta de um modelo para Indústria 4.0				X	X		X
	Falta de um modelo para parcerias				X			X

4.2 COMO E QUANDO APLICAR MITIGADORES

A análise dos resultados no contexto do cenário complexo também revelou a ordem em que as mitigações podem ser orquestradas. A análise desta sequência permitiu a estruturação de uma sistemática de planejamento para a adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0. As etapas dessa sistemática são: 1) qualificar equipes para aprimorar o conhecimento; 2) analisar e priorizar problemas que podem ser resolvidos com tecnologia; 3) avaliar e definir a maturidade desejada; 3) planejar o piloto para reduzir custos de implantação; 4) Alinhar estrategicamente a proposta de adoção de tecnologias com os objetivos organizacionais; 6) implementar o piloto; 7) avaliar o piloto com base nos resultados para futura expansão do projeto. A consideração dessas relações levou à proposição da sistemática apresentada na Figura 3. Este modelo apresenta a sequência sugerida para a consideração de cada um dos mitigadores identificados.

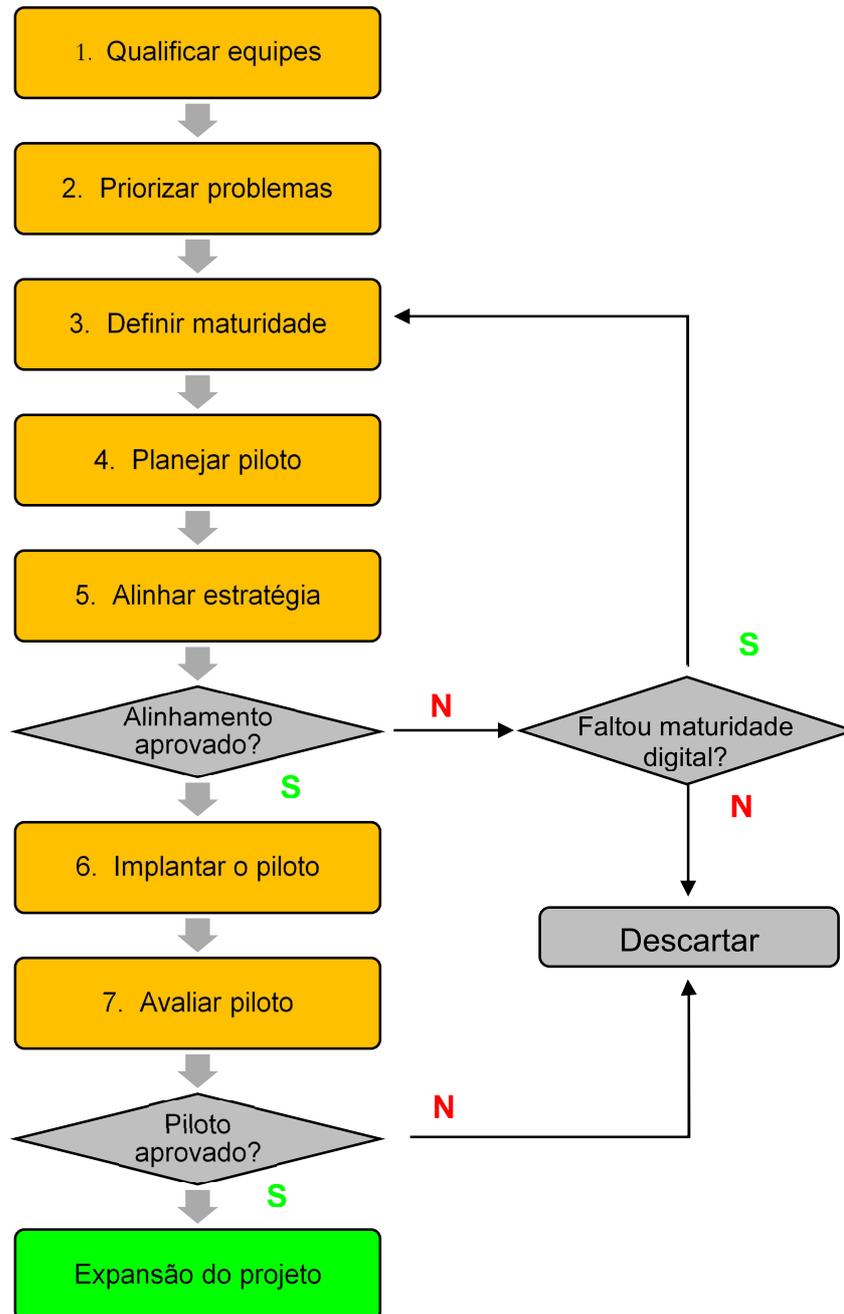


Figura 3 – Sistemática de Planejamento para Adoção de Tecnologias no Contexto da Indústria 4.0

Os detalhes sobre os mitigadores e a sequência sugerida para sua abordagem são apresentados a seguir.

4.2.1 Qualificação da equipe

A qualificação das equipes quanto ao potencial da adoção das novas tecnologias é o primeiro passo para mitigar as barreiras da Indústria 4.0. Trata-se de apresentar os potenciais das tecnologias aos colaboradores internos. O treinamento com esse foco aprimora o próximo passo, analisando problemas que podem ser resolvidos com novas tecnologias. Além do foco na aplicação, a melhoria interna requer o apoio da alta administração. A alta administração pode demonstrar esse apoio em conversas com líderes em diferentes níveis da empresa. Nessas conversas, a alta administração precisa perguntar sobre novas tecnologias. Essas perguntas levam esses líderes a buscar informações junto a fornecedores, profissionais ou pessoas com reconhecida experiência na área. A apresentação das conclusões destes inquéritos aumenta a difusão interna do conhecimento, facilitando a aceitação futura de novas soluções. Essas apresentações devem ser feitas em eventos internos. O laboratório de conhecimento da Empresa A é um espaço interno onde acontecem esses eventos. Um desenho futurista do laboratório ajuda a criar um ambiente propício para a geração e discussão de ideias. As visitas regulares da alta administração a esses espaços também contribuem para melhorar a disseminação do conhecimento nesses espaços. Abaixo estão exemplos de citações pertinentes dos entrevistados que ilustram esses pontos:

"Os debates no laboratório disseminam o conhecimento de forma barata e rápida."
(Gestor MA)

"O design do nosso espaço tenta mostrar às pessoas que algo novo precisa ser desenvolvido." (Gestor MB)

"O Engajamento de lideranças é fundamental para engajar os colaboradores no processo de qualificação para adoção das novas tecnologias." (Gestor MN)

