

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

JÔNATA CORRÊA VARGAS

IDENTIFICAÇÃO DE INCERTEZAS NA ADOÇÃO DE
TECNOLOGIAS: ESTUDO APLICADO A UMA
PLATAFORMA DIGITAL PARA A INDÚSTRIA 4.0

Porto Alegre

2022

JÔNATA CORRÊA VARGAS

**Identificação de Incertezas na Adoção de Tecnologias: Estudo Aplicado a
uma Plataforma Digital para a Indústria 4.0**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, na modalidade profissional, na área de concentração de Sistemas de Produção.

Orientadora: Professora Joana Siqueira de Souza, Dr^a.

Porto Alegre

2022

JÔNATA CORRÊA VARGAS

**Identificação de Incertezas na Adoção de Tecnologias: Estudo Aplicado a uma
Plataforma Digital para a Indústria 4.0**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Profissional e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Profa. Joana Siqueira de Souza, Dr^a.

Orientadora PMPEP/UFRGS

Prof. Ricardo Augusto Cassel, Dr.

Coordenador PMPEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Maria Isabel Wolf Motta Morandi, Dr^a. (UNISINOS)

Prof. Néstor Fabian Ayala, Dr. (UFRGS)

Prof. Ricardo Augusto Cassel, Dr. (UFRGS)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que influenciaram esta conquista, direta ou indiretamente: Assim, meu agradecimento é primeiramente a Deus, por ter me proporcionado saúde e determinação e estar cercado por aqueles que amo.

À minha orientadora, Dr^a. Joana Siqueira de Souza, pela disponibilidade, conselhos e amizade construída neste período, sem dúvida, essa pesquisa não teria o mesmo êxito sem a sua ajuda!

Aos meus pais, Luiz Gonzaga e Vera, pelo apoio e presença em todos os momentos. Este mestrado é dedicado a vocês! Aos meus sogros Paulo e Mara; aos meus avós, Gildo e Marta, exemplos para minha vida; à toda a minha família.

À Lilian, pelo amor, suporte e pelos agradáveis e difíceis momentos que vivemos nesta etapa. Meu eterno agradecimento por ter sido sempre companheira e amiga, me apoiando e incentivando a buscar o melhor de mim e a nunca desistir dos meus sonhos. Terás sempre meu amor e gratidão!

Muito obrigado aos professores e funcionários do PMPEP, por permitirem aos alunos uma formação de excelência. Agradeço aos meus colegas do mestrado, por toda a troca de conhecimento e ajuda nesses dois anos de jornada acadêmica. Em especial ao Lucas, Henrique e Gabriel.

Às famílias Vargas e Corrêa, agradeço por sempre compreenderem as minhas ausências e por me apoiar, me ensinando que os momentos que passamos com as pessoas que amamos são sempre os mais importantes.

A todos os meus amigos e colegas do controle de tráfego aéreo, espalhados por este Brasil.

*Posso afirmar categoricamente que
máquinas voadoras mais pesadas
que o ar são impossíveis.*

Willian Thomson (Lord Kelvin,
matemático e físico britânico, 1895)

RESUMO

Com as inevitáveis mudanças tecnológicas que acompanharam a transformação da era industrial, existe uma possibilidade elevada de que novas incertezas sejam introduzidas e tenham impacto em muitos aspectos nas organizações. Percebe-se, então, ser necessário desenvolver e experimentar novas abordagens para a identificação de incertezas no ambiente produtivo, principalmente no que diz respeito à adoção de tecnologias emergentes para o contexto da Indústria 4.0. Este estudo tem como objetivo principal avaliar o desempenho de uma plataforma digital industrial a partir da análise das incertezas relacionadas à sua adoção por parte do mercado. Com esse intento, foram aplicadas ferramentas e métodos relacionados à abordagem de Dinâmica de Sistemas a fim de prover recursos para aprimoramento da tomada de decisões. Dentre estas ferramentas estão o Pensamento Sistêmico, os Diagramas de Enlace Causal e a Análise de Impacto, gerando resultados para que por meio de um modelo computadorizado se avalie o desempenho da tecnologia selecionada em diferentes cenários. Com isso, pretende-se que os tomadores de decisão ampliem o entendimento das forças-motrices, cenários e incertezas no desenvolvimento de tecnologias emergentes e sua adoção pelo mercado, a fim de potencializar o desempenho organizacional. A proposta elaborada foi realizada por meio de um estudo de caso aplicado em uma empresa emergente do segmento de análise preditiva para manutenção industrial. Por meio dos resultados qualitativos e quantitativos obtidos da aplicação conjunta destas ferramentas foi possível identificar as variáveis mais relevantes à aceitação do mercado sob um ponto de vista sistêmico, vincular atributos da plataforma digital ao seu desempenho em termos de adotantes em diferentes cenários e, por meio de entrevistas com as partes interessadas, obter percepções relevantes para o aprimoramento contínuo da tecnologia ofertada. Assim, acredita-se que uma das grandes contribuições desta pesquisa foi fornecer uma abordagem capaz de, sistemicamente, propor uma orientação sobre o comportamento da adoção do mercado dado o desempenho da tecnologia.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Plataformas Digitais; Tecnologias Emergentes; Análise de Cenários; Dinâmica de Sistemas.

ABSTRACT

With the inevitable technological changes that will accompany the transformation of the industrial age, there is a high possibility that new uncertainties will be introduced and impact organizations in many aspects. It is therefore clear that it is essential to experience and develop and new approaches to identify uncertainties in the production environment, especially related to industry 4.0 emerging technologies adoption. The leading purpose of this study is to evaluate the performance of an industrial digital platform by the uncertainties analysis regarding to its adoption by the market. For this purpose, tools and methods related to the Systems Dynamics approach were adapted with regard to provide resources to improve decision-making. Among these tools are Systemic Thinking, Causal Loo Diagrams and Cross Impact Analysis, generating results so that through a computer model the performance of the selected technology can be evaluated in different scenarios. It is intended that decision makers expand the understanding of driving forces, scenarios and uncertainties in the improvement of emerging technologies and their adoption by the market, concerning enhancement of organizational performance. The proposed research was carried out through a case study applied in an emerging enterprise in the predictive analysis segment for industrial maintenance. Through the qualitative and quantitative outcome accomplished from the employment of these tools, it was able to identify the most relevant variables to market acceptance from a systemic perspective, connect technological attributes of the digital platform to its performance measured in adopters quantity in different scenarios and, through interviews with stakeholders, obtain relevant insights for the continuous improvement of the technology offered. Thus, it is believed that the major contribution of this research is to provide an approach for systemically proposing guidance on the behavior of market adoption given the conduct of the technology.

Keywords: Industry 4.0; Digital Platforms; Emerging Technologies; Scenario Analysis; System Dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mercado global para plataformas IoT Industriais (US\$ bilhões).	15
Figura 2 - Modelo de inovação disruptiva.	18
Figura 3 - Barreiras internas que dificultam a adoção de tecnologias digitais.	20
Figura 4 - Barreiras externas que dificultam a adoção de tecnologias digitais.	21
Figura 5 - Curva de Adoção de Inovação.	33
Figura 6 - As quatro camadas do conceito Smart Factory.	39
Figura 7 – Principais processos em uma Plataforma Digital de Manutenção Preditiva.	43
Figura 8 - Organização dos Sistemas Complexos.	45
Figura 9 – Arquétipo de Crescimento e Declínio.	50
Figura 10 - Exemplo de Diagrama de Estoque e Fluxo.	56
Figura 11 - Testes para construir confiança no modelo.	57
Figura 12 - Classificação metodológica empregada no estudo.	63
Figura 13 - Estrutura do Método de Trabalho.	65
Figura 14 - Modelo para desenvolvimento da Análise de Impacto Cruzado.	75
Figura 15 - Exemplo de Análise Comparativa entre as Diferentes Configurações da Tecnologia.	83
Figura 16 - Diagrama de estrutura sistêmica explicitando a concorrência.	89
Figura 17 - Estrutura da PDI e Stakeholders.	92
Figura 18 - CLD preliminar do Sistema de adoção da PDI.	94
Figura 19 - Influência das Variáveis no Sistema.	98
Figura 20 - Influência do Sistema nas Variáveis.	98
Figura 21 - Diagrama de Enlace Causal Revisado.	101
Figura 22 - Modelo de Simulação (Diagrama de Estoque e Fluxo).	111
Figura 23 - Intervalos de confiança das Configurações Tecnológicas.	118
Figura 24 - Quantidade de Adotantes acumulados (Configuração 2).	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado das buscas na literatura.....	24
Tabela 2 - Principais barreiras para ampliação da oferta de tecnologias da Indústria 4.0.....	60
Tabela 3 - Resultado da Revisão da Literatura para a formulação do Problema.....	70
Tabela 4 - Identificação e Classificação das Variáveis	99
Tabela 5 - Categorias em que pelo menos um atributo apresentou diferenças significativas.	106
Tabela 6 - Comparações múltiplas entre categorias de atributos	106
Tabela 7 - Diferenças Significativas entre pares de <i>Stakeholders</i>	107
Tabela 8 - Diferenças Significativas entre pares de Configurações.....	107
Tabela 9 - Cálculo amostral para ANOVA	112
Tabela 10 - Análise Comparativa entre os Cenários	115
Tabela 11 - Testes de Normalidade dos Dados	115
Tabela 12 - Testes de homogeneidade de variâncias	116
Tabela 13 - ANOVA de uma via (Teste de Welch)	116
Tabela 14 - Diferenças em relação à configuração atual da PDI	117
Tabela 15 - Análise Comparativa das Configurações da Tecnologia.....	119
Tabela 16 - Comparação entre Diferenças médias da Configuração 2	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Síntese das Principais teorias de Difusão de Tecnologias.	32
Quadro 2 - Descrição das principais tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.....	37
Quadro 3 - Síntese das diferenças entre as abordagens <i>Soft</i> e <i>Hard</i> em Dinâmica de Sistema.....	54
Quadro 4 - Passos para a construção do Diagrama de Enlace Causal.....	74
Quadro 5 - Escala para avaliar interações entre as variáveis	76
Quadro 6 - Códigos usados para indicar o tempo de atraso entre as variáveis x e y.....	77
Quadro 7 - Categorização de variáveis de acordo com sua utilidade como variáveis de intervenção ..	78
Quadro 8 - Categorização de variáveis de acordo com sua utilidade como variáveis indicadoras	79
Quadro 9 - Barreiras e Impulsionadores para a adoção da Plataforma Digital	90
Quadro 10 - Cenários para a oferta da Tecnologia.....	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACATECH - Academia Alemã de Ciências e Engenharia (*do alemão, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften*)

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CIA – *Cross-Impact Analysis*

CLD – *Causal Loop Diagram*

CNI - Confederação Nacional da Indústria

CPS - *Cyber Physical Systems*

IIoT – *Industrial Internet of Things*

IOS – *Internet of Services*

MCTI - Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação

MDIC - Ministério do Desenvolvimento e Comercio Exterior

PDI – Plataforma Digital Industrial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Problema de Pesquisa.....	20
1.2	Objetivos.....	22
1.3	Justificativa	23
1.4	Delimitações.....	26
1.5	Estrutura do Trabalho	27
2	REFERENCIAL TEÓRICO	28
2.1	Tecnologias Emergentes: Definições e características.....	28
2.1.1	Forças de Mercado e Inovação	31
2.1.2	Indústria 4.0: Origens, Evolução e Tecnologias Habilitadoras	33
2.1.3	Plataformas Digitais de aplicação Industrial	40
2.1.4	Plataforma Digital Industrial para Manutenção.....	42
2.2	Dinâmica de Sistemas	44
2.2.1	Diagramas de Enlace Causal	48
2.2.2	Análise de Impacto Cruzado	50
2.2.3	Planejamento de Cenários	53
2.2.4	Dinâmica de Sistemas para lidar com Sistemas Complexos	54
2.3	Definições sobre Riscos e Incertezas	58
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	62
3.1	Método de Pesquisa	62
3.2	Método de Trabalho.....	64
3.2.1	Coleta de Dados	66
3.2.2	Análise de Dados.....	67
3.2.3	Condições de aplicação do Estudo de Caso.....	68
3.2.4	Fase 1 - Contextualização.....	69
3.2.5	Fase 2 – Construção do Modelo de Estudo de Caso.....	71
3.2.5.1	Etapa 3 – Emprego do Pensamento Sistêmico	72
3.2.5.2	Etapa 4 - Diagramas de Enlace Causal (CLD)	73
3.2.5.3	Etapa 5 - Análise de Impacto Cruzado (CIA)	74
3.2.5.4	Etapa 6 – Definição das Configurações da PDI	80
3.2.6	Fase 3 – Exploração dos Cenários.....	81
3.2.6.1	Etapa 7 – Elaboração dos Cenários	81
3.2.6.2	Etapa 8 – Construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas	83
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	86
4.1	Fase 1 – Contextualização do Estudo.....	86
4.2	Fase 2 - Aplicação do Modelo de Estudo de Caso.....	88
4.2.1	Etapa 3 - Emprego do Pensamento Sistêmico	88
4.2.2	Etapa 4 – Desenvolvimento do Diagrama de Enlace Causal.....	93
4.2.3	Etapa 5 - Análise de Impacto Cruzado	97

4.2.4	Etapa 6 - Definição das Configurações da Plataforma Digital Industrial.....	104
4.3	Fase 3 - Cenários e Construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas	108
4.3.1	Etapa 7 - Elaboração dos Cenários.....	108
4.3.2	Etapa 8 - Construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas	110
4.4	Análise dos Resultados	114
4.4.1	Perspectivas de Mercado para a PDI.....	121
4.4.2	Considerações sobre a aplicação do Modelo	123
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	127
	REFERÊNCIAS	132
	APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO PARA ENTREVISTAS.....	144
	PARTE I - Informações Gerais.....	144
	PARTE II - Catálogo de Critérios	147
	ANEXO A – HÁBITOS DO PENSADOR SISTÊMICO	151
	APÊNDICE B - FONTES DE DADOS UTILIZADAS	153
	ANEXO B - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA RAZÃO DE INFLUÊNCIA.....	154
	APÊNDICE C – CONFIGURAÇÕES DA PDI	155
	APÊNDICE D - PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS	156
	APÊNDICE E – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA O MODELO	157
	APÊNDICE F – DIAGRAMAS DE ESTRUTURA SISTÊMICA	159
	APÊNDICE G – EXTRATO DA MATRIZ DE IMPACTO	160
	APÊNDICE H – EXTRATO DA MATRIZ DE TEMPO.....	161
	APÊNDICE I – TESTES DO MODELO DE SIMULAÇÃO	162

1 INTRODUÇÃO

Parte das recentes soluções para o avanço da produtividade industrial advém da introdução de novos conceitos de produção baseada em tecnologias de informação que, não só permitem melhorar a comunicação entre fabricantes, clientes e fornecedores (CHENG *et al.*, 2015), mas também criam oportunidades para atender a novos mercados. Diante desse cenário de recentes desenvolvimentos tecnológicos, a busca cada vez maior pela personalização e qualidade de produtos e serviços são tópicos que estão sendo discutidos mundialmente sob a titulação de Indústria 4.0 (HERMANN *et al.*, 2015).