4.2.2 Análise do problema

A qualificação das equipes abre espaço para a análise dos problemas que podem ser resolvidos por meio das novas tecnologias. Cabe a alta administração sugerir alguns pontos focais, por exemplo, paradas de linha, manuseio de materiais, controle de qualidade e demandas do cliente. Dados e fatos sobre problemas ajudam a reduzir a resistência à inovação em todos os níveis hierárquicos. Além disso, os problemas precisam ser priorizados. Essa priorização deve considerar o alinhamento entre os objetivos organizacionais e o possível benefício advindo de sua solução. As conclusões desse alinhamento precisam ser discutidas em seminários internos. Nesses seminários, as pessoas devem ser estimuladas a questionar os problemas e sua priorização. A presença da alta administração ao final do questionamento ajuda a melhorar as discussões. Além de demonstrar interesse nas discussões, a alta administração precisa definir quais problemas devem ser abordados na próxima fase. Abaixo estão exemplos de citações pertinentes dos entrevistados que ilustram esses pontos:

“Projetos percebidos como uma oportunidade, seja para aumentar a produtividade ou reduzir o quadro de funcionários, são apresentados a alta administração.” (Gestor MN)

“O foco da inovação é atender o que o cliente demanda.” (Gestor MH)

“Você deve priorizar os problemas mais importantes.” (Manager MM)

4.2.3 Avaliação da maturidade

Na avaliação da maturidade digital da empresa, cada problema priorizado pela alta administração inicia a busca de soluções com fornecedores, *startups* ou concorrentes. Essa pesquisa ajuda a reduzir o tempo gasto no entendimento, aprimoramento e aplicação das tecnologias da Indústria 4.0. Vários pares

tecnológicos problema/solução podem ser identificados nesta busca. Esses pares são então submetidos a uma análise de custo-benefício. As declarações de análise comparam o estágio de maturidade digital atual com o estágio de maturidade que poderia ser alcançado com cada solução e o retorno do investimento (ROI) estimado. A alta administração precisa saber que as ferramentas de análise melhoram o resultado desta etapa e indicam que o problema pode ser resolvido adotando uma solução mais barata. Abaixo estão alguns exemplos de citações pertinentes de entrevistados que ilustram esses pontos:

“Parcerias com fornecedores de tecnologia robótica ajudaram a personalizar o pedido, interface interativa e gamificada.” (Gestor MH)

“Mostrei nossa carga a um parceiro e ele sugeriu usar os robôs. Esta solução eliminou problemas de ergonomia e segurança.” (Gestor MG)

“...conversas com a alta administração pode garantir que você trabalhe em algo que não será terceirizado.” (Gestor MB)

4.2.4 Plano piloto

Cada par problema/solução requer um plano piloto. Um bom plano precisa gerar um ganho inicial a custos baixos. O plano precisa alinhar os custos iniciais com os limites de recursos financeiros autorizados pelos gerentes intermediários (o que não exige a aprovação por escrito da alta administração). A redução de custos pode ser viabilizada por meio da proposição de parcerias com *startups* ou provedores de soluções. Considerando que esses parceiros precisam de cases de sucesso para alavancar novas vendas, o gerente do projeto pode: 1) solicitar a instalação da solução sem custo (demonstração); ou 2) propor que a solução seja alugada (na fase de avaliação). Essas opções podem reduzir o investimento inicial e permitir que o comprador quantifique o ganho real de uma solução sem gastar muito dinheiro. Essa quantificação permite uma melhor análise do ROI proporcionado pela solução. Uma quantificação mais confiável pode facilitar a liberação futura de

recursos adicionais pela alta administração. Os resultados também indicam que consultar a alta administração ajuda a melhorar o plano que está sendo elaborado, facilita sua aprovação futura e reduz a rejeição da nova tecnologia. Abaixo estão exemplos de citações pertinentes de entrevistados que ilustram esses pontos:

"... uma maior inovação exige pequenos projetos. Isso facilita a aprovação." (Gestor MM)

"O aluguel de robôs eliminou a necessidade de um grande investimento inicial, facilitando a aprovação do projeto." (Gestor MG)

4.2.5 Alinhamento estratégico

A participação de um representante da alta administração nas etapas anteriores não garante a aprovação do plano piloto. Conforme determinado, vários planos podem não se alinhar com o mesmo recurso financeiro. Essas disputas são resolvidas na etapa de alinhamento estratégico. Nesta etapa, a alta administração analisa o ROI e a contribuição estratégica de cada plano ao longo de um ano. Alguns planos podem ser aprovados verbalmente, por exemplo, planos com ROI em até um ano ou cujo custo se enquadre nos limites das despesas autorizadas pelos gestores de nível médio. Aprovação verbal pela alta administração garante o alinhamento estratégico e reduz a burocracia na tomada de decisões.

Por outro lado, planos com ROI mais significativo que um ano exigem aprovação por escrito da alta administração. Esses planos podem ser aprovados se indicarem sua contribuição para a consecução dos objetivos estratégicos da empresa. Os achados também indicam que a preferência por um ROI de até um ano é uma barreira para a Indústria 4.0, pois o custo de muitas soluções inviabiliza o ROI em um período tão curto. Abaixo está exemplo de citação pertinente de entrevistado que ilustra esse ponto:

“Os diretores se concentram no ROI. Assim, os gestores precisam entender os limites de seus superiores antes de propor qualquer coisa.” (Gestor MD)

4.2.6 Implantação do piloto

A implementação piloto requer equipes qualificadas. Para isso, as empresas buscam talentos interna e externamente (de fornecedores ou concorrentes). Os escolhidos devem ser capazes de preencher as lacunas de conhecimento necessárias para a implementação de novas tecnologias. Além de prospectar talentos, pode ser necessário treinar os profissionais escolhidos. Os achados indicam que esse treinamento aumenta o engajamento das equipes e beneficia toda a nova tecnologia ou solução. Abaixo está exemplo de citação pertinente de entrevistado que ilustra esse ponto:

“Investimos nas equipes para gerar um sentimento de pertencimento, ... para que os colaboradores se sintam "donos" do negócio.” (Gestor MN)

4.2.7 Avaliação do piloto

A avaliação dos resultados do piloto é a última etapa do plano digital. A divulgação de resultados positivos contribui para diminuir o ceticismo da alta administração e a resistência dos demais colaboradores às tecnologias da Indústria 4.0. A redução do ceticismo da alta administração impacta positivamente as futuras decisões estratégicas da empresa, o eventual redesenho do modelo de negócios ou as futuras avaliações de investimentos. Os resultados positivos podem justificar a expansão do projeto para outros produtos, processos ou divisões. Por outro lado, a inviabilidade dos resultados esperados exige uma reavaliação das etapas anteriores. Essa reavaliação define se a empresa eliminará barreiras não resolvidas ou se a

solução será abandonada. Abaixo estão exemplos de citações pertinentes dos entrevistados que ilustram esses pontos:

“A empresa deve usar os resultados para alavancar novos projetos, para criar a cultura.” (Gestor MH)

“... analisar o que foi feito, onde deveria estar... qual foi o resultado esperado.”
(Gestor MN)

5 DISCUSSÃO

Os mitigadores constituem forças motrizes que ajudam a remover as barreiras apresentadas na literatura. Entender como esses mitigadores reduzem as barreiras ajuda a desvendar novas oportunidades de emprego e renda para as empresas e melhorar as decisões estratégicas relacionadas a novas soluções. Esses mitigadores precisam ser aplicados em uma sequência lógica. Chamamos essa sequência de Sistemática de Planejamento para Adoção de Tecnologias no Contexto da Indústria 4.0. As etapas dessa sistemática incluem qualificar pessoas, selecionar e priorizar problemas, definir a maturidade desejada, reduzir custos do piloto, alinhar o par problema/solução com a estratégia da empresa e implementar e avaliar o piloto. As contribuições dos resultados desta Tese são apresentadas a seguir.