Durante o processo de industrialização, avanços levaram a transformações tecnológicas denominadas como revoluções industriais. Segundo Hermann *et al.* (2015), as três primeiras foram revoluções industriais marcadas predominantemente por mecanização, eletrificação e digitalização difundida. Para os autores, ao contrário das primeiras, o surgimento da indústria 4.0 (I4.0), também denominada como a quarta revolução industrial, é caracterizado por novas tecnologias que convergem os mundos físico e digital, impactando radicalmente indústrias, economias e formas do ser humano trabalhar. Estes sistemas ciber-físicos (CPS, do inglês *Cyber Physical Systems*) possibilitam uma produção flexível e transparente (ACATECH, 2013).

Esses novos formatos de produção, onde os produtos e os sistemas produtivos obtêm capacidade de comunicação por meio de tecnologias emergentes, as quase são essenciais para alcançar a flexibilidade necessária para atender às exigências dos mercados (FRANK *et al.*, 2019). Essa exigência por maior flexibilidade surge em conjunto com outras expectativas na forma de soluções customizadas, redução dos lotes, entre outras (CHENG *et al.*, 2015).

Focadas neste sistema ciber-físico, uma série de ferramentas tecnológicas são a força motriz da indústria 4.0. Segundo o Boston Consulting Group¹ são previstos nove pilares tecnológicos da Indústria 4.0, sendo esses: robôs autônomos, simulação, integração de sistemas, IoT, cibersegurança, computação em nuvem, manufatura aditiva, realidade aumentada e *Big Data* (BCG, 2015). Estes pilares também são evidenciados por outras fontes (PORTAL DA INDÚSTRIA, 2021; LEITÃO *et al.*, 2016). Dalenogare *et al.* (2018) apontam que os benefícios destas tecnologias para o desempenho industrial são bastante diversos, exigindo que as empresas pensem sistematicamente na implementação tecnológica para alcançar um maior

¹ Relatório *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*. Disponível via website https://www.bcg.com/ptbr/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries. Acessado em maio de 2021.

nível de maturidade da I4.0. Dessa forma, indica-se que estas tecnologias possuem um alto grau de interrelação, proporcionando a sinergia necessária para os objetivos da I4.0.

Benefícios à parte, superar os desafios desse novo padrão industrial exigirá que as empresas avaliem suas capacidades e adaptem suas estratégias para explorar as tecnologias da I4.0 de forma a compreender os cenários apropriados para implementá-las (SANTOS *et al.*, 2018). Além disso, o cumprimento de alguns requisitos como a padronização dos protocolos de comunicação, organização do trabalho, força de trabalho capacitada, participação de pequenas e médias empresas, formação e desenvolvimento profissional, base tecnológica e investimentos (SANTOS *et al.*, 2018). Portanto, mesmo que algumas organizações estejam desejosas para incorporar as novas tecnologias da I4.0, o alvo em reduzir os riscos e manter competitividade no mercado não pode ser jamais perdido (TASSEY, 2014).

A presente notoriedade e entusiasmo com a temática que envolve a I4.0 estão alinhados com o que aponta o relatório *Industry 4.0 - Global Market Trajectory & Analytics*, da Global Industry Analysts. Nele, a perspectiva sobre o crescimento do mercado global de tecnologias e serviços da I4.0 está projetado para atingir US\$ 219,8 bilhões até 2026, a uma taxa de crescimento anual composta de 16,5%. No segmento IoT essa taxa é um pouco maior, 17,3%. Ainda, de acordo com o relatório, o crescimento do mercado está sendo impulsionado pela crescente conscientização das empresas sobre as vantagens que as tecnologias da I4.0 oferecem. Isto está equiparado com o que a Confederação Nacional da Indústria (CNI) identifica como um fator para a implementação de tecnologias da I4.0: o baixo conhecimento sobre as tecnologias digitais e seus benefícios indicam a necessidade de um esforço de disseminação de conhecimento (CNI, 2016). A Figura 1 apresenta o crescimento projetado pela firma de consultoria Kearney para o mercado de IoT industrial.

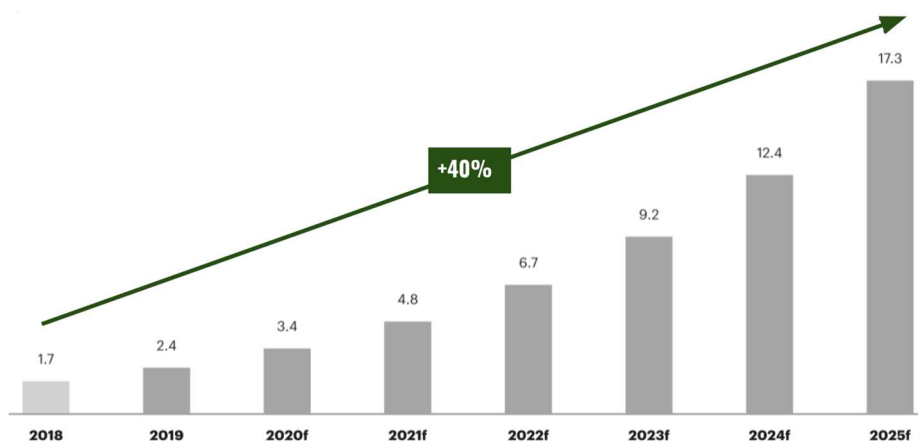


Figura 1 - Mercado global para plataformas IoT Industriais (US\$ bilhões).

Fonte: adaptado de Kearney Analytics (2019)

A McKinsey estima que até 2025 os processos relacionados à I4.0 poderão reduzir custos de manutenção de equipamentos entre 10% e 40%, reduzir o consumo de energia entre 10% e 20% e aumentar a eficiência da manufatura entre 10% e 25% (MANYIKA *et al.*, 2015). No contexto brasileiro, a crescente simpatia pela I4.0 é evidenciada por inúmeras pesquisas e atividades estratégicas que visam o desenvolvimento industrial mais inteligente. A iniciativa Indústrias do Futuro e Tecnologias Emergentes, coordenada pelo Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), cujo objetivo é o de analisar os potenciais impactos de tecnologias na indústria, é um exemplo sobre esse crescente interesse. Outro exemplo é o programa Indústria 2027, uma iniciativa da CNI lançada em 2018 em conjunto com diversas outras instituições. Nesse programa, a intenção foi explorar de forma aprofundada possíveis impactos de tecnologias disruptivas no horizonte entre cinco e dez anos à frente e recomendar orientações para o desenvolvimento da indústria brasileira.

Incluem-se ainda outras iniciativas nacionais como: o Plano Nacional de Internet das Coisas (em parceria entre MCTIC e BNDES²), que visa propor a elaboração de um diagnóstico e um plano de ação estratégico para o País em IoT. Em conjunto, o Plano de Manufatura Avançada no Brasil denominado ProFuturo³ que, sob coordenação do MCTI, busca propiciar condições de acesso e inserção das empresas brasileiras no ecossistema de manufatura avançada. Além disso, soma-se aos dois anteriores o Grupo de Trabalho Indústria 4.0⁴, iniciativa do então Ministério do Desenvolvimento e Comércio Exterior (MDIC) em 2017, com o objetivo de articular instituições, associações e empresas para discussão e elaboração de uma proposta de política pública para disseminação dos conceitos e tecnologias da I4.0 no Brasil.

Kagermann (2019) destaca que parte das recentes tecnologias da I4.0 obteve considerável aumento em sua popularidade após 2013, o que as associa à quarta revolução industrial. Esta observação é ainda mais evidente para tecnologias como *Big Data* e Análise de dados, uma vez que sua atuação tem encadeamentos para a configuração do trabalho, criação de valor e modelo de negócios das organizações.

Algumas tecnologias são necessárias à integração dos dados advindo dos processos produtivos com os demais processos internos ou externos das fábricas (PFOHL *et al.*, 2017).

² **Plano Nacional de Internet das Coisas.**

<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/pesquisaedados/estudos/estudo-internet-das-coisas-iot/estudo-internet-das-coisas-um-plano-de-acao-para-o-brasil>.

³ **ProFuturo.** https://www.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/tecnologia/tecnologias_convergentes/arquivos/Cartilha-Plano-de-CTI_WEB.pdf

⁴ **GT Indústria 4.0.** <http://www.mdic.gov.br/index.php/noticias/2640-mdic-instala-grupo-de-trabalhoque-definira-estrategia-nacional-para-a-industria-4-0-no-brasil>

As plataformas digitais atendem a essa necessidade, pois fornecem acesso sob demanda a informações guardadas em uma nuvem, integrando fornecedores e fabricantes (PFOHL *et al.*, 2017). De acordo com o *Hype Cycle* da Gartner, de forma geral, aplicações para Plataformas Digitais (*Plataform as a Service - PaaS*) se encontram em estágios mais maduros - no **patamar de produtividade** (GAERTNER, 2020).

Além disso, as plataformas digitais também podem integrar diferentes unidades da empresa por compartilhar informações em tempo real das atividades operacionais entre elas. Para viabilizar tais expectativas, as plataformas digitais fundamentam-se nas já referidas tecnologias de *Big Data* e Análise de dados, consideradas uma fonte importante de vantagem competitiva para o futuro (TAO *et al.*, 2018). Da combinação destas duas tecnologias resulta a plataforma digital (industrial), um exemplo bastante representativo da emergência de tecnologias ligadas à I4.0.

Se o contexto da I4.0 por si é repleto de desafios, ao levar em conta a questão de tecnologias emergentes, o nível de risco e incertezas é potencializado. Segundo Stahl (2011) fatores como o retorno sobre o investimento e a taxa de penetração no estágio inicial do ciclo de vida dessas tecnologias não são claros. Para o autor, muitas dessas incertezas se devem à natureza das novas tecnologias, cujo futuro é desconhecido ou imprevisível. Para Matt *et al.* (2015), a clareza sobre as tecnologias adequadas a uma empresa só é obtida quando a tecnologia em implementação acaba por se tornar o cerne de uma organização. Esse é o desafio que os administradores enfrentam: a partir de um amplo conjunto de possibilidades tecnológicas, precisam identificar o potencial comercial, escolher se, quanto e quando investir.

De acordo com Day e Wensley (1988), este dilema imposto à gestão organizacional se traduz na dificuldade de avaliar mercados futuros para novas tecnologias e determinar a demanda para produtos que não existem, destinados a clientes que ainda não são conhecidos. Para alguns autores, nos estágios iniciais de desenvolvimento de tecnologias, menos dados disponíveis e a escassez de ferramentas analíticas para enfrentar esses desafios da tomada de decisão são representativos dessa dificuldade de prospectar mercados (BERGERSON *et al.*, 2020; MONI *et al.*, 2020; COLLINGRIDGE, 1982). Logo, a trajetória de desenvolvimento de tecnologia e a velocidade da aceitação do mercado são possivelmente os aspectos organizacionais mais suscetíveis a um amplo conjunto de incertezas (SAINIO, 2004).

Essa trajetória de desenvolvimento de tecnologias emergentes é uma corrida na qual existem três obstáculos (BENNER; TRIPSAS, 2012). O primeiro obstáculo refere-se a decisão de investir ou não no desenvolvimento de uma nova tecnologia. Muitas empresas neste primeiro obstáculo e relutam em investir em novas tecnologias por medo de canibalizar suas vendas

atuais. Mesmo se não houver uma ameaça de canibalização (COOPER; GUTOWSKI, 2020; SHARP; MILLER, 2016), as empresas podem achar que o mercado para a nova tecnologia é demasiadamente pequeno e não atrai os clientes existentes, portanto, acabam não investindo (CHRISTENSEN *et al.*, 2015; GAWER; CUSUMANO, 2014). Supondo que consigam dar esse primeiro passo, elas então confrontam-se com o desafio de desenvolver a nova tecnologia. Nesse passo, empresas estabelecidas em geral são puxadas para baixo pelo peso das rotinas e procedimentos organizacionais (CHRISTENSEN *et al.*, 2015). Tendo por base a tecnologia existente em uma organização, tais rotinas transformam-se em fraquezas no desenvolvimento de produtos ou serviços que usam novas tecnologias. A Figura 2 ilustra essa dinâmica.

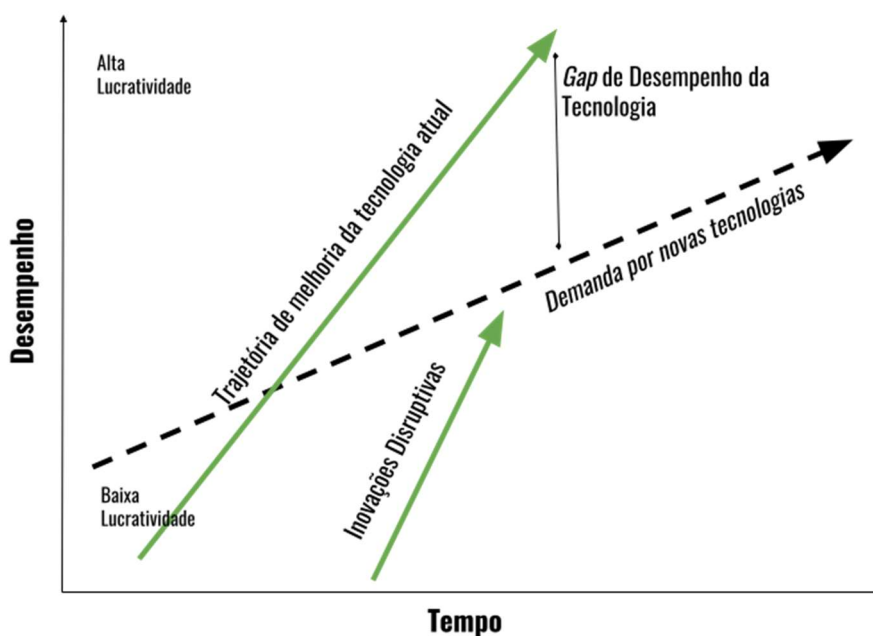


Figura 2 - Modelo de inovação disruptiva.

Fonte: adaptado de Christensen *et al.* (2015)

Na visão de Christensen, uma inovação pode transformar um mercado ou setor existente através da oferta de novas características, descrevendo como um novo produto ou ideia redefine um nicho de mercado que já esteja sem crescimento ou em defasagem. Neste processo, um padrão pode ser observado: a incapacidade das empresas líderes de segmento manter sua posição quando surgem inovações ou os mercados incorrem em mudanças. Isso resulta que em um determinado mercado as empresas participantes focam em eficiência e em cortar custos a fim de aumentar suas margens de lucro.

Assim que introduzidas, as novas tecnologias se mostram inferiores às características de desempenho tradicionalmente aceitas, mas oferecem uma nova mistura de atributos que agrada

a nichos de clientes à margem do mercado (MARKMAN; WALDRON, 2014). Essa inferioridade técnica, em geral, se transforma em posições de mercado inferiores quando as empresas se aproximam do obstáculo final, a comercialização da tecnologia. Tal fenômeno se traduz na relação entre desempenho e rentabilidade denominada por Christensen *et al.* (2015) como um *gap* de desempenho da tecnologia. Christensen ilustra tal condição por meio da imperícia da IBM em notar a necessidade por computadores portáteis, ainda que de menor desempenho, em lugar de seus enormes *mainframes*. Como resultado, a empresa foi ultrapassada por seus concorrentes no começo da corrida dos computadores pessoais.

De acordo com o modelo de Inovações Disruptivas (Figura 2) percebe-se três elementos essenciais: - O primeiro, representado pela diferença entre a trajetória de melhoria da tecnologia atual (melhorias incrementais) e as melhorias por meio de inovações disruptivas, disto resulta o desempenho tecnológico que os clientes podem absorver (linha tracejada), ou seja, a demanda por novas tecnologias. O segundo elemento diz respeito as inovações incrementais. Conforme são agregadas inovações incrementais ao produto atual, estas acabam por não refletir as reais demandas dos clientes. Por fim, o último componente é o ritmo em que uma dada tecnologia progride. As inovações tecnológicas ao apresentarem novos atributos, permite inicialmente a captura de clientes menos exigentes. Após sua introdução no mercado, os esforços na melhoria do desempenho desta inovação são contínuos, até que esteja em conformidade com as reais necessidades dos clientes, estabelecendo-se no mercado. Segundo Christensen, assim que estas inovações vão se aprofundando nas diversas camadas de um mercado, acarretam, por vezes, em colapso para empresas líderes de segmento.

Por fim, após desenvolver ou adquirir uma nova capacidade tecnológica, o produto ou serviço precisa encontrar um mercado para servir; por isso, na etapa final de comercialização, as empresas com posição técnica inferior ainda têm a oportunidade de se sair bem. De forma semelhante, as empresas que detêm liderança tecnológica ainda podem fracassar quando tiverem de levar o produto ao mercado (BUENO; BALESTRIN, 2012; TRIPSAS, 1997). Muitas vezes as empresas estão envolvidas nos difíceis desafios do desenvolvimento de uma capacidade técnica radicalmente nova que não enxergam um quadro mais amplo, envolvendo a obtenção de vantagem competitiva e a diferenciação no ambiente de negócios (TEECE, 2010).

A compreensão dos obstáculos incorrentes no desenvolvimento tecnológico, bem como a adequada distinção entre inovações incrementais e disruptivas pode elevar o aprendizado organizacional a um patamar mais profundo de reconhecimento dos problemas relacionados à comercialização de tecnologias. A seção seguinte discorre sobre o problema de pesquisa que se busca atender por meio deste estudo.

1.1 Problema de Pesquisa

Em um dado momento, uma tecnologia particular opera dentro de um conjunto de limitações de desempenho ou de barreiras tecnológicas. Sob o ponto de vista dos potenciais adotantes desta tecnologia, algumas dessas barreiras se refletem como custo proibitivo para adoção da tecnologia (FABER; HOPPE, 2013), percepções sobre impactos ambientais (REINSTALLER, 2008) e mudanças nos preços dos insumos (KEMP; VOLPI, 2008). Dessa forma, tais limitações impõem restrições ao grau em que os desenvolvedores da tecnologia podem fornecer os atributos desejados pelo mercado. As Figuras 3 e 4 apresentam as principais barreiras internas e externas à adoção de tecnologias digitais para a indústria sob o ponto de vista dos adotantes⁵.

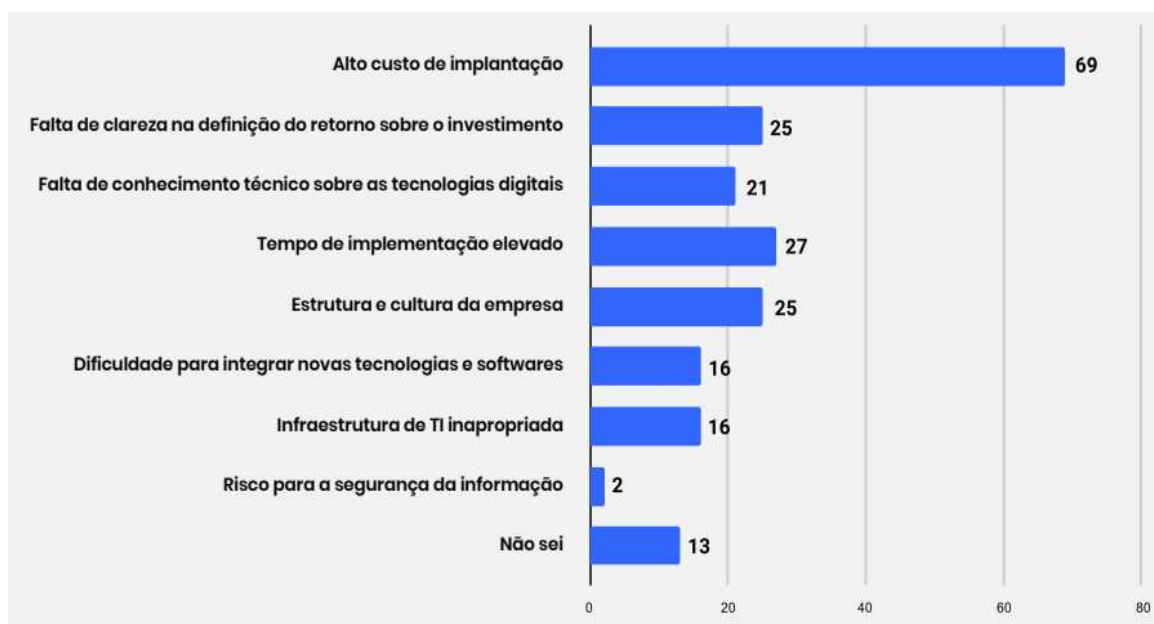


Figura 3 - Barreiras internas que dificultam a adoção de tecnologias digitais.

Fonte: CNI; FIEC* (2021)

⁵A soma dos percentuais pode superar 100% por admitir múltiplas respostas

*FIEC – Federação das Indústrias do Estado do Ceará

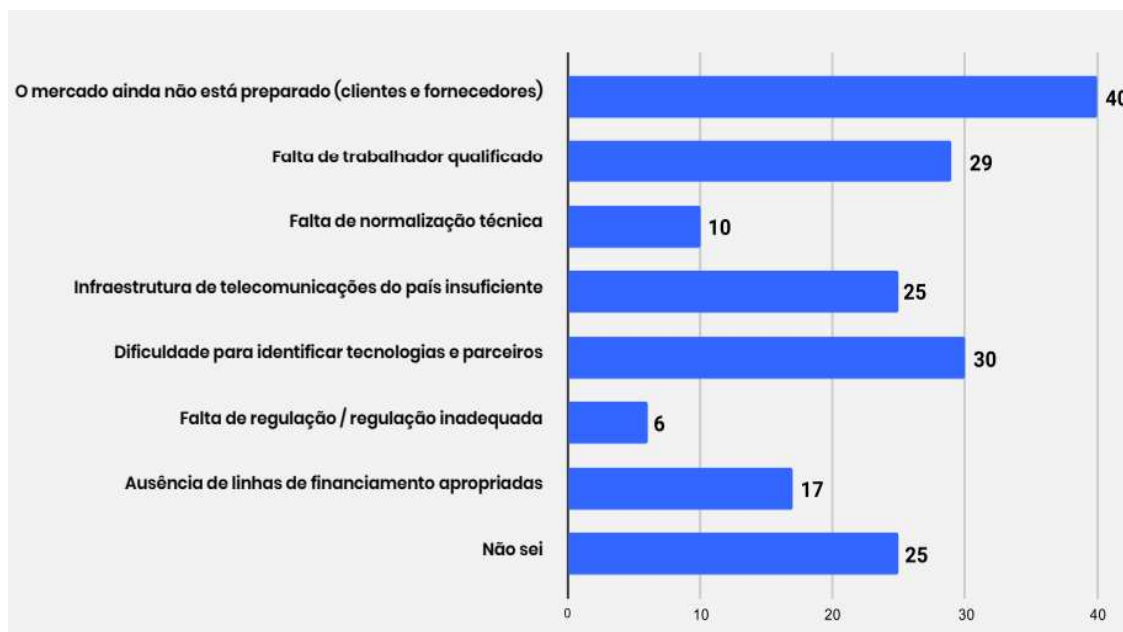


Figura 4 - Barreiras externas que dificultam a adoção de tecnologias digitais.

Fonte: CNI; FIEC (2021)

De acordo com McGrath e MacMillan (2000), essas barreiras definem um envelope cujas bordas se determinam pelos limites atuais da capacidade da empresa, e às vezes do setor. Conforme afirmam Saccani *et al.* (2014) e Gebauer *et al.* (2013), possíveis configurações dos conjuntos de atributos de uma tecnologia colidem com uma série de barreiras tecnológicas fazendo com que algumas empresas avancem um pouco mais do que outras, de modo que estes conjuntos de atributos ficam confinados não só ao setor, mas algumas vezes também são restritos à empresa.

Dado os recursos limitados e a tecnologia em constante desenvolvimento, fica impossível para qualquer empresa maximizar todos os atributos desejados pelo mercado. Assim, a estratégia de tecnologia acaba em escolhas sobre a alocação de recursos, e tais escolhas, em aumento substancial de incertezas no processo decisório. Segundo Cusumano *et al.* (2015), para as organizações, tais incertezas se refletem na falta de clareza sobre como suas aplicações evoluirão tecnologicamente, quem serão os clientes mais atraentes, quando e como vão utilizar o produto, ou quanto estarão dispostos a pagar. Portanto, a realidade que os decisores enfrentam é que todo produto ou serviço encontra-se preso dentro de um complexo envelope de barreiras.

A avaliação de um potencial mercado para tecnologias emergentes complica-se devido a interação entre o desenvolvimento tecnológico e a taxa de aceitação do mercado. Em outras palavras, a aceitação do mercado só pode acontecer quando os padrões de qualidade e

desempenho estão bem definidos. Portanto, a ausência de qualquer um desses elementos retardará aceitação da tecnologia, fato que os gestores devem estar atentos, uma vez que há consideráveis incertezas sobre a Indústria 4.0, especialmente em relação aos requisitos de tecnologia e benefícios potenciais, como pesquisas anteriores mostraram (DALENOGARE *et al.*, 2018).

Sob a perspectiva de um fornecedor de tecnologias ou inovações para a I4.0, este estudo foca nas incertezas relacionadas à comercialização de tecnologias emergentes abordando a seguinte questão-chave: **como identificar fatores influentes na adoção de uma tecnologia emergente na forma de uma Plataforma Digital Industrial**, onde o sucesso de lançamento da tecnologia é medido através da quantidade de adotantes em relação a um determinado arranjo tecnológico.

A compreensão de tais fatores permitirá (i) simular o desempenho resultante das diferentes configurações tecnológicas da plataforma digital; e (ii) identificar e avaliar o impacto de incertezas sobre a aceitação da tecnologia avaliada neste estudo.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do estudo é **analisar uma plataforma digital industrial a partir da identificação das incertezas relacionadas à sua adoção**. Tal análise permitirá ao provedor da plataforma vincular as diferentes configurações da tecnologia aos elementos sistêmicos essenciais para o sucesso de sua proposta de valor (adoção por parte dos clientes-alvo). Com isto, espera-se fornecer resultados que sustentem a tomada de decisão para os integrantes da plataforma.

A fim de auxiliar a atingir o objetivo geral, este trabalho ainda possui como objetivos específicos:

- (i) Identificar os fatores relevantes para os clientes-alvo e, com isso, examinar eventuais diferenças existentes entre o serviço por eles desejado e o posicionamento projetado pelo provedor da plataforma;
- (ii) Desenvolver um modelo computacional utilizando a abordagem de Dinâmica de Sistemas de forma que se avalie o impacto de diferentes cenários sobre a aceitação da plataforma; e
- (iii) Aplicar o Método de Trabalho em um estudo de caso, visando verificar sua contribuição para o processo decisório sobre tecnologias emergentes no contexto de incertezas.