5.1 QUALIFICAÇÃO, TRABALHO E RENDA

A formação para compreender o potencial das tecnologias e a posterior análise dos problemas que estas tecnologias podem resolver apresenta-se como o primeiro passo para direcionar a requalificação dos trabalhadores. Ao compreender o potencial das tecnologias e indicar problemas, esses profissionais se diferenciam dentro da organização. Essa diferenciação pode revelar novas oportunidades de trabalho e renda para os profissionais da empresa. Os achados contribuem indicando como a adaptação dos profissionais do mercado às novas tecnologias pode ser iniciada (COMMISSIONEUROPEAN, 2021; NEUMANN et al., 2021). Antecipar oportunidades de trabalho e renda pode despertar o interesse das pessoas por habilidades que lhes permitam explorar tais oportunidades. Esse achado contribui indicando que o despertar desse interesse é um requisito essencial para mitigar a falta de recursos humanos qualificados (HORVÁTH; SZABÓ, 2019; KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; STENTOFT et al., 2020). Este estudo também contribui ao sugerir que treinamentos focados no entendimento de tecnologia e problemas aliados ao suporte da alta administração podem ajudar as empresas a criar novos modelos de negócios (DEMETER, 2021; MENDONÇA;

FRANK; MEINDL, 2021; SHET; PEREIRA, 2021), bem como pode ajudar a melhorar o desenvolvimento de estratégias com foco em tecnologias digitais (MUBARAK; PETRAITE, 2020). Esses achados ajudaram a estruturar as seguintes proposições:

Proposição 1 - A capacitação para entender o potencial das tecnologias seguida da análise dos problemas que essas tecnologias podem solucionar permite que os profissionais identifiquem novas oportunidades de trabalho e renda para suas carreiras.

Proposição 2 - A identificação de novas oportunidades de trabalho e renda motiva os profissionais a se requalificarem e reduzirem sua oposição a novas soluções.

Profissionais interessados em prospectar novas oportunidades de trabalho e renda parecem estar mais engajados em identificar informações precisas e confiáveis sobre os problemas que podem ser resolvidos pelas novas soluções e os benefícios relacionados a essas soluções. Uma melhor informação sobre o par problema/solução ajuda a melhorar a quantificação dos ganhos da nova solução para a empresa. A análise da alta administração sobre esses ganhos pode mitigar a incerteza da alta administração sobre o ROI. Esse achado indica que a atenção ao futuro dos profissionais ajuda a melhorar as informações relacionadas aos resultados que provavelmente serão fornecidos pela inovação em análise (REICHSTEIN; AALEN, 2019; YANG; FU; ZHANG, 2021). Esses achados ajudaram a estruturar a seguinte proposição:

Proposição 3 - Profissionais que percebem novas oportunidades de trabalho e renda fornecem melhores informações sobre o impacto da tecnologia, o que melhora a tomada de decisões estratégicas.

A implantação de um piloto de solução exige a requalificação dos profissionais da empresa compradora. É uma qualificação focada na tecnologia a ser operacionalizada. Essa qualificação pode influenciar positivamente a cultura da organização compradora e mitigar as barreiras culturais (MUBARAK; PETRAITE, 2020). A participação da alta administração e o contato com provedores de soluções digitais também impactam positivamente a mudança cultural e podem contribuir para

aumentar a agilidade, adaptabilidade e resiliência organizacional ao enfrentar os desafios da Indústria 4.0 (HAN; TRIMI, 2022). Diferentes qualificações profissionais são necessárias ao longo do processo de análise e implantação de soluções. Esse achado contribui ao indicar que compreender o tipo e o momento de requalificação dos profissionais da empresa pode auxiliar na resistência interna à mudança (DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; KAMBLE; GUNASEKARAN; DHONE, 2020; MUBARAK; PETRAITE, 2020), bem como gerando ganhos para os parceiros (KAMOLSOOK; BADIR; FRANK, 2019; OSSEWAARDE, 2019). Esses achados ajudaram a estruturar a seguinte proposição:

Proposição 4 - A atenção aos diferentes focos de qualificação profissional ao longo da implementação de uma tecnologia mitiga a resistência interna à mudança.

5.2 TOMADA DE DECISÃO

Os achados revelam que a mitigação de uma barreira requer ações diferenciadas na análise e implementação de novas soluções. Além disso, a mitigação de uma barreira pode exigir a remoção prévia de outra barreira. Esses achados sugerem a existência de um fluxo de ações que pode ajudar a melhorar as decisões táticas e estratégicas das empresas. Esse achado contribui indicando uma estrutura que permite às empresas melhorar sua tomada de decisão na gestão de mudanças relacionadas às tecnologias da Indústria 4.0 (IVANOV et al., 2021; RAJ et al., 2019; YANG; FU; ZHANG, 2021), bem como no planejamento para a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 (CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; RAJ et al., 2019; YANG; FU; ZHANG, 2021). Esses achados ajudaram a estruturar a seguinte proposição:

Proposição 5 - A sequência de aplicação dos mitigadores pode melhorar as decisões táticas e estratégicas relacionadas a novas soluções.

A análise conjunta do problema, das diferentes tecnologias que podem resolver o problema e dos objetivos estratégicos da empresa permitem identificar

várias opções de maturidade. Este estudo contribui indicando que a seleção do nível de maturidade que melhor se adequa às necessidades da empresa pode mitigar a insegurança da alta administração sobre a viabilidade do ROI, ou que a análise de todas as opções de maturidade pode remover (ou adicionar) barreiras às tecnologias disruptivas (KOHTAMÄKI et al., 2020; PARIDA; SJÖDIN; REIM, 2019). Analisar as diferentes opções também pode melhorar a seleção da opção mais adequada ao porte da organização (RAFAEL et al., 2020) ou planejar a adoção gradual de soluções (MUBARAK; PETRAITE, 2020). A análise dos achados relacionados à maturidade digital orientou a definição das proposições abaixo.

Proposição 6 - A análise do nível de maturidade mais adequado para a empresa pode revelar opções tecnológicas mais diretas ou remover barreiras para tecnologias mais complexas e caras.