1.3 Justificativa

A relevância do tema de comercialização de tecnologias tem seu devido espaço ao concentrar-se em tópicos sensíveis como a vantagem competitiva e o posicionamento da empresa perante a concorrência. Sob o ponto de vista corporativo, a maioria dos decisores e analistas frequentemente concentram seus esforços somente nos desafios tecnológicos (BENNER; TRIPSAS, 2012). Nesse sentido, é importante o enfoque na compreensão sobre como as mudanças proporcionadas pelas novas tecnologias refletem no desempenho das empresas, permitindo a vantagem competitiva por meio da inovação e, conseqüentemente, sua distinção em relação aos concorrentes. Assim, decisões que afetem o desempenho das empresas, como apontam Yudina e Plidisna (2021), pressupõem um processo de análise profunda dos riscos futuros e sua dinâmica para ampliar a percepção dos decisores sobre a aceitação da incerteza tecnológica.

Uma barreira persistente para a difusão de tecnologias emergentes é o pensamento compartimentado no qual cada departamento ou função enfoca seus próprios objetivos de modo que a informação não atravessa fronteiras ou é interpretada de forma muito diferente por cada grupo, como destacam Abrahamson e Rosenkopf (1997). Para os autores, à medida que a complexidade e os recursos exigidos para o avanço de tecnologias emergentes continuam aumentando, o desenvolvimento e a gestão do aprendizado organizacional tornam-se uma questão estratégica central. Para ultrapassar esse padrão de pensamento, Morandi (2017) recomenda uso do Pensamento Sistêmico como uma das formas de compreender essa complexidade e o comportamento de sistemas. Neste sentido, proporcionar um processo prático, utilizando as ferramentas adequadas, oportuniza aos decisores em empresas emergentes examinar a interação entre o mercado e a tecnologia ofertada, permitindo a visualização dos impactos das configurações industriais existentes em suas ofertas tecnológicas e em seus modelos de negócios.

Considerando a complexidade do processo de lançamento de tecnologias para a indústria 4.0, é importante para empresas nascentes terem acesso a ferramentas que forneçam mais simplicidade a esse processo. Dessa forma, abordagens para aferir o desempenho tecnológico em termos de aceitação do mercado são reconhecidas como análises altamente demandadas e se relacionam fortemente com a indústria 4.0 (TORTORELLA *et al.*, 2020).

A primeira contribuição deste estudo para essas empresas advém do uso de princípios do Pensamento Sistêmico e dos Diagramas de Enlace Causal, uma ferramenta que auxilia no entendimento dos elementos presentes no mercado em que a proposta de valor é oferecida,

permitindo que se avalie, qualitativamente, as possíveis causas promotoras ou impeditivas à aceitação da tecnologia. Em seguida, a Análise de Impacto Cruzado permite que as variáveis do sistema sejam classificadas e o sistema possa ser melhor explorado. Por fim, fazendo o uso de cenários associados a um modelo computadorizado, como destaca Morandi (2017), possibilita-se a visualização de futuros sem que de fato tenha que se empregar ou esperar a ocorrência de algum deles antecipadamente.

Paralelamente, a fim de verificar a relevância acadêmica do tema foram realizadas buscas na base de pesquisa SCOPUS. As buscas foram realizadas utilizando primariamente os resumos, sendo selecionados apenas artigos ou revisões na língua inglesa dos últimos 10 anos. Como critérios de inclusão, as publicações deveriam conter termos como a ‘Avaliação de Cenários’, ‘Interação com Stakeholders’, ‘Adoção e Avaliação de Tecnologias’, bem como artigos que apresentaram relação direta com Dinâmica de Sistemas, preferencialmente apresentando modelos qualitativos e quantitativos para apoio à decisão. Por outro lado, como critérios de exclusão da busca, optou-se por desconsiderar artigos em que constassem os termos ‘Agriculture’, ‘Health’ e ‘Financial’, bem como trabalhos sobre situações de incerteza, porém em contextos alheios à tecnologias emergentes. Além disso, de modo geral, a busca deveria levar em conta o impacto das incertezas identificadas e a facilidade de aplicação. Espera-se que empresas em estágios nascentes não possuam recursos, humanos e/ou financeiros, para operar metodologias complexas, e por esse motivo, julgou-se essencial esse critério.

Como resultado, 29 publicações tiveram a leitura da totalidade de seus resumos para se certificar que se enquadrassem nos critérios de inclusão. Destes, 2 foram eliminados por serem contemplados dentro dos critérios de exclusão, estavam fora da abordagem de Dinâmica de Sistemas, restando 27 estudos para serem lidos de forma integral. A partir do exame dos artigos selecionados foi possível identificar a necessidade de uma abordagem analítica que suporte aos decisores em empresas nascentes em circunstâncias de incertezas. Os resultados desta revisão literária são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultado das buscas na literatura para relevância do tema e formulação do Problema

Fonte	Termo de Busca	Índice	Resultados	Títulos	Resumos Lidos	Selecionados
Scopus	TECHNOLOGY ADOPTION OR INDUSTRY 4.0 AND ASSESSMENT OR DECISION MAKING	<i>Abstract</i>	964	4	4	3
	“TECHNOLOGY ADOPTION” AND “INDUSTRY 4.0” AND “ASSESSMENT” OR	<i>Abstract</i>	6	1	1	-

(Continua)

“DECISION MAKING”					
"EMERGING TECHNOLOGIES" AND "TECHNOLOGY ACCEPTANCE" AND "DECISION MAKING"	<i>Abstract</i>	1	1	1	1
EMERGING TECHNOLOGIES AND TECHNOLOGY ACCEPTANCE AND DECISION MAKING	<i>Abstract</i>	51	21	18	18
EMERGING TECHNOLOGIES OR INDUSTRY 4.0 AND "SYSTEM DYNAMICS"	Conteúdo inteiro	21	5	5	5
TOTAIS		1043	32	29	27

Fonte: elaborado pelo autor

A partir da leitura dos artigos selecionados, foram identificados os principais tópicos a serem considerados na pesquisa com a intenção de investigar os problemas inerentes à aceitação de mercado para tecnologias emergentes, especialmente aquelas de aplicação industrial. Contribuindo com a utilidade das abordagens para lidar com situações de incerteza, este trabalho sustenta-se sobre uma perspectiva na qual utiliza-se essencialmente métodos relacionados à Dinâmica de Sistemas, incluindo um modelo computacional adaptado. O objetivo deste modelo de avaliação não é prever a adoção da tecnologia, nem extrair considerações sobre otimização da proposta tecnológica, mas sim, averiguar o desempenho da tecnologia sob um conjunto de cenários aceitáveis. Portanto, justifica-se que a aplicação proposta visa o reconhecimento de forças condicionantes para a aprendizagem sistêmica (STERMAN, 2002).

Conforme destacam Dalenogare *et al.* (2018), desenvolver uma pesquisa sobre riscos que tenham maior relevância no contexto da indústria 4.0 pode trazer grandes benefícios tanto para pesquisadores, encontrando pontos de partida para estudos acadêmicos, como para que decisores no seguimento industrial identifiquem incertezas a respeito de investimentos em novas tecnologias. Portanto, justifica-se, tanto o aprofundamento no tema de tecnologias da indústria 4.0, como a aplicação de métodos e ferramentas que auxiliem os gestores a entender a capacidade comercial das tecnologias emergentes e suas incertezas de adoção visando a melhoria do desempenho organizacional. A seguir são apresentadas as delimitações de aplicação desta pesquisa.

1.4 Delimitações

As delimitações definem os limites de aplicação dos métodos propostos e dos tópicos de interesse do estudo. Primeiramente, o estudo compreende análise de apenas uma tecnologia aplicada à Indústria 4.0; neste caso, uma plataforma digital industrial. Contudo, esta se fundamenta em uma série de outras tecnologias extensivamente cobertas pela literatura, principalmente a *Big Data* e Análise de Dados.

Entende-se também que os participantes das pesquisas possuam previamente conhecimento ou experiência no emprego de plataformas digitais em suas fábricas, bastando para este estudo a compreensão sistêmica dos relacionamentos no ecossistema. Portanto, os diferentes posicionamentos dos atores se limitam à avaliação das características da tecnologia estudada.

Ainda, no escopo da avaliação da adoção da tecnologia não serão abordados os processos para definição do custo dos serviços ou estrutura de capital ou sequer composição ou tópicos relacionados à governança das empresas envolvidas. São consideradas como delimitações à aplicação proposta que, as decisões ocorram em empresas nascentes operando em ambientes dinâmicos e, que as decisões ocorram em contexto de incertezas.

Uma vez que o estudo é concebido para empresas em estágios iniciais (*startups*), portanto, altamente focadas na solução de problemas específicos da indústria e dependentes de processos gerenciais fundamentais, buscou-se o emprego de métodos que fornecessem facilidade de aplicação de forma a dar agilidade para que os decisores se adaptem conforme a dinâmica do mercado seja alterada.

Outra delimitação desta pesquisa diz respeito a ausência de dados históricos, dificultando se extrair todo o potencial proporcionado pelo modelo de simulação computadorizada. Assim, optou-se por uma abordagem qualitativa associada aos Diagramas de Enlace Causal e a utilização de avaliações de cenários. As simulações foram realizadas dentro de um horizonte de 10 anos. Embora algumas publicações utilizem-se de um horizonte mais amplo, como 20 ou 30 anos, julgou-se suficiente para a análise de tecnologias em fases preliminares de desenvolvimento. Além disso, o modelo desenvolvido buscou contemplar as variáveis mais importantes e necessárias para fornecer a visão sistêmica para as análises desejadas, portanto, a ênfase não foi no excessivo detalhamento das variáveis.

As revisões literárias descritas neste estudo possuem algumas delimitações que devem ser destacadas. Em primeiro lugar, apenas publicações encontradas no banco SCOPUS foram consideradas. Ficaram de fora documentos internos das organizações estudadas, o que certamente

conferiria um maior grau de assertividade à compreensão do ecossistema abordado, muito embora outros instrumentos (entrevistas semiestruturadas) foram utilizados para captar as informações necessárias à análise proposta. Soma-se a isso o fato que o estudo não abrange algumas dimensões tradicionalmente tratadas em artigos sobre a indústria 4.0, por exemplo, gestão de dados e equipes de trabalho.

Por fim, o conjunto de artigos selecionados para a fundamentação desta pesquisa considerou apenas artigos que continham o termo "Indústria 4.0". Uma vez que outros termos como 'manufatura avançada' podem ser utilizados, a depender das organizações ou países, publicações que não continham tal referência podem não terem sido contempladas, podendo influenciar a exatidão do estudo.

1.5 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, sendo que o **capítulo 1, Introdução**, contextualiza o tema de pesquisa, principalmente a indústria 4.0, apresenta o problema e objetivos de pesquisa, justificativa, o escopo do estudo e sua estrutura.

Já o **segundo capítulo** traz o **Referencial Teórico** para a caracterização da Indústria 4.0, tratando das origens e evolução das tecnologias da Indústria 4.0, plataformas digitais industriais e emergência de tecnologias. Além disso, aborda com maior profundidade as ferramentas utilizadas na compreensão sistêmica do problema em estudo. Neste capítulo, os elementos apresentados no capítulo anterior são integrados às abordagens de Dinâmica de Sistemas, em especial os Diagramas de Enlace Causal e Análise de Impacto, visando fundamentar a aplicabilidade destas abordagens.

No **capítulo 3, Procedimentos Metodológicos**, a metodologia de pesquisa e o método de trabalho são apresentados a partir das ferramentas empregadas e do modelo de simulação, incluindo sua elaboração e testes. Ainda, ocorre a seleção do caso, apresentação dos instrumentos e meios de coleta e análise dos dados.

No **capítulo 4, Resultados e Discussão**, apresentam-se os resultados globais e avalia-se a aplicabilidade das abordagens. Por fim, as **Considerações Finais** são realizadas no **capítulo 5**. Neste capítulo final, sumariza-se o desenvolvimento do estudo e percepções sobre a aplicação das ferramentas e identificam-se direções para estudos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada a base teórica que sustenta esta pesquisa, sendo organizado em três seções. A primeira aborda conceitos que sustentam o tema deste estudo, tratando os conceitos relacionados às tecnologias emergentes, indústria 4.0 e os possíveis impactos advindos das incertezas neste contexto. No segundo momento são abordadas as principais teorias que sustentam a construção da sistemática. Nesse sentido, contextualiza-se a abordagem de Dinâmica de Sistemas sob a forma de Diagramas de Enlace Causal, utilizados para entender e formalizar as relações entre as diversas variáveis identificadas, a Análise de Impacto para a classificação adequada das variáveis presentes no sistema, a construção de cenários que, associados ao modelo computadorizado adaptado para o estudo, servem para avaliação do desempenho da tecnologia avaliada. Na última seção, são realizadas considerações sobre a incertezas em ambientes complexos, auxiliando na contextualização desta pesquisa.

2.1 Tecnologias Emergentes: Definições e Características

Não existe uma definição amplamente aceita sobre tecnologias emergentes (TE). Contudo, alguns autores procuram fornecer o escopo e uma definição para o termo, por exemplo, Day e Schoemaker (2002) e Srinivasan (2008) afirmam que as TEs são inovações baseadas na expectativa de criar ou transformar uma indústria existente. Isso significa que as TEs são produzidas a partir da colaboração de pesquisa e desenvolvimento, já que antes de serem desenvolvidas, a maioria das TEs começa como uma ideia de pesquisa conceitual. Contudo, esta definição considera novas tecnologias como TEs, o que não é totalmente preciso.

Day e Schoemaker (2002) afirmam que as tecnologias emergentes são frequentemente agrupadas sob “rótulos gerais” (por exemplo, nanotecnologia, biologia sintética), em algumas ocasiões são melhor tratadas separadamente devido às suas diferentes características (por exemplo, dificuldades técnicas, atores envolvidos, aplicações, riscos e incertezas). Esta definição enfoca o uso de tecnologia e a extensão em que ela é difundida em um determinado contexto ou domínio.

Stahl (2011) definiu TEs como tecnologias que têm potencial para ganhar relevância social, significando que elas não estão apenas em um estágio inicial de desenvolvimento, mas já foram além do estágio puramente conceitual. Este é outro equívoco sobre a especificação de um intervalo de tempo no ciclo de vida de uma tecnologia para determinar se ela está surgindo.

Por exemplo, mundos virtuais foram descritos como TEs em meados da década de 1990 (DEDE, 1996).

O termo tecnologia emergente tem sido frequentemente usado por profissionais e acadêmicos. Por exemplo, computação em nuvem, inteligência artificial, realidade virtual e rede sociais são rotulados como tecnologias emergentes (STAHL, 2011). No entanto, um dos principais desafios na investigação sobre o tema é o fato de o termo em muitos casos não ser bem definido e muitas vezes ser mal interpretado (VELETSIANOS, 2010).

Em outros casos, a tecnologia ainda pode ser considerada emergente em um contexto, embora seja considerada como estabelecida em outro. Miller *et al.* (2005) ilustram esta circunstância com o fato de o e-mail ser uma tecnologia opcional alguns anos atrás. Hoje é uma tecnologia obrigatória para a maioria das pessoas na maioria das organizações. Algumas características podem ser consideradas comuns às tecnologias emergentes, dentre elas:

Implicações sociais e éticas: Halaweh (2013) abordou algumas das questões sociais e éticas que poderiam ser levantadas, como desigualdade entre clientes e violações de privacidade. Isso se deve ao interesse limitado apenas aos benefícios tecnológicos do que a razões mais amplas. O autor exemplifica que a identificação por radiofrequência (RFID), em princípio, usada para gerenciamento de estoque, levantou debates sobre a troca entre os direitos de privacidade das pessoas e a segurança nacional em diversos países quando foi usada para rastrear criminosos. Portanto, alguns problemas éticos são descobertos apenas depois que a tecnologia é colocada em um contexto específico, por exemplo, local e aplicação.

Efeitos de rede: o valor e a potência de uma rede aumentam conforme aumenta o número de pessoas estão conectadas a ela. É na forma de rede que as organizações combinam suas ofertas individuais em uma solução coerente voltada para os clientes (ADNER; KAPOOR, 2010). Por exemplo, um aparelho de fax só possui valor se houver outros aparelhos de fax. À medida que aumenta o número de pessoas os utilizando, aumenta o valor dos aparelhos para cada usuário da rede. Se duas ou mais pessoas o adotarem, então o valor é incrementado, o que por sua vez, reforça o aumento da adoção. O número de usuários de uma TE em um determinado contexto começa baixo e aumenta gradualmente com o tempo. Com o passar do tempo, o número de usuários aumentará e o valor da tecnologia aumentará com ele (ADNER; KAPOOR, 2010). São os efeitos de rede que promovem o característico “rápido crescimento” (COZZENS *et al.*, 2010; SRINIVASAN, 2008).

Tecnologias Emergentes estão limitadas a determinados países: para Cozzens (2010), a disponibilidade das TEs é uma condição importante para sua adoção. Pessoas ou empresas em países em desenvolvimento ou menos desenvolvidos podem ouvir sobre um nova

TE; no entanto, devido às condições econômicas, elas não podem desfrutar dessa tecnologia, mesmo que desejem tê-la.

Custos: Frequentemente as TEs são vendidas a preços elevados à medida que as empresas buscam reaver os custos de pesquisa e desenvolvimento. Na visão de Srinivasan (2008), conforme a tecnologia vai se desenvolvendo, suas deficiências são eliminadas, seu desempenho em relação ao preço aumenta, e os benefícios potenciais da TE passam de um mercado estreito para um mercado maior. No entanto, o autor argumenta que, à medida que aumenta a maturidade da tecnologia, aumenta-se o número de fabricantes a empregá-la e, com isso, aumenta-se a competição entre eles. Consequentemente, o custo cai com o passar do tempo e o *spread* aumenta. Por exemplo, o preço dos sensores IoT, dispositivos essenciais para captura dos dados da produção, caíram significativamente. De acordo com o Goldman Sachs, os preços dos sensores caíram quase 200% entre 2004 e 2016⁶.

As tecnologias emergentes não são totalmente investigadas e pesquisadas: Breitzman e Thomas (2015) sustentam que as pesquisas sobre TEs ainda não atingiram seu pleno potencial; a maioria dos materiais são artigos e relatórios técnicos produzidos por fabricantes e partes interessadas que se beneficiam de uma determinada tecnologia. Isso torna as empresas, governos e tomadores de decisão incapazes de tomar decisões sobre a adoção, aplicações, uso e implicações sociais das TEs, porque o principal público para esses materiais é o pessoal profissional da indústria, que geralmente se foca no lado técnico da TE. Segundo Okazaki (2005), pesquisas bem estabelecidas sobre as especificações, recursos e capacidades, limitações e implicações sociais de uma TE aumentarão sua adoção.

A incerteza é alta: por fim, é evidenciado por diversos autores que a incerteza é uma característica central das TEs. Isso se deve fato da imprevisibilidade sobre seu futuro (STAHL, 2011). Essa incerteza assume várias formas, como incerteza sobre preços ou falta de conhecimento sobre custos, receita esperada, retorno sobre o investimento e, em especial, a taxa de penetração no estágio inicial do ciclo de vida de uma TE geralmente não é claro. Akesson (2007) adiciona à lista: custos operacionais, padrões e especificações de tecnologia e aceitação e reações do usuário. O autor complementa afirmando que, devido ao desconhecimento, imprevisibilidade ou instabilidade dessas variáveis, torna-se muito difícil medir como as pessoas e organizações irão agir em resposta a novos serviços e produtos.

Como a maioria das TEs começa como uma ideia conceitual, o fator ‘tempo’ é importante. Algumas organizações esperam até que uma TE amadureça e tenha especificações

⁶Disponível em <https://www.goldmansachs.com/insights/pages/internet-of-things/iot-report.pdf>. Acessado em 20 de julho de 2021.

e padrões (GUNASEKARAN; HARMANTZIS, 2007), de forma que a maturidade de uma TE leve à uniformidade dos padrões. Lin *et al.* (2007), ao abordarem fatores de investimento para projetos de tecnologia da informação, defendem que a maturidade de uma TE tem um impacto positivo na adoção de abordagens de avaliação de investimentos em TI. Isso significa que a decisão de investir em uma nova tecnologia depende do seu nível de maturidade.

2.1.1 Forças de Mercado e Inovação

Já foi reconhecido que os fatores do lado da demanda e os fatores do lado da tecnologia determinam conjuntamente o sucesso de P&D de uma empresa (LARSON *et al.*, 2017) e, portanto, produtos e serviços de sucesso dependem da combinação direcionada de atividades de atração de mercado e de impulso de tecnologia; fatores *push-pull*⁷ contribuem para aumento da inovação nas empresas (BREM; VOIGT, 2009).

Novas tecnologias proporcionam o desenvolvimento de novas formas de criação de valor para o mercado por meio da inovação (ZOTT *et al.*, 2010). Teece (2010) destaca que a inovação do modelo de negócios é um tipo de inovação que tem potencial para impactar fortemente o mercado e os concorrentes e pode ajudar a estabelecer uma vantagem competitiva diferenciável. No mesmo sentido, Amshoff *et al.* (2015) apontam que as TEs têm o objetivo de criar novas estruturas de negócios para um mercado inovador, no qual serviços ou produtos visam propor um valor único ao cliente, através da redefinição do que já existe no mercado.

Essas novas estruturas de negócios são altamente influenciadas pelas decisões tomadas nas fases iniciais de desenvolvimento e têm implicações de longo alcance na funcionalidade futura, custo e consequências ambientais da tecnologia, como declara Villares *et al.* (2017). Estes autores também sustentam que a avaliação de uma tecnologia em seus estágios iniciais de desenvolvimento pode facilitar aos desenvolvedores de tecnologia a compreensão das implicações das escolhas e suas consequências futuras.

Quando as organizações decidem por se engajar no desenvolvimento ou adoção de tecnologias, as estruturas corporativas visando o lançamento de novos produtos ou serviços serão modificadas, usualmente recaindo sobre políticas de atração de demanda ou a combinação de políticas que equilibrem os instrumentos de *push-pull* em setores emergentes (COSTANTINI *et al.*, 2017; HOPPMANN *et al.*, 2013). Ainda, Hoppmann *et al.* (2013)

⁷ A economia *push* representa o controle do mercado por parte do produtor, este pode agrupar grandes quantidades de consumidores, com as mesmas necessidades, e oferecer-lhes um produto genérico. Já na economia *pull* há a necessidade de identificar grupos de consumidores com diferentes necessidades, dispondo-lhes produtos customizados (Dias, 2005, p. 144-145).

revelam que as políticas de atração de demanda mudam a atenção das empresas para as atividades de implementação e, portanto, elas se concentram na utilização da tecnologia existente, em vez de desenvolver uma nova tecnologia.

Compreendidas as características, as forças mercadológicas e a importância de se avaliar as TEs em seus estágios iniciais, a partir de Bergerson *et al.* (2020) e Taherdoost (2018), cabe uma breve síntese (Quadro 1) sobre as principais teorias relacionadas à difusão de inovações e tecnologias.

Quadro 1 - Síntese das Principais teorias de Difusão de Tecnologias.

Teoria	Descrição
Estrutura de Tecnologia-Organização-Ambiente (TOE)	O ambiente de organização tecnológica (TOE) é um modelo em nível organizacional e um estatuto multiponto. As características tecnológicas, organizacionais e ambientais de uma estrutura organizacional afetam o método de adoção de invenções tecnológicas.
Modelo de Aceitação de Tecnologia (TAM)	O TAM esclarece a motivação do usuário em três recursos: usos percebidos, facilidade de uso e atitude de uso.
Teoria da Difusão de Inovações (DOI)	O modelo DOI observa uma variedade de inovações por meio do anúncio de quatro características (tempo, canais de comunicação, inovação ou sistema social) que efetua a difusão de uma inovação.
Características Percebidas da Teoria Inovadora (PCIT)	Este modelo se estende à teoria DOI, reconhecendo três outras características, a saber: imagem, voluntariado e comportamento.
Teoria Unificada de Aceitação e Uso de Tecnologia (UTAUT)	Analisa quatro precursores para a adoção de sistemas de informação. Fatores importantes são a antecipação de esforço, a expectativa de resultados, o impacto social e os condicionantes.
Compatibilidade UTAUT (C-UTAUT)	O objetivo deste modelo é aumentar a consideração de como as ocorrências cognitivas são feitas no modelo UTAUT, identificando e testando novas condições de contorno.

Fonte: adaptado de Bergerson *et al.* (2020) e Taherdoost (2018)

A difusão de uma inovação ou a falta dela é frequentemente bem explicada na **Teoria de Difusão da Inovação** de Rogers (2010), por três conjuntos gerais de variáveis: o conjunto de atributos de cada inovação (que é o foco deste estudo); as características dos adotantes, especialmente as percepções dos adotantes potenciais sobre as reações dos líderes de opinião ou influência social; e o contexto social e político mais amplo, incluindo a relevância das

questões relacionadas à inovação, o modo como os proponentes e oponentes enquadram o significado da inovação e o momento de sua introdução.

Esse processo de adoção de tecnologias pode ser dividido em cinco etapas, a saber: confirmação, conhecimento, implementação, decisão e persuasão. Para Dos Santos *et al.* (2018) estas etapas se relacionam por meio de uma série de canais de comunicação entre os membros de um sistema no qual se fazem presentes cinco conceitos principais para a aceitação de qualquer inovação: vantagem relativa, compatibilidade, complexidade, experimentabilidade e observabilidade.

A partir do processo de adoção pode-se classificar os adotantes, de acordo com suas distintas características, em cinco categorias: inovadores, adotantes iniciais, maioria inicial, maioria tardia e retardatários. A Figura 5 ilustra o conceito apresentado por Rogers. Em conclusão, Sila (2015) argumenta que a teoria de difusão foca nas características do sistema, atributos tecnológicos e aspectos ambientais, no entanto, possui um menor poder explicativo e prático para predição de resultados em comparação a outros modelos de adoção.

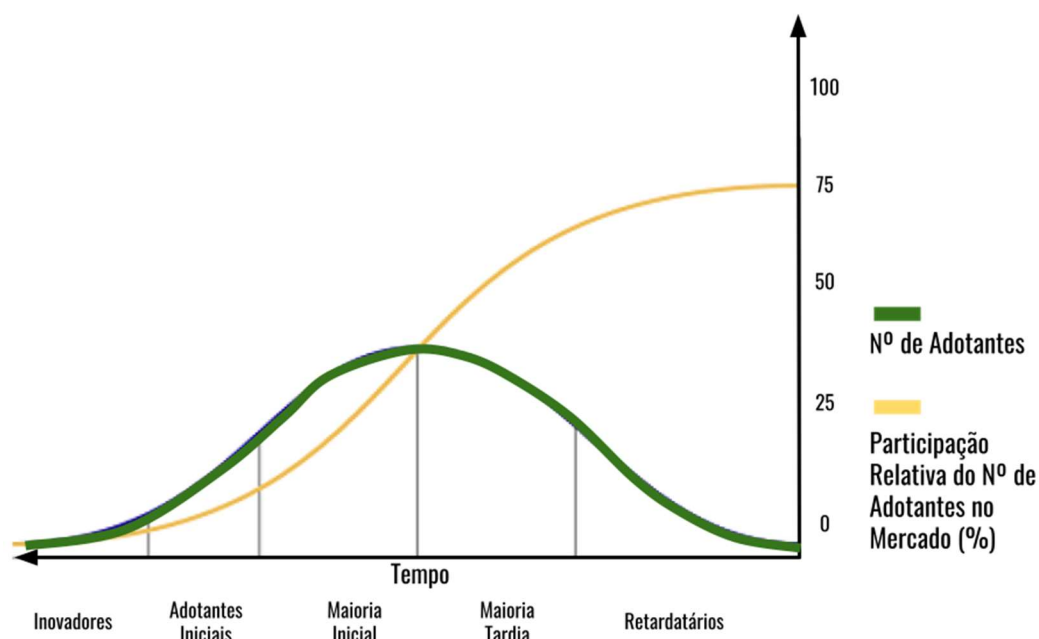


Figura 5 - Curva de Adoção de Inovação.