Proposição 7 - Mitigar a insegurança sobre novas tecnologias requer analisar todas as opções de maturidade que a empresa pode explorar.

O planejamento piloto ajuda a reduzir os custos incorridos pela empresa compradora ao avaliar a solução mais adequada ao problema da empresa. Esta redução está sujeita à revisão das ofertas dos fornecedores. Essa constatação indica que os provedores de soluções precisam melhorar suas ofertas (BREGE; KINDSTRÖM, 2020; TOMASZ; KAJIKAWA, 2021), para criar condições que possibilitem a instalação piloto dessas soluções. O estudo também indica que a instalação piloto pode aumentar a confiança do comprador (KLEINALTENKAMP et al., 2019). O planejamento piloto também parece constituir um passo intermediário e essencial para convencer a alta administração. Essa constatação também contribui ao indicar que esse estágio intermediário ajuda a mitigar o ceticismo dos gestores e da alta administração (BLASCO-ARCAS et al., 2020; CONDUIT et al., 2019), bem como preparar melhor a empresa compradora para lidar com possíveis falhas (SHET; PEREIRA, 2021). Esses achados ajudaram a estruturar as seguintes proposições:

Proposição 8 - Fornecedores que reduzem os custos incorridos pelo cliente durante a instalação piloto têm maior probabilidade de fechar uma venda futura de suas soluções.

Proposição 9 - O envolvimento da alta administração no planejamento piloto melhora a compreensão desses profissionais sobre o problema/opção de maturidade, ajudando a reduzir a resistência desses gestores à nova tecnologia.

Na fase de alinhamento estratégico, a alta administração determina se o plano de instalação piloto deve ser implementado ou não. A aprovação é facilitada se o ROI estimado for verificado dentro de um ano ou se os custos estiverem dentro dos limites da autoridade dos gerentes de nível médio. Essas descobertas sugerem como os vendedores podem melhorar suas propostas de negócios. Os achados também contribuem ao indicar que uma proposta que considere os elementos listados pode aumentar o engajamento dos parceiros em novas soluções digitais (HARDWICK et al., 2019; TAYLOR et al., 2020) ou facilitar a prospecção de outros clientes que possuem limitações financeiras (CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; JAAKKOLA; ALEXANDER, 2014). A análise dos achados relacionados ao alinhamento estratégico orientou a definição das proposições abaixo.

Proposição 10 - Adaptar as ofertas de soluções com base no ROI de menos de um ano ou nos limites da autoridade gerencial ajuda a remover a barreira financeira para a nova solução.

Proposição 11 - Soluções com ROI maior que um ano ou fora dos limites da autoridade dos gestores enfrentam barreiras mais significativas com a organização compradora.

5.3 O PROCESSO

O processo permite que as empresas adotem conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 para tornar suas tomadas de decisão mais assertivas, tanto no nível estratégico quanto no tático. Os resultados desta Tese contribuem para preencher a lacuna sobre a ausência de uma estratégia de planejamento para adoção de tecnologias da Indústria 4.0 (IVANOV et al., 2021; RAJ et al., 2019), bem como indicam os passos a serem observados pelas empresas interessadas em absorver inovações (MUBARAK; PETRAITE, 2020). A atenção a esse processo pode ajudar os gestores a selecionar as tecnologias mais adequadas para a realidade da empresa. Entre os benefícios de uma seleção bem-sucedida está a melhoria da colaboração interna por meio do fornecimento de informações em tempo real (HAN; TRIMI, 2022) ou a melhoria dos relacionamentos e ganhos financeiros por meio da gestão sustentável (YU et al., 2021). Com base nessas premissas, sugere-se uma abordagem de gestão estratégica para explorar a seguinte proposição.

Proposição 12 – O processo de planejamento para adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0 pode melhorar as decisões tomadas, bem como os ganhos da empresa.

A análise do processo proposto sugere que a análise de maturidade e a redução do custo piloto são pontos de partida para mitigar a barreira do ROI. A combinação de análise de maturidade e avaliação piloto contribui para eliminar as dúvidas da alta administração sobre ROI, mitigando assim a barreira relacionada aos custos da solução ou as dúvidas de custo-benefício. Esses achados contribuem sugerindo que a combinação de etapas do processo pode facilitar a aprovação de altos investimentos ou revelar soluções baratas (KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016; RAJ et al., 2019). Além disso, o roteiro identificado pode ajudar as empresas a reduzir riscos e garantir ganhos financeiros, mitigando barreiras econômicas e financeiras que impactam o desempenho e a adoção de novas tecnologias (CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; RAJ et al., 2019; YANG; FU; ZHANG, 2021). Esses achados ajudaram a estruturar as seguintes proposições:

Proposição 13 – É preciso qualificar o recurso humano para identificar problemas e oportunidades de trabalho e definir o melhor nível de maturidade.

Proposição 14 – É preciso planejar um piloto e aprová-lo (ou não) junto a alta administração.

Proposição 15 – Um piloto aprovado deve ser implementado e ter seus ganhos profundamente avaliados para justificar o investimento.

6 CONCLUSÃO

A adoção da Indústria 4.0 enfrenta barreiras que dificultam e oneram sua implantação e podem impactar na aprovação de novos projetos. Esta Tese contribui para a literatura sugerindo uma sistemática de planejamento para a adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0. Tais contribuições deram origem a uma sistemática conceitual para mitigar as barreiras à adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0 em empresas manufatureiras, conforme mostrado na Figura 3. Essa sistemática conceitual fornece três insights principais.

Primeiramente, a estrutura conceitual está fundamentada em três etapas, conforme mostra o modelo de estudo da Figura 1, onde são apresentadas as barreiras à adoção de tecnologias, mitigadores para superação de barreiras e redução do cenário complexo de adoção de tecnologias da Indústria 4.0. A primeira etapa apresenta a importância de um amplo entendimento das barreiras econômicas, humanas, técnicas e gerenciais que dificultam a adoção das tecnologias da Indústria 4.0. Compreender as barreiras torna-se essencial para uma melhor compreensão e acompanhamento dos problemas e dificuldades. A segunda etapa apresenta a necessidade de compreender as ações mitigadoras que permitem a superação das barreiras identificadas. Compreender profundamente as ações de mitigação é essencial para o sucesso de adoção das tecnologias da Indústria 4.0, visto que capacita a tomada de decisão tornando-a mais assertiva sobre quais ações e em que fase devem ser aplicadas para mitigar barreiras para obter a melhor relação custo-benefício. A compreensão desses mitigadores também pode ajudar na identificação de como e quando quais recursos humanos qualificar para gerar novas oportunidades de trabalho e renda para seus profissionais. A terceira etapa coloca foco na redução da complexidade decorrente da ampla gama de interações entre os atores, que muitas vezes impactam questões financeiras, recursos humanos, aspectos técnicos e gerenciais. Essa orquestração entre etapas permite aprimorar as ações de gestão para a tomada de decisões no controle e mitigação de barreiras.