Fonte: adaptado de Rogers (2010)

2.1.2 Indústria 4.0: Origens, Evolução e Tecnologias Habilitadoras

Diferentes fases marcaram as Revoluções Industriais, iniciando-se com a transição dos métodos de produção manual para as máquinas durante o século XVIII, para as modernas

tecnologias digitais e de Internet (MARINHO, 2020). Segundo Giffi *et al.* (2014), com o passar dos tempos os processos industriais foram aprimorados através da automação e da utilização de tecnologias da informação. Schlaepfer *et al.* (2015), Kagermann *et al.* (2013) e Schwab (2017) convergem para a existência de quatro revoluções industriais, cada qual com seus efeitos na dinâmica econômica e produção de produtos e serviços inovadores.

A primeira revolução industrial tem a produção baseada em vapor, sendo intensificada no século XIX com a introdução de facilidades mecânicas na produção, promovendo a transição da economia agrária para manufaturas mecanizadas através de sistemas movidos a vapor e água (XU *et al.*, 2018). A partir de 1870, a segunda revolução se caracterizou pela adoção da eletricidade e da segmentação laboral, fundamentando a produção em massa através de motores à combustão e pela eletricidade. Foi neste período que as primeiras linhas de montagem foram introduzidas (XU *et al.*, 2018; FONSECA, 2018).

A introdução da automação e robótica inaugurou uma nova era: a terceira revolução industrial. Eletrônica e TI, computadores, robôs e a Internet constituem o início da era da informação na indústria (MARINHO, 2020). Também chamada de “revolução digital”, teve seu início em 1970, quando se desenvolveram avançadas técnicas de eletrônica e de tecnologia da informação para automação da produção (XU *et al.*, 2018; SCHWAB, 2017).

Por fim, a partir dos anos 90, houve uma migração dos princípios eletromecânicos para inteligência artificial, dando origem à quarta revolução industrial, também denominada Indústria 4.0. Esta nova revolução traz consigo uma nova lógica produtiva através da digitalização do ambiente de produção, permitindo parcerias entre atores de um ecossistema (SCHMIDT *et al.*, 2015).

O termo Indústria 4.0 surgiu em 2011 na Feira de Hannover. Segundo Hermann *et al.* (2015), a expressão envolve principalmente inovações tecnológicas aplicadas aos processos de produção na área de automação, controle e tecnologias de informação. Para os autores (2015, p.173), a I4.0 é “um termo coletivo para tecnologias e conceitos de organização de cadeias de valor”. Além disso, o conceito leva em conta o potencial disruptivo da integração de objetos físicos na rede de informação.

Para Arbix (2017), a Alemanha tinha uma estratégia de desenvolvimento e fornecimento de tecnologias para incrementar a produtividade do país com foco na exportação. Segundo Marinho (2020) a manutenção de empregos e a competitividade de pequenas e médias empresas também se tornaram o foco do governo alemão e de outros países europeus. Já na visão de Schwab (2017), a 4ª Revolução Industrial criará um mundo no qual a virtualização e os sistemas físicos de manufatura cooperarão um com o outro de maneira flexível. De acordo com o autor:

“Estamos a bordo de uma revolução tecnológica que transformará fundamentalmente a forma como vivemos, trabalhamos e nos relacionamos. Em sua escala, alcance e complexidade, a transformação será diferente de qualquer coisa que o ser humano tenha experimentado antes” (SCHWAB, 2017, p.7).

Schlaepfer *et al.* (2015) vê como ponto de partida desta nova revolução industrial a disponibilidade das informações relevantes em tempo real, conectando todas as etapas da cadeia de valor; a conexão entre pessoas, coisas e sistemas cria conexões dinâmicas, auto organizadas e otimizadas. O autor ainda afirma que a I4.0 pode ser entendida mais como uma visão do que uma definição. Para Schmidt *et al.* (2015), a I4.0 consiste na superposição de vários desenvolvimentos tecnológicos, os quais englobam produtos e processos, relacionando-se diretamente com os CPS, os quais fundem os fluxos de trabalho digital com os físicos, ou seja, as etapas de produção físicas são acompanhadas por processos computadorizados. Ainda, Strange e Zucchella (2017) descrevem o termo como uma estratégia para se referir aos CPS e processos dinâmicos que utilizam grandes quantidades de dados ou informações para operar máquinas inteligentes. Em outras palavras, a I4.0 refere-se ao surgimento e difusão de uma série de tecnologias digitais, de modo que produtos, dispositivos e máquinas possam se comunicar e interagir uns com os outros.

Heng (2014) descreve que a I4.0 é focada em produtos, procedimentos e processos inteligentes, portanto o elemento chave é a *Smart Factory* que controla o rápido crescimento da complexidade dos produtos, ao mesmo tempo que eleva a eficiência produtiva. Ou seja, tem-se a customização em massa, graças a comunicação direta entre homens, máquinas e recursos. Dessa forma, as fábricas inteligentes preconizam um sistema de produção descentralizado, onde máquinas, processos, seres humanos e recursos comunicam-se entre si e aprendem uns com os outros, e os dados relevantes e pertinentes permitem uma vantagem competitiva graças a resolução precoce de problemas e falhas (GHOBAKHLOO, 2018).

Kagermann *et al.* (2013) indicam que o objetivo principal da Indústria 4.0 é aproveitar o potencial tecnológico, por meio de um processo de inovação sistêmico baseado em desempenho, habilidades e *know-how* visando o desenvolvimento de redes de relacionamento entre empresas. Nessa direção, a utilização dos CPS em conjunto com métodos analíticos avançados irá permitir que a fábrica do futuro tenha máquinas conscientes capazes de prevenir potenciais problemas de desempenho por meio da avaliação de seus estados de degradação em conjunto com informações similares de seus pares (NETO *et al.*, 2018).

A classificação das diferentes características da I4.0 pode ser feita a partir da consideração da: (1) integração horizontal, a partir de redes de valor e (2) integração vertical e

conexão de sistemas de manufatura (ACATECH, 2013). A integração horizontal possibilita a colaboração entre diferentes corporações em um ecossistema eficiente, onde materiais e informações devem fluir em uma rede de valor (NETO *et al.*, 2018). A integração vertical, por sua vez, garante a comunicação dos diferentes sistemas hierárquicos de uma mesma empresa para a criação de sistemas de manufatura flexíveis e reconfiguráveis (WANG *et al.*, 2016). De acordo com Singh (2017, p.19):

“...graças à evolução tecnológica, um produto será capaz de se comunicar com as máquinas e/ou equipamentos de produção, surgirão então as fábricas e produtos inteligentes, os quais afetarão a cadeia de valor e os modelos de negócios”.

Uma vez que o sucesso das tecnologias da I4.0 depende do modo como os atores em um ecossistema se organizam no entorno das plataformas digitais, estes constituem uma participação importante em um negócio e uma forte influência na sua direção. Estes *stakeholders* são os principais impulsionadores da concepção e desenvolvimento de tecnologias para a I4.0. As descrições de Petrik e Herzwurm (2020) fornecem uma importante descrição sobre os *stakeholders* atuantes em plataformas digitais de aplicação industrial:

Fabricantes de equipamentos industriais. Eles combinam e ajustam vários componentes para os processos industriais e os integram nas máquinas. Além disso, atuam como fornecedor intermediário, pois eles, por exemplo, dão suporte às rotinas de manutenção da empresa operadora da máquina, estando, portanto, em contato com os clientes finais.

Fornecedores de componentes. Podem fornecer serviços de manutenção, pois têm a vantagem de controlar os dados acessados por meio de sensores integrados diretamente nos componentes. Essa cooperação permite que os fornecedores de componentes integrem suas ferramentas e recebam dados relevantes. Como os dados dos sensores dos componentes geralmente fluem no controle da máquina, razão pela qual eles muitas vezes dependem dos fabricantes de equipamentos industriais.

Fornecedores de tecnologia de automação. Eles oferecem sensores e componentes para controle e automação de máquinas e podem expandir sua oferta de produtos para a rede das máquinas com plataformas IIoT. Assim, os fornecedores de tecnologia de automação fornecem os complementos (sensores e/ou módulos de comunicação) que são necessários para a extração de dados de máquina e o controle de processos industriais, para então, encaminhá-los para as PDIs, garantindo a conectividade.

Empresas de Retrofit. Digitalizam máquinas mal conectadas e antigas, adicionando recursos de coleta de dados e conexão às plataformas. Além disso, eles digitalizam os ativos

não apenas para os fabricantes de equipamentos, mas também oferecem seus serviços para os clientes finais que operam as máquinas e que geralmente precisam lidar com máquinas heterogêneas que não podem ser facilmente conectadas entre si e com uma PDI.

Empresas de desenvolvimento de software. Desenvolvem ou personalizam módulos de software baseados em plataforma, integrando-os às PDIs.

Cliente Final (operador dos equipamentos e máquinas industriais). Os clientes finais estão em uma posição onde é possível mudar as estruturas colaborativas de valor entre os complementadores descritos acima e o provedor de uma plataforma IIoT. Eles podem processar e analisar sua produção por meio das PDI por meio de cooperação bilateral com o provedor da plataforma, sem necessariamente passar esses dados aos complementadores.

O tema Indústria 4.0 emerge da sobreposição de vários desenvolvimentos tecnológicos envolvendo produtos e processos (SCHMIDT *et al.*, 2015). Com um potencial bastante ambicioso, a I4.0 promete maior eficácia operacional, ganhos de produtividade, crescimento, e melhoria da competitividade. Por exemplo, permite que serviços possam ser oferecidos e utilizados por todos os intervenientes da cadeia de valor, assim, por exemplo, em vez de vender produtos finais, as empresas podem vender o seu *know-how* ou outros serviços (SANTOS *et al.*, 2018), permitindo que outras empresas ou parceiros usem suas competências e conhecimento para desenvolver seu próprio produto.

Em meio a quarta onda tecnológica, as transformações, segundo Rüßmann *et al.* (2015) e também reconhecidas pelo MCTI (2017), estão sendo impulsionadas por nove tecnologias, as quais podem ser classificadas como tecnologias habilitadoras, estando relacionadas com a capacidade de causarem mudanças tecnológicas radicais e gerar um ciclo acelerado de desenvolvimento. Para Marinho (2020) as tecnologias habilitadoras se resumem, mas não estão restritas à: *i*) Robôs Autônomos, *ii*) Simulação, *iii*) Integração Horizontal e Vertical, *iv*) Internet das Coisas (IoT), *v*) Cibersegurança, *vi*) Nuvem, *vii*) Manufatura Aditiva, *viii*) Realidade Aumentada e *ix*) *Big Data*. O Quadro 2 apresenta resumidamente as principais tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.

Quadro 2 - Descrição das principais tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.

Tecnologia Habilitadora	Descrição
<p>Robôs Autônomos e Inteligência Artificial</p>	<p>Um robô é um mecanismo programável, com um certo grau de autonomia, movendo-se em um ambiente para executar tarefas definidas. As tecnologias digitais, principalmente os sensores, influenciaram o desenvolvimento de tecnologias robóticas.</p>

(Continua)

Internet Industrial das Coisas (IIoT)	O termo <i>Industrial Internet of Things</i> refere-se a qualquer classe de tecnologias de identificação usadas na indústria para automatizar, reduzir erros e aumentar a eficiência.
Sistemas Ciber-Físicos (CPS - Cyber Physical System)	Os sistemas ciber-físicos são uma evolução dos sistemas embarcados, e baseiam-se em uma combinação entre elementos computacionais colaborativos, unidades de microcomputação ou sistemas interconectados por um sistema de comunicação, que controlam entidades físicas.
Sistemas de Integração Horizontal e Vertical	A indústria 4.0 está focada na digitalização dos ativos físicos das empresas e na integração de ecossistemas digitais na cadeia de valor. Isso diz respeito aos processos em toda a organização, desde o desenvolvimento e a compra de produtos, até fabricação, logística e serviços, e ofertas de serviços, incluindo a expansão dos produtos existentes.
Segurança Digital	É necessário ter uma atenção especial a um dos ativos mais importantes das companhias, a informação, no que tange ao seu manuseio e a segurança. Deve-se elaborar políticas de segurança da informação que abranja desde o processo de geração até o descarte das informações.
Computação em Nuvem	Permite acesso, sob demanda, a um conjunto compartilhado de recursos de computação configuráveis (MELL; GRANCE, 2011). Dentre eles, redes, servidores, aplicativos e serviços e armazenamento sob o gerenciamento ou interação com o provedor de serviços.
Realidade Aumentada e Realidade Virtual	São simulações geradas por computador e que apresentam ao usuário uma realidade alterada. A Realidade Virtual é um substituto da realidade, é uma recriação de um ambiente real ou imaginário que mascara o ambiente real, através de estímulos da tecnologia da visão e audição. Já a Realidade Aumentada não substitui a realidade, em vez disso amplia a realidade. Esta tecnologia adiciona melhorias geradas por computador a realidade existente, permitindo que o usuário interaja com a realidade de maneira mais significativa.
Big Data e Análise de dados	<i>Big Data</i> é um termo que descreve grandes volumes de dados, de alta velocidade, com complexas variáveis que requerem técnicas avançadas para permitir a captura, armazenamento, distribuição, gerenciamento e análise das informações. Para O'Donovan <i>et al.</i> (2015), instalações produtivas modernas são ambientes que geram, transmitem e analisam dados através de redes e produzem inteligência empresarial, que são traduzidos em eficiência operacional e inovação de processos.
Manufatura Aditiva	O termo refere-se à produção de peças pela construção de camadas sucessivas de material, de forma uniforme, e possibilita a impressão de uma grande variedade de objetos, de formatos diferentes. Opera de maneira autônoma, e tem como base modelos digitais em 3D. Também conhecida como Impressão 3D Industrial, está continuamente amadurecendo e tem uma enorme gama de aplicações na indústria (ACATECH <i>et al.</i> , 2013).

Fonte: adaptado de Marinho (2020) e MCTI (2017)

As fabricas inteligentes criam um ecossistema de forte interação entre os agentes chave. Sua arquitetura consiste em quatro camadas que cumprem diferentes papéis para a eficiência

do sistema. As camadas são denominadas: a camada física, de dados, de nuvem e inteligência e a camada de controle (WANG *et al.*, 2016).

Primeiramente, a camada física é formada por equipamentos e produtos inteligentes (WANG *et al.*, 2016). Nessa camada, é realizada a coleta de dados em tempo real e provida a comunicação entre dispositivos inteligentes para a transmissão de dados em alta velocidade (DA SILVA; WEBBER, 2020). Na camada de dados, a IIoT fornece suporte à novos protocolos e novos formatos de dados com alta flexibilidade e de forma escalável. A camada de nuvem e inteligência é capaz de analisar dados provenientes de diferentes fontes e com diversos formatos; a análise destes dados pode fornecer as bases científicas para a tomada de decisão (DA SILVA; WEBBER, 2020). A quarta camada, a de controle, é aquela que possibilita que os profissionais tomam as decisões de acordo com os dados disponíveis, com o intuito de aplicar diferentes configurações produtivas à fábrica, agendar manutenções ou realizar diagnósticos (CHEN *et al.*, 2017). A Figura 6 ilustra as camadas descritas anteriormente e situa as principais camadas de atuação de uma Plataforma Digital.

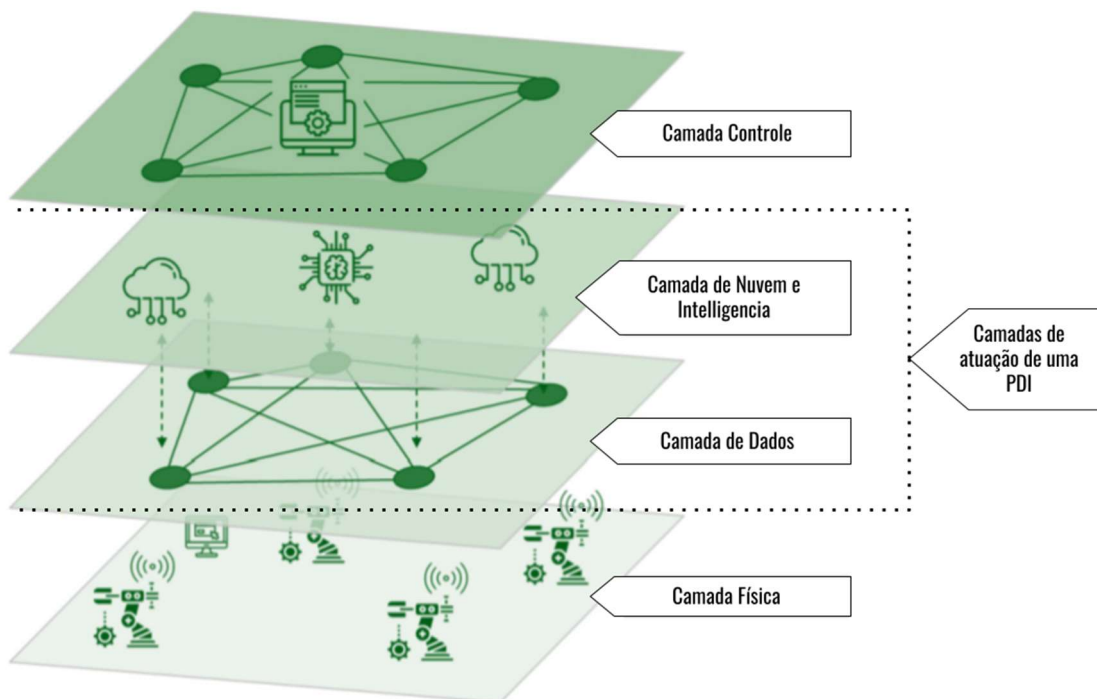


Figura 6 - As quatro camadas do conceito *Smart Factory*.

Fonte: adaptado de Osterrieder *et al.* (2020)

Os princípios de design de Hermann *et al.* (2015) fornecem uma melhor compreensão das características presentes nas tecnologias da I4.0. Para o autor, suas definições descrevem como a Indústria 4.0 pode influenciar a cadeia de valor que envolve as *Smart Factories*. Nesta

pesquisa, tais princípios auxiliam no entendimento dos atributos utilizados para avaliação da PDI, ou seja, os atributos da tecnologia analisada recaem dentro de um ou mais destes princípios. Estes princípios são:

- (i) **Interoperabilidade:** Significa que os CPS existentes em uma fábrica ou ambiente industrial, mesmo que manufaturados por fornecedores diversos, são capazes de se comunicar uns com os outros através das redes.
- (ii) **Virtualização:** Possibilita que os dados obtidos dos CPS a partir de produtos e equipamentos físicos sejam transmitidos aos modelos virtuais e em simulações, espelhando comportamentos reais no ambiente virtual.
- (iii) **Descentralização:** A crescente demanda por produtos customizados torna cada vez mais difícil controlar os sistemas de maneira centralizada. Os processos produtivos com computadores embarcados em conjunto com a IIoT habilitam os CPS a tomarem decisões por conta própria e em tempo real.
- (iv) **Adaptação da produção em tempo real:** Uma vez que os dados são analisados no instante em que são coletados, é possível que a produção seja realocada ou transferida para outras linhas ou máquinas em caso de falhas ou na hipótese de ser necessária a produção de bens customizados.
- (v) **Orientação aos serviços:** Dados e serviços são disponibilizados em rede aberta, tornando a *Internet of Services* (IoS) mais robusta. Dessa forma, a customização de processos de produção exige maior flexibilidade de adaptação de acordo com as especificações dos clientes.
- (vi) **Modularidade:** Sistemas modulares são capazes de se adaptar às mudanças nos requisitos, substituindo ou expandindo módulos individuais. Portanto, os sistemas modulares (equipamentos e linhas produtivas) podem ser ajustados em caso de flutuações sazonais ou em eventuais adaptações das características dos produtos.

2.1.3 Plataformas Digitais de aplicação Industrial

De modo geral, as plataformas digitais desempenham duas funções centrais: atuar como uma base tecnológica e como um intermediário de mercado (SCHREIECK *et al.*, 2016; GAWER; CUSUMANO, 2014). Do ponto de vista tecnológico, as plataformas de inovação permitem a criação de soluções complementares por terceiros, como fornecedores de aplicativos e usuários, oferecendo um mercado (PARKER *et al.*, 2016). As plataformas industriais muitas vezes desempenham essas duas funções em conjunto.

A ideia por trás das plataformas digitais industriais (PDI) é coletar e integrar dados de ativos industriais centralmente e aproveitar esses dados para a criação de aplicativos e serviços inteligentes com a ajuda de complementadores (BEVERUNGEN *et al.* 2019; SCHERMULY *et al.* 2019). Retornando à Figura 6, a plataforma em si contempla as camadas de “Dados” e “Nuvem e Inteligência”, desempenhando o papel de oferecer armazenamento de dados e capacidades de processamento (HODAPP *et al.*, 2019).

Em termos gerais, uma PDI atua como uma ponte entre os ativos industriais e as aplicações (WORTMANN; FLÜCHTER 2015), mais especificamente se utiliza dos sensores para captura de dados e atuadores. Em seguida, a camada de Nuvem e Inteligência fornece a conectividade realizando processos necessários para transferir os dados dos sensores para a plataforma, bem como transferir os dados de volta para provocar ações das máquinas.

Sob uma perspectiva técnica, a complexidade das PDI se refere a como seus componentes se relacionam e interagem entre si (BALDWIN; WOODARD, 2009). Normalmente, as PDI particionam um sistema de componentes de alta variedade (BALDWIN; WOODARD, 2009). Enquanto o núcleo da plataforma é padronizado, a variedade é introduzida nos módulos periféricos para atender às necessidades heterogêneas dos usuários. Os ativos e dispositivos industriais são significativamente mais complexos e heterogêneos, variando de máquinas de corte a laser, fornos, navios e fábricas inteiras, por exemplo (SISINNI *et al.*, 2018).

Mitigar a questão da heterogeneidade é uma das ideias centrais por trás das PDI. No entanto, não existe ainda um padrão universalmente aceito, levando a uma variedade de tecnologias de conectividade. Esta variedade de protocolos de comunicação e rede e formatos de dados é destacada como um dos principais desafios no desenvolvimento de soluções no domínio industrial (HODAPP *et al.*, 2019).

Além de sua complexidade técnica, as plataformas industriais digitais também exibem uma complexidade mercadológica mais elevada em relação a outros tipos de plataformas. Sob uma perspectiva de mercado, de acordo com sua capacidade de atrair terceiros, as PDI criam ecossistemas na forma de um conjunto de empresas interagindo e contribuindo de forma complementar (DE REUVER *et al.*, 2018).

O marketing e as vendas para clientes industriais são significativamente diferentes dos processos no domínio *Business-to-Customer* (BRENNAN, 2014). À medida que interage com o processo de compra do cliente, a venda de produtos e serviços pode envolver propostas técnicas detalhadas e relacionamento de longo prazo. A seleção de um serviço de manutenção preditiva, por exemplo, exigirá uma tomada de decisão multifuncional envolvendo, funções de aquisição, finanças, administração e engenharia.

Além disso, os ecossistemas em torno de plataformas industriais digitais, são caracterizados por relações não hierárquicas entre os atores (KAPOOR, 2018). Naturalmente, a transformação dos relacionamentos, de fornecedor para complementar, ou de cliente para parceiro, é um desafio. Além disso, a introdução de uma plataforma pode ter diferentes efeitos positivos e negativos sobre esses atores e, como tal, o provedor da plataforma deve equilibrar esses diversos interesses (BOUWMAN; FIELT *et al.*, 2008).

Por fim, uma vez que as plataformas digitais, em geral, foram discutidas principalmente na literatura de gestão, as características tecnológicas das diferentes plataformas foram amplamente abstraídas, resultando que "todas as plataformas tecnológicas são tratadas como um grupo homogêneo" (DE REUVER *et al.*, 2018, p. 127). No entanto, como discutido aqui, a interação da complexidade técnica e mercadológica é crítica para a implementação das plataformas digitais no ambiente industrial.

Assim, com base na discussão anterior e no entendimento de Pauli *et al.* (2021), as PDI (i) coletam e integram dados de um conjunto heterogêneo de ativos e dispositivos industriais, (ii) fornecem esses dados e suporte tecnológico adicional a um ecossistema de terceiros que desenvolvem e permitem soluções complementares que (iii) afetam a operação de ativos e dispositivos industriais e (iv) fornecem um mercado para facilitar as interações entre o proprietário da plataforma, terceiros e clientes empresariais.

2.1.4 Plataforma Digital Industrial para Manutenção

Apresentadas as particularidades relacionadas às Plataformas Digitais de aplicação industrial, cabe detalhar as nuances relacionadas ao nicho de atuação da PDI analisada nesta pesquisa. A Figura 7 ilustra os processos de uma PDI aplicável à manutenção preditiva. Resta informar sobre alguns métodos de manutenção preditiva, baseadas na descrição trazida pelo *Standardization Council Industry 4.0*⁸ (SGI4.0, 2018):

- (i) **Monitoramento de condição.** O monitoramento de condição é a base da plataforma de manutenção preditiva, geralmente executa o monitoramento de estado de falha de postos chave por meio de um terminal de detecção. De posse dos dados de condição, segue-se a modelagem matemática para analisar o equipamento

⁸ **SGI4.0.** The Standardisation Roadmap of Predictive Maintenance for Sino-German Industrie 4.0/ Intelligent Manufacturing. Disponível em: <https://www.dke.de/resource/blob/1711308/ad04db2c91a6749c86e7311c1a294644/the-standardisation-roadmap-of-predictive-maintenance-for-sino-german-industrie-4-0-data.pdf>. Acessado em: 10 de agosto de 2021.

e encontrar a relação de acoplamento entre os dados de entrada e saída de cada função.

- (ii) **Transmissão de dados.** A plataforma de manutenção preditiva pode suportar diferentes meios de comunicação (*fieldbus*, rede com e sem fio, etc.), interface de comunicação e suporte de interface de saída padrão externa, bem como aquisição de dados redundantes. Pode obter a interligação entre os equipamentos de diferentes tipos e os modelos cujo núcleo seja a plataforma.
- (iii) **Diagnóstico de falha.** A plataforma pode fornecer as funções de diagnóstico de falha e selecionar um ou mais modelos com rapidez e precisão para o tipo de equipamento e mecanismo de falha. Com o suporte da inteligência artificial, a plataforma pode realizar a auto otimização do modelo e melhorá-lo constantemente.
- (iv) **Decisão de manutenção.** Um modelo de otimização conjunta de manutenção preditiva e gerenciamento de peças de reposição é construído usando resultados de predição de falha. Por exemplo, comparando o custo da perda potencial causada pelo não reparo temporário e a manutenção imediata, pode-se recomendar ações de manutenção preditiva.