Em segundo lugar, a sistemática proposta inter-relaciona ações mitigadoras com barreiras econômicas, humanas, técnicas e gerenciais e apresenta quais barreiras na literatura podem ser mitigadas por uma ou por um conjunto de ações mitigadoras, conforme mostrado na Figura 2 e Quadro 7. Esses mitigadores são

considerados forças motrizes que permitem melhorar o processo de adoção das tecnologias da Indústria 4.0, bem como alavancar a sua disseminação.

Em terceiro lugar, a sistemática de planejamento para a adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0, Fig. 3, contribui indicando como e quando as ações mitigadoras devem ser empregadas para mitigar as barreiras à adoção de novas tecnologias. O conjunto de ações apresentado na Fig. 2 e na Tabela 7, juntamente com as etapas da Fig. 3, permitem responder a RQ 1: Como mitigar as barreiras às tecnologias da Indústria 4.0 em empresas de manufatura?

Quando aplicada e disposta sequencialmente, a sistemática apresentada pode contribuir para melhorar o processo de tomada de decisão nos níveis tático e estratégico (média gestão e alta gestão), permitindo nos responder a RQ 2: Como melhorar as decisões táticas e estratégicas para garantir os ganhos esperados das tecnologias da Indústria 4.0?

Esta Tese ainda busca contribuir com a literatura com a publicação de um artigo em um periódico de ponta. Foi submetido um artigo ao periódico *Technological Forecasting and Social Change*, classificado como A1, na área de avaliação Engenharias III do Qualis Periódicos, da Plataforma Sucupira da Capes. O Artigo foi submetido no final do mês de dezembro, com o título "*Planning and implementing technologies: A process to improve tactical and strategic decision making*" e seu *status* atual está com o Editor.

6.1 CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS

Esta Tese contribui para preencher uma lacuna na literatura que ainda não está clara sobre "como" e "quando" cada uma das ações mitigadoras deve ser aplicada para reduzir às barreiras à adoção da Indústria 4.0.

A sistemática proposta, de planejamento para a adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0, contribui apontando "quais" as ações mitigadoras a serem aplicadas (conjunto de ações mitigadoras identificadas por meio de revisão de literatura e pesquisa de campo); "como" aplicar essas ações mitigadoras; e "quando" é o melhor momento para aplicar cada ação de mitigação (lógica de sequenciamento de etapas).

Portanto, entende-se que esta Tese contribui para a literatura relacionada à Indústria 4.0 de três formas: a) identificando e propondo um conjunto de ações que ajudam a mitigar barreiras à adoção da Indústria 4.0; b) com a proposição de uma sistemática, com etapas sequenciais para adoção das tecnologias da Indústria 4.0, a qual é novidade na literatura existente; e c) a execução lógica e sequencial das etapas da sistemática pode melhorar o processo de tomada de decisão (nos níveis estratégico e tático) e a implementação de soluções que contribuam para mitigar a rejeição de novas tecnologias em diferentes níveis hierárquicos de a empresa.

6.2 IMPLICAÇÕES PRÁTICAS E GERENCIAIS

Os resultados da aplicação da sistemática de planejamento para a adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0 pode oferecer várias contribuições para os profissionais da indústria. Dentre estas contribuições destacam-se a redução de dúvidas e incertezas sobre o ROI, sobre a necessidade de altos investimentos, sobre o desempenho da alta administração, em relação a necessidade de cultura digital e também da maturidade da tecnologia existente.

O conjunto de ações propostas pela sistemática, juntamente com sequenciamento das etapas pode permitir que os gestores tenham uma melhor compreensão das dificuldades impostas pelas barreiras no dia a dia da empresa. Logo, a escolha de direcionadores adequados para mitigar as barreiras identificadas torna-se mais assertiva, como por exemplo com ações para a requalificação da equipe direcionada às tecnologias a serem adotadas, com a priorização dos problemas alinhados com os objetivos organizacionais e obtenção do ROI de sua resolução e com a redução de custos através do estabelecimento de parcerias, entre outros.

Ademais, importante ressaltar que a sistemática proposta também pode servir como um roteiro orientativo para gestores indústrias na implementação de iniciativas e soluções da Indústria 4.0. Tanto gestores como profissionais e lideranças que estão diretamente envolvidos no processo de adoção ou gestão de tecnologias no contexto da Indústria 4.0 podem utilizar a sistemática proposta para minimizar os riscos e reduzir o desperdício de recursos em projetos que podem não ter sucesso,

principalmente no tocante a melhorar a tomada de decisão, tática e estratégica, associada ao melhor momento do “como” e “quando” cada uma das ações mitigadoras devem ser aplicadas minimizar às barreiras encontradas no processo de adoção de tecnologias da Indústria 4.0.

Além disso, a sistemática ao focar suas ações para aprimorar o planejamento para adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0 de forma mais organizada, contribui para alcançar um maior índice de sucesso na implementação, principalmente valorizando aspectos como estratégia para projetos de inovação, redução da falta de habilidades e competências, transformação de dentro para fora, foco em resultados e engajamento de lideranças.

6.3 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Este estudo propõe uma sistemática de planejamento para a adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0. Trata-se de um estudo qualitativo, de caráter exploratório, com resultados de empresas que atuam em nível nacional e global e possuem fábricas na região sul do Brasil. Como qualquer pesquisa, possui limitações que podem servir como oportunidades para trabalhos futuros. Uma das limitações que podem ocasionar um possível viés, foi a utilização de apenas um entrevistado por empresa. A dificuldade de acesso às empresas e informações muitas vezes consideradas estratégicas, foi um limitante encontrado na pesquisa.

Futuros estudos podem utilizar a sistemática proposta para avaliar os resultados obtidos na sua adoção. Ademais, futuros estudos quantitativos também podem ser desenvolvidos para validar as proposições desta Tese. Além disso, futuros estudos podem ser desenvolvidos para avaliar a aplicação da sistemática em empresas com diferentes estágios de maturidade, principalmente como eles impactam e influenciam a adoção das tecnologias disruptivas. Estudos futuros também podem ainda avaliar como a qualificação, integração e engajamento das equipes em diferentes níveis decisórios, táticos e estratégicos podem melhorar o impacto social e econômico da adoção das tecnologias da Indústria 4.0.

Por fim, sugere-se que pesquisas futuras também possam avaliar diferenças no desempenho da sistemática em diferentes segmentos da indústria ou setores

específicos da economia, bem como, estender a pesquisa a empresas de diferentes regiões e países, incluindo economias desenvolvidas e em desenvolvimento, para observar as percepções de diferentes culturas, modelos de negócios e perfil de profissionais.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, M. et al. **Industry 4.0: Reimagining manufacturing operations after COVID-19 | McKinsey**. [s.l: s.n.].

ARDITO, L. et al. Towards Industry 4.0. **Business Process Management Journal**, v. 25, n. 2, p. 323–346, abr. 2019.

ASTRID, J. et al. Industry 4 . 0 framework for management and operations : a review. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, v. 9, n. 3, p. 789–801, 2018.

BAENA, F. et al. Learning Factory: The Path to Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 9, p. 73–80, 2017.

BEATRIZ, A. et al. Technological Forecasting & Social Change When titans meet – Can industry 4 . 0 revolutionise the environmentally- sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 132, n. February, p. 18–25, 2018.

BLASCO-ARCAS, L. et al. Organizing actor Engagement: A platform perspective. **Journal of Business Research**, v. 118, n. November 2018, p. 74–85, 2020.

BREGE, H.; KINDSTRÖM, D. Exploring proactive market strategies. **Industrial Marketing Management**, v. 84, n. May 2019, p. 75–88, maio 2020.

BREUNIG, M. et al. Getting the most out of paradata. **The Palgrave Handbook of Survey Research**, n. June 2015, p. 193–198, 2017.

BUER, S. V.; STRANDHAGEN, J. O.; CHAN, F. T. S. The link between industry 4.0 and lean manufacturing: Mapping current research and establishing a research agenda. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 8, p. 2924–2940, 2018.

BUNTZ, B. **Top 10 Barriers for Adoption of the Internet of Things** [slotworldtoday.Com](https://www.thingiverse.com/thing:1000000), 2016. Disponível em: <<https://www.thingiverse.com/thing:1000000>>

CHAKER, N. N.; ZABLAH, A. R.; NOBLE, C. H. More than one way to persist : Unpacking the nature of salesperson persistence to understand its e f f e c t s on performance. v. 71, n. December 2017, p. 171–188, 2018.

CHIARINI, A.; BELVEDERE, V.; GRANDO, A. Industry 4.0 strategies and technological developments. An exploratory research from Italian manufacturing companies. **Production Planning and Control**, v. 0, n. 0, p. 1–14, 2020.

CHOI, T. Y.; DOOLEY, K. J.; RUNGTUSANATHAM, M. Supply networks and complex adaptive systems: Control versus emergence. **Journal of Operations Management**, v. 19, n. 3, p. 351–366, 2001.

CIMINI, C. et al. How do industry 4.0 technologies influence organisational change? An empirical analysis of Italian SMEs. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 2020.

COLLI, M.; STINGL, V.; WAEHRENS, B. V. Making or breaking the business case of digital transformation initiatives: the key role of learnings. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 33, n. 1, p. 41–60, 2022.

COMMISSIONEUROPEAN. **centric and resilient European industry**. [s.l.: s.n.].

CONDUIT, J. et al. Business actor engagement: Foundations, developments and opportunities. **Industrial Marketing Management**, v. 80, n. April, p. 1–3, 2019.

CORBIN, J.; STRAUSS, A. **Basics of qualitative research: Techniques and procedures for developing grounded theory**. [s.l.] Sage Publications, 2007.

CORBIN, J.; STRAUSS, A. L. **Basics of qualitative research: Grounded theory procedures and techniques**. 2nd editio ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, Inc, 1990.

CORREANI, A. et al. Implementing a Digital Strategy: p. 37–56, 2020.

CUGNO, M.; CASTAGNOLI, R.; BÜCHI, G. Technological Forecasting & Social Change Openness to Industry 4 . 0 and performance : The impact of barriers and incentives. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 168, p. 120756, 2021.

CULOT, G. et al. The future of manufacturing: A Delphi-based scenario analysis on Industry 4.0. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 157, n. December 2019, p. 120092, 2020.

CUNHA, T. P. et al. Proposal guidelines to implement the concepts of industry 4.0 into information technology companies. **TQM Journal**, v. 32, n. 4, p. 741–759, 2020.

DE SOUSA JABBOUR, A. B. L. et al. When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of

critical success factors. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 132, n. February, p. 18–25, 2018.

DEMETER, K. Road to digital manufacturing – a longitudinal case-based analysis. 2021.

EISENHARDT, K. M.; GRAEBNER, M. E. Theory Building From Cases: Opportunities And Challenges. **Academy of Management Journal**, v. 50, n. 1, p. 25–32, fev. 2007.

ERDMANN, R. H. Abordagens Alusivas À Teoria Da Complexidade. **Revista Contexto & Educação**, v. 20, n. 73–74, p. 9–40, 2013.

ESPINOSA, A.; PORTER, T. Sustainability, complexity and learning: Insights from complex systems approaches. **Learning Organization**, v. 18, n. 1, p. 54–72, 2011.

FERRIO, J.; WASSICK, J. Chemical supply chain network optimization. **Computers and Chemical Engineering**, v. 32, n. 11, p. 2481–2504, 2008.

FRANK, A. G.; DALENOGARE, L. S.; AYALA, N. F. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal of Production Economics**, v. 210, p. 15–26, 2019.

GARMS, F. et al. **Capturing value at scale in discrete manufacturing with Industry 4.0 | McKinsey**. [s.l: s.n.].

GEISSBAUER, R. et al. Industry 4.0 - Opportunities and challenges of the industrial internet. **strategy& Formerly Booz & Company, PwC**, v. 13, p. 1–51, 2014.

GEISSBAUER, R. et al. **Global Digital Operations Study 2018 - Digital Champions**. [s.l: s.n.].

GHADGE, A. et al. The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 31, n. 4, p. 669–686, 2020.

GHOBAKHLOO, M. Determinants of information and digital technology implementation for smart manufacturing. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 8, p. 2384–2405, 2020.

HADDUD, A. et al. Examining potential benefits and challenges associated with the Internet of Things integration in supply chains. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 28, n. Unit 07, p. 1–5, out. 2017a.

HADDUD, A. et al. Examining potential benefits and challenges associated

with the Internet of Things integration in supply chains. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 28, n. 8, p. 1055–1085, out. 2017b.

HALL, J.; MATOS, S.; SILVESTRE, B. Understanding why firms should invest in sustainable supply chains: A complexity approach. **International Journal of Production Research**, v. 50, n. 5, p. 1332–1348, 2012.

HAN, H.; TRIMI, S. Towards a data science platform for improving SME collaboration through Industry 4.0 technologies. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 174, n. January 2021, p. 121242, 2022.

HARDWICK, J. et al. Supplier-customer engagement for collaborative innovation using video conferencing: A study of SMEs. **Industrial Marketing Management**, v. 80, n. February, p. 43–57, 2019.

HIRSCHMAN, E. Humanistic inquiry in marketing research: Philosophy, method, and criteria. **Journal of Marketing Research**, v. 23, p. 237–249, 1986.

HORVÁTH, D.; SZABÓ, R. Z. Technological Forecasting & Social Change Driving forces and barriers of Industry 4 . 0 : Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities ? **Technological Forecasting & Social Change**, v. 146, n. March, p. 119–132, 2019.

HOYER, C.; GUNAWAN, I.; REAICHE, C. H. The Implementation of Industry 4.0 – A Systematic Literature Review of the Key Factors. **Systems Research and Behavioral Science**, p. 1–22, 2020.

HUNG, M. **IoT Implementation and Management — From the Edge to the Cloud: A Gartner Trend Insight Report (ID: G00350392)**, 2016.

IVANOV, D. et al. Researchers' perspectives on Industry 4.0: multi-disciplinary analysis and opportunities for operations management. **International Journal of Production Research**, v. 59, n. 7, p. 2055–2078, 2021.

IVANOV, D.; DOLGUI, A. Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles towards survivability. A position paper motivated by COVID-19 outbreak. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 10, p. 2904–2915, 2020.

JAAKKOLA, E.; ALEXANDER, M. The Role of Customer Engagement Behavior in Value Co-Creation : A Service System Perspective. v. 17, n. 3, p. 247–261, 2014.

KACHE, F.; SEURING, S. Challenges and opportunities of digital information at the intersection of Big Data Analytics and supply chain management.

International Journal of Operations and Production Management, v. 37, n. 1, p. 10–36, 2017.

KAGERMANN, H. et al. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0. Report, the Industrie 4.0 Working Group of Acatech. n. April, 2013.

KAMBLE, S.; GUNASEKARAN, A.; DHONE, N. C. Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 5, p. 1319–1337, mar. 2020.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A.; SHARMA, R. Analysis of the driving and dependence power of barriers to adopt industry 4.0 in Indian manufacturing industry. **Computers in Industry**, v. 101, n. July, p. 107–119, 2018.

KAMOLSOOK, A.; BADIR, Y. F.; FRANK, B. Technological Forecasting & Social Change Consumers ' switching to disruptive technology products : The roles of comparative economic value and technology type. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 140, n. December 2018, p. 328–340, 2019.

KAZANCOGLU, Y.; OZKAN-OZEN, Y. D. Analyzing Workforce 4.0 in the Fourth Industrial Revolution and proposing a road map from operations management perspective with fuzzy DEMATEL. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 31, n. 6, p. 891–907, 2018.

KIEL, D.; ARNOLD, C.; VOIGT, K. I. The influence of the Industrial Internet of Things on business models of established manufacturing companies – A business level perspective. **Technovation**, v. 68, n. July, p. 4–19, 2017.

KLEINALTENKAMP, M. et al. Collective engagement in organizational settings. **Industrial Marketing Management**, v. 80, n. February, p. 11–23, 2019.

KOHTAMÄKI, M. et al. Technological Forecasting & Social Change The relationship between digitalization and servitization: The role of servitization in capturing the financial potential of digitalization. v. 151, n. July 2019, 2020.

LEE, I.; LEE, K. The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. **Business Horizons**, v. 58, n. 4, p. 431–440, 2015.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. ScienceDirect A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4 . 0-based manufacturing systems. **MANUFACTURING LETTERS**, v. 3, p. 18–23, 2015.

LEURENT, H.; BOER, E. DE. **The Next Economic Growth Engine Scaling**

Fourth Industrial Revolution Technologies in Production. [s.l: s.n.].

LIAO, Y.-K. K.; WU, W.-Y. Y.; PHAM, T.-T. T. Examining the moderating effects of green marketing and green psychological benefits on customers' green attitude, value and purchase intention. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 18, p. 7461, set. 2020.

LIAO, Y. et al. Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 12, p. 3609–3629, 2017.

LOPES DE SOUSA JABBOUR, A. B. et al. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. **Annals of Operations Research**, v. 270, n. 1–2, p. 273–286, 2018.

MANAVALAN, E.; JAYAKRISHNA, K. Computers & Industrial Engineering A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4 . 0 requirements. v. 127, n. November 2017, p. 925–953, 2019.

MARTINEZ, F. Process excellence the key for digitalisation. **Business Process Management Journal**, v. 25, n. 7, p. 1716–1733, abr. 2019.

MCKINSEY&COMPANY. Industry 4.0 after the initial hype Where manufacturers are finding value and how they can best capture it. **Connotations : a Journal for Critical Debate**, v. 23, n. 1, p. 140, 2016.

MENDONÇA, J.; FRANK, A. G.; MEINDL, B. Technological Forecasting & Social Change The four smarts of Industry 4 . 0 : Evolution of ten years of research and future perspectives. v. 168, n. April, 2021.

MILES, M.B., HUBERMAN, A.M., 2004. **Qualitative Data Analysis: An Expanded Sourcebook, 2nd editio. ed. SAGE Publications, Inc, Thousand Oaks, CA.** [s.l: s.n.].

MOEUF, A. et al. Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 5, p. 1384–1400, mar. 2020.

MUBARAK, M. F.; PETRAITE, M. Technological Forecasting & Social Change Industry 4 . 0 technologies , digital trust and technological orientation : What matters in open innovation? **Technological Forecasting & Social Change**, v. 161, n. September, p. 120332, 2020.

MÜLLER, J. M. Assessing the barriers to Industry 4.0 implementation from a workers' perspective. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 13, p. 2189–2194, 2019.

MÜLLER, J. M.; BULIGA, O.; VOIGT, K. Technological Forecasting & Social Change Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4 . 0. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 132, n. January, p. 2–17, 2018.

MÜLLER, J. M.; KIEL, D.; VOIGT, K. I. What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 1, 2018.

NAJJAR, M.; YASIN, M. M. The management of global multi-tier sustainable supply chains: a complexity theory perspective. **International Journal of Production Research**, 2021.

NEUMANN, W. P. et al. International Journal of Production Economics Industry 4 . 0 and the human factor – A systems framework and analysis methodology for successful development. **International Journal of Production Economics**, v. 233, n. May 2020, p. 107992, 2021.

OESTERREICH, T. D.; TEUTEBERG, F. 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**, v. 83, p. 121–139, 2016.

OLY, N. et al. International Journal of Production Economics Small and medium manufacturing enterprises and Asia ' s sustainable economic development. **International Journal of Production Economics**, v. 233, n. October 2020, p. 107971, 2021.

OSSEWAARDE, M. Technological Forecasting & Social Change Digital transformation and the renewal of social theory : Unpacking the new fraudulent myths and misplaced metaphors. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 146, n. October 2018, p. 24–30, 2019.

OZTEMEL, E.; GURSEV, S. Literature review of Industry 4 . 0 and related technologies. **Journal of Intelligent Manufacturing**, n. January, 2018.

PARIDA, V.; SJÖDIN, D.; REIM, W. Reviewing Literature on Digitalization , Business Model Innovation , and Sustainable Industry : Past Achievements and Future Promises. 2019.

PATHAK, S. D. et al. Complexity and adaptivity in supply networks: Building supply network theory using a complex adaptive systems perspective. **Decision Sciences**, v. 38, n. 4, p. 547–580, 2007.

PEREIRA, G. et al. Top managers' role in key account management. **Journal of Business & Industrial Marketing**, v. 34, n. 5, p. 977–993, jun. 2019.

PEREIRA, G. M. et al. Expert insights on successful multinational ecodesign projects: A guide for middle managers. **Journal of Cleaner Production**, v. 248, p. 119211, mar. 2020.

PETRILLO, A. et al. **Digital Transformation in Smart Manufacturing**. [s.l.: s.n.].

PREINDL, R.; NIKOLOPOULOS, K.; LITSIOU, K. Transformation strategies for the supply chain: the impact of industry 4.0 and digital transformation. **Supply Chain Forum**, v. 21, n. 1, p. 26–34, 2020.

RAFAEL, L. D. et al. An Industry 4.0 maturity model for machine tool companies. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 159, n. March, p. 120203, 2020.

RAJ, A. et al. Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. **International Journal of Production Economics**, v. 224, n. August 2019, p. 107546, 2019.

REICHSTEIN, C.; AALEN, H. Strategic IT management: how companies can benefit from an increasing IT influence. v. 32, n. 2, p. 251–273, 2019.

RENI, L. et al. Industry-retail symbiosis: What we should know to reduce perishable processed food disposal for a wider circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 318, n. January, p. 128622, 2021.

REYES-HEROLES, R.; TRAIBERMAN, S.; VAN LEEMPUT, E. Emerging Markets and the New Geography of Trade: The Effects of Rising Trade Barriers. **IMF Economic Review**, v. 68, n. 3, p. 456–508, 2020.

RICHTER, C. H.; XU, J.; WILCOX, B. A. Opportunities and challenges of the ecosystem approach. **Futures**, v. 67, p. 40–51, mar. 2015.

RÜSSMANN, M. et al. Industry 4 . 0 : The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries. 2015.

RYAN, P.; WATSON, R. **Research Challenges for the Internet of Things: What Role Can OR Play?** [s.l.: s.n.]. v. 5

SALDAÑA, J. **The coding manual for qualitative researchers**. [s.l.] Sage, 2015.

SANTOS, L. et al. International Journal of Production Economics The expected contribution of Industry 4 . 0 technologies for industrial performance.

Intern. Journal of Production Economics, v. 204, n. August, p. 383–394, 2018.

SCHNEIDER, M.; SOMERS, M. Organizations as complex adaptive systems: Implications of Complexity Theory for leadership research. **Leadership Quarterly**, v. 17, n. 4, p. 351–365, 2006.

SCHRÖDER, C. The Challenges of Industry 4.0 for Small and Medium-sized Enterprises a good society – social democracy # 2017 plus. **the Friedrich-Ebert-Stiftung**, p. 28, 2016.

SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution: Klaus Schwab: 9781524758868**, 2017. Disponível em: <https://www.bookdepository.com/The-Fourth-Industrial-Revolution-Klaus-Schwab/9781524758868?redirected=true&utm_medium=Google&utm_campaign=Base1&utm_source=AU&utm_content=The-Fourth-Industrial-Revolution&selectCurrency=AUD&w=AF45AU96PCP958A80947&pdg=aud-29>

SERDARASAN, S. A review of supply chain complexity drivers. **Computers and Industrial Engineering**, v. 66, n. 3, p. 533–540, 2013.

SHET, S. V; PEREIRA, V. Technological Forecasting & Social Change Proposed managerial competencies for Industry 4 . 0 – Implications for social sustainability. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 173, n. August, p. 121080, 2021.

SONY, M.; NAIK, S. Critical factors for the successful implementation of Industry 4.0: a review and future research direction. **Production Planning and Control**, v. 31, n. 10, p. 799–815, 2020.

SRIVASTAVA, D. K. et al. Adopting Industry 4.0 by leveraging organisational factors. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 176, n. December 2021, p. 121439, 2022.

STENTOFT, J. et al. Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: empirical evidence from small and medium-sized manufacturers. **Production Planning and Control**, v. 0, n. 0, p. 1–18, 2020.

STENTOFT, J.; RAJKUMAR, C. The relevance of Industry 4.0 and its relationship with moving manufacturing out, back and staying at home. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 10, p. 2953–2973, 2020.

TAYLOR, S. A. et al. Value propositions in a digitally transformed world. **Industrial Marketing Management**, v. 87, n. November 2019, p. 256–263, 2020.

TELUKDARIE, A. et al. Industry 4.0 implementation for multinationals.

Process Safety and Environmental Protection, v. 118, p. 316–329, 2018.

TOMASZ, P.; KAJIKAWA, Y. Technological Forecasting & Social Change Automation-driven innovation management ? Toward Innovation-Automation-Strategy cycle. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 168, n. March, p. 120723, 2021.

TORTORELLA, G. L. et al. Organizational learning paths based upon industry 4.0 adoption: An empirical study with Brazilian manufacturers. **International Journal of Production Economics**, v. 219, n. April 2019, p. 284–294, [s.d.].

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

TURNER, K.; WILLIAMS, G. Modelling complexity in the automotive industry supply chain. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 16, n. 4, p. 447–458, 2005.

WALLENDORF, M.; BELK, R. Assessing trustworthiness in naturalistic consumer research. **Interpretive Consumer Research**, p. 69–84, 1989.

WEKING, J. et al. Leveraging industry 4.0 – A business model pattern framework. **International Journal of Production Economics**, v. 225, n. December 2019, 2020.

XU, L. DA; XU, E. L.; LI, L. Industry 4 . 0 : state of the art and future trends. v. 7543, 2018.

XU, J. et al. Emission transition of greenhouse gases with the surrounding rock weakened – A case study of tunnel construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 169–179, 2019.

YANG, M.; FU, M.; ZHANG, Z. Technological Forecasting & Social Change The adoption of digital technologies in supply chains : Drivers , process and impact. **Technological Forecasting & Social Change**, v. 169, n. April, p. 120795, 2021.

YIN, R.K., 2009. Case study research: Design and methods, Thousand Oaks, CA: Sage Publications. Sage Publications, Thousand Oaks, CA, CA. 2009.

YIN, R. K. **Case study research: Design and methods**. Thousand Oaks, CA, CA: Sage Publications, 2009.

YIN, Y.; STECKE, K. E.; LI, D. The evolution of production systems from Industry 2 . 0 through Industry 4 . 0. **International Journal of Production Research**, v. 7543, p. 1–14, 2018.

YU, Y. et al. Intelligent transformation of the manufacturing industry for Industry 4.0: Seizing financial benefits from supply chain relationship capital through enterprise green management. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 172, n. November 2020, p. 120999, 2021.

ZANGIACOMI, A. et al. Moving towards digitalization: a multiple case study in manufacturing. **Production Planning and Control**, v. 31, n. 2–3, p. 143–157, 2020.

ZHOU, K.; LIU, T.; ZHOU, L. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. **2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2015**, p. 2147–2152, 2016.