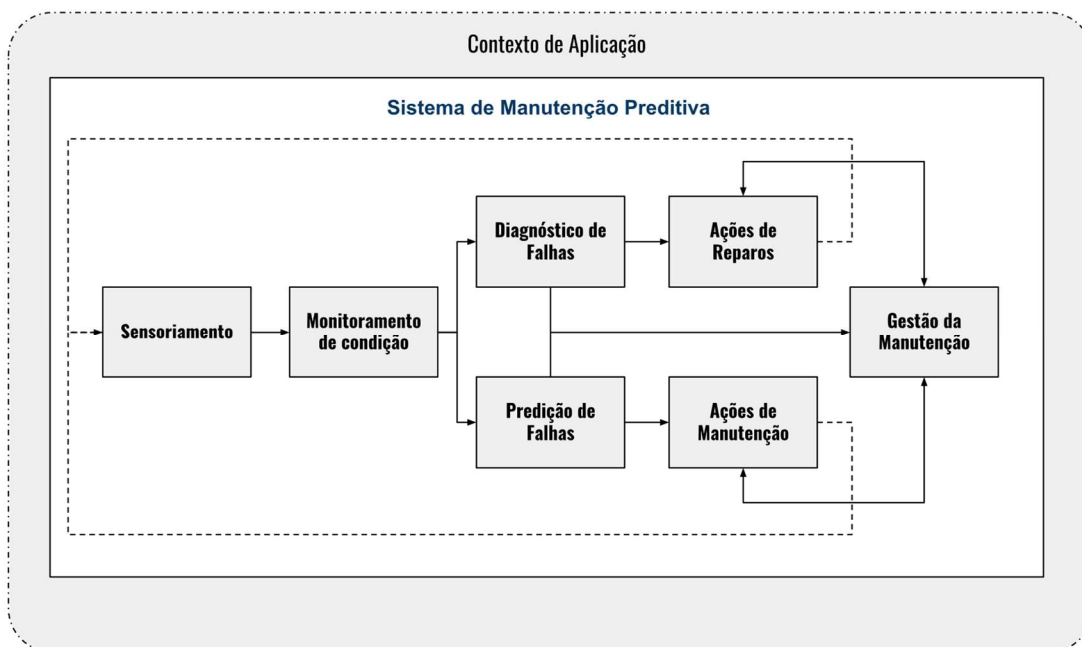


Figura 7 – Principais processos em uma Plataforma Digital de Manutenção Preditiva.

Fonte: adaptado de SGI4.0 (2018)

Assim, as plataformas de manutenção preditiva são tecnologias da I4.0 que fornecem a base técnica para a operação e manutenção de equipamentos e controle de empresas (com vários

subcentros de manutenção). Ao implementar as plataformas em suas operações, as empresas poderão alcançar a alocação ideal de recursos de manufatura e manutenção, o que se espera aumentar significativamente a qualidade de seus produtos e serviços.

2.2 Pensamento Sistêmico e Dinâmica de Sistemas

Conforme destacado na seção anterior, percebe-se que o emprego de tecnologias emergentes aplicadas à I4.0 sujeita-se grandemente às incertezas e efeitos de rede. Essas redes são compostas por muitos *stakeholders*, os quais podem operar de maneiras diferentes, impulsionados por motivações diferentes, enquanto tentam alcançar alguma inovação ou resultados específicos. Essas redes compartilham várias características comuns aos **Sistemas Complexos**, uma parte da abordagem que é geralmente definida sob a ampla perspectiva do Pensamento Sistêmico.

O Pensamento Sistêmico supera a abordagem reducionista ao trazer à luz os fatores de impactos sistêmicos. Conforme definido por Richmond (1994, p. 6), o Pensamento Sistêmico “é a arte e a ciência de fazer inferências confiáveis sobre o comportamento de variáveis, desenvolvendo uma compreensão cada vez mais profunda da estrutura subjacente”. Outra definição proposta considera o Pensamento Sistêmico como:

”...um processo de aprendizagem iterativo no qual substituímos uma visão reducionista de curto prazo e estática do mundo por uma visão holística ampla, dinâmica e de longo prazo, reinventando nossas políticas e instituições” (Sterman, 2006; p. 509).

Alguns autores defendem que a abordagem sistêmica é *bottom-up*, pois foca no sistema como um todo, levando em conta as interações dinâmicas, entre os vários agentes para entender como suas propriedades podem naturalmente evidenciar os caminhos da evolução de um sistema (STACE, 2002). Essa abordagem reconhece a existência de uma influência externa, pois a ação dos diversos atores em um sistema pode alterar seu caminho de evolução como um todo. As diversas teorias de sistemas e a teoria de sistemas complexos e suas várias correntes compartilham algumas características com as redes de inovação presentes no contexto da I4.0 (MITLETON-KELLY, 2003), por exemplo a (i) conectividade e interdependência dos atores, a (ii) coevolução dos atores do sistema e a presença de algum tipo de *feedback* para regulá-lo e a (iii) presença de estruturas capazes de interagir com o ambiente externo à própria rede.

Nos sistemas complexos os *feedbacks* são presentes e dinâmicos devido à sua capacidade contínua de mudar, adaptar e reorganizar em resposta ao seu ambiente (MEADOWS, 2008). Para Meadows (2008), a auto-organização é um conceito usado para descrever a adaptação dos sistemas ao seu ambiente e estudar como os sistemas se organizam, mudam e/ou inovam. A Figura 8 ilustra como as interações entre os elementos em um sistema se organizam nesse processo dinâmico para formar uma ordem emergente.

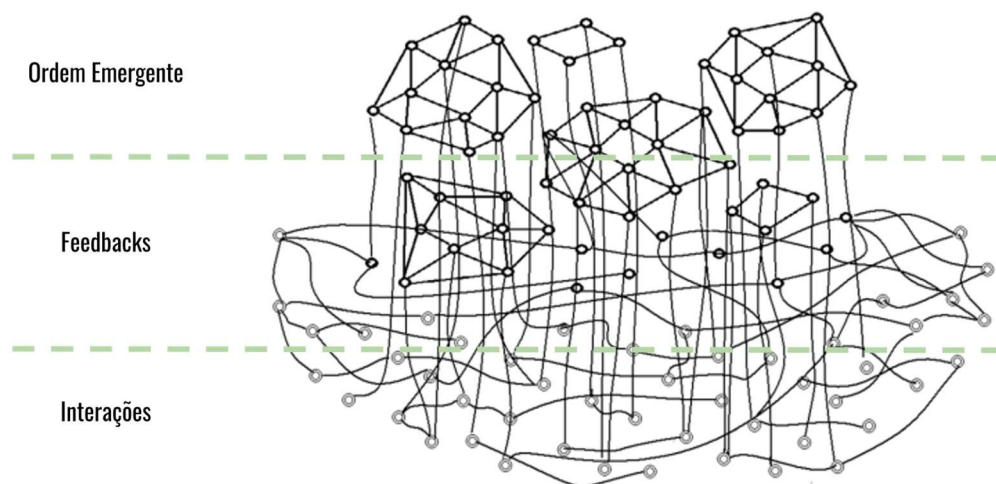


Figura 8 - Organização dos Sistemas Complexos.

Fonte: Mitleton-Kelly (2003, p.23)

Assim, analisar a estrutura de um sistema através da perspectiva de sistemas complexos pode ser útil para entender melhor a relação entre o comportamento de cada agente e o todo, bem como o efeito da dinâmica relacionada (DOMINICI; LEVANTI, 2011; MCCARTHY *et al.*, 2000), sendo essa compreensão essencial para os conceitos de emergência tecnológica tratados neste estudo. Além disso, ao incorporar essa perspectiva, os problemas são percebidos como tendo grandes padrões que são interconectados. Esses padrões de relacionamento e como eles interagem com o resto das partes do sistema é a base do Pensamento Sistêmico (ARONSON, 1996).

O Pensamento Sistêmico pode ser visto como uma linguagem de comunicação dos vários processos e inter-relações de um sistema complexo de modo a auxiliar o processo de tomada de decisão. Como os problemas do mundo real são altamente dinâmicos e complexos com grande grau de incerteza, a abordagem linear e reducionista tradicional parece não ser mais relevante para entender com maior profundidade sistemas complexos (KOTIR *et al.*, 2017).

Richmond (1997) e Von Thiele Schwarz (2017) sugerem que o hábito de pensar sistemicamente possa ser construído a partir de algumas práticas:

- (i) **Pensamento dinâmico.** É essencialmente uma aplicação mental do comportamento. Um problema pode ser enquadrado em termos de um **padrão de comportamento** ao longo do tempo. Significa que é preciso colocar uma situação no contexto de escala de tempo;
- (ii) **Pensamento Sistêmico como causa.** A determinação de explicações razoáveis para os padrões de comportamento reconhecidos com o pensamento dinâmico é permitida por essa forma de pensamento. Além disso, essa perspectiva significa observar o comportamento de um sistema como resultado dos sistemas e, como tal, sob o controle dos tomadores de decisão;
- (iii) **Pensamento da floresta.** É visualizar o quadro completo;
- (iv) **Pensamento operacional.** Significa identificar as causas para se determinar **como** o comportamento é produzido; e,
- (v) **Pensamento de ciclos fechados.** Sustenta que a causa não ocorre em apenas uma direção, mas geralmente retroalimenta uma ou mais causas, e estas, por sua vez, afetam-se mutuamente (Richmond, 1997).

Para que seja possível identificar os inter-relacionamentos presentes nos sistemas, faz-se necessário uma linguagem que melhor represente esta realidade (SENIGE, 2004). Os elementos centrais da linguagem sistêmica são as variáveis, representando os elementos que compõem os sistemas, e estas variáveis se relacionam entre si influenciando umas às outras, direta ou indiretamente (Morandi, 2008). Quanto ao tipo de influência (direta ou inversa), estas são normalmente identificadas com a colocação do sinal “+” ou “-” junto à extremidade das setas de ligação entre as variáveis, porém algumas variações, como “o” (*opposite*) e “s” (*same*) são encontradas na literatura.

Segundo Senge *et al.* (1997), existem dois tipos de construções: enlaces reforçadores e enlaces balanceadores ou de equilíbrio. Morandi (2008) destaca que os enlaces reforçadores geram crescimento ou colapso exponencial, uma vez que uma pequena mudança se apoia em si mesma para gerar mais mudança, gerando situações que são chamadas de ciclos virtuosos ou ciclos viciosos, dependendo se a mudança é benéfica ou não.

Em um enlace reforçador ou ciclo de *feedback* positivo os elementos de um mesmo enlace se auto reforçam, de forma que quanto maior o impulso inicial de um elemento maior o impulso consequente em outro elemento do ciclo (SENIGE *et al.*, 1997). Morandi (2008) salienta o fato observado por Senge: sempre há pelo menos um mecanismo que limita o

crescimento ou o declínio; mesmo que não seja visível no período analisado um limite aparecerá, sendo que na maioria dos casos ocorrem múltiplos limites.

Por outro lado, os enlaces balanceadores ou ciclos de *feedback* negativo são ciclos de causa e efeito que contrariam uma mudança através de um impulso na direção oposta (SENGE *et al.*, 1997). Quanto mais forte o impulso sobre um elemento no ciclo, mais forte o sistema impulsiona de volta. Para Andrade *et al.* (2006), tais enlaces são os tipos de estruturas que trazem estabilidade a um sistema. Muitas vezes, em um ciclo equilíbrio, há algum tipo de meta ou objetivo implícito ou explícito pelas forças do sistema.

Morandi (2008) acrescenta ainda o fato de que as relações de causa e efeito podem ocorrer de forma instantânea ou com atrasos. Nos Diagramas de Enlace Causal, por exemplo, relações do tipo imediatas são representadas por setas contínuas, enquanto que os atrasos são representados por uma interrupção nas setas de ligação entre os elementos do sistema. Destaca-se que a falta de reconhecimento destes atrasos pode abalar a confiança das pessoas nos enlaces, pois o crescimento não vem tão rápido quanto se espera, no caso dos enlaces reforçadores, ou o equilíbrio não é atingido na velocidade esperada, quando se trata dos enlaces balanceadores. Quando ocorrem atrasos, as pessoas tendem a reagir com impaciência, normalmente redobrando seus esforços para conseguir o que querem, o que frequentemente resulta em oscilações desnecessariamente violentas. “Um dos propósitos de se traçar diagramas sistêmicos é assinalar atrasos que de outra maneira poderiam passar despercebidos” (MORANDI, 2008, p. 46).

Por causa da complexa formulação de um sistema para avaliar o potencial de adoção de tecnologias, empregar uma mentalidade sistêmica permitirá que os profissionais de desenvolvimento e decisores entendam como a priorização de certos elementos, alguns deles encobertos à percepção, poderá influenciar esse potencial.

Pode-se dizer que uma das aplicações do Pensamento Sistêmico seja a de reproduzir as estruturas de um determinado problema. Isso permite que a gestão implemente soluções que terão os melhores resultados em termos de alcance dos objetivos da organização. Para Galli *et al.* (2017), identificar problemas estruturais consiste em encontrar e conectar o maior número de entidades que direta e indiretamente suspeita-se serem as causas do problema em análise. Essas conexões entre os elementos devem ser indicadas. Para tanto, um Diagrama de Enlace Causal (CLD) pode ser construído mostrando tais relações entre as variáveis.

2.2.1 Diagramas de Enlace Causal

O Diagrama de Enlace Causal (CLD – do inglês, *Causal Loop Diagram*) é uma das ferramentas mais importantes e amplamente utilizadas da Dinâmica de Sistemas para entender a relação entre diferentes variáveis que afetem o comportamento de um sistema (KIM, 1994). Os CLDs são conectados por nós e arestas e levam em consideração explicitamente o processo de *feedback* e os atrasos de tempo das variáveis. Para Lane (2016), os CLDs facilitam a visualização, ajudando a envolver as partes interessadas durante o processo de modelagem e facilitam a extração de seus modelos mentais.

Sterman (2000) apresenta os CLDs como ferramentas para mapear as hipóteses das estruturas do sistema ligando as relações causais entre as variáveis. Os CLDs não são a simulação final nem são uma parte obrigatória do processo de modelagem de Dinâmica de Sistemas (MARTINEZ-MOYANO, 2013), no entanto, os CLDs permitem uma transição mais suave para os diagramas quantitativos de estoque e fluxo usados nas simulações computadorizadas (ABDELBARI; SHAFI, 2017).

Em vista disso, Senge *et al.* (1997) recomendam a utilização dos CLDs como instrumento de linguagem. A argumentação é de que:

- (i) os CLDs oferecem uma maneira eficiente de traduzir a linguagem natural para a linguagem sistêmica, envolvendo as influências mútuas dos elementos do sistema por meio dos ciclos de balanceamento; e,
- (ii) a linguagem molda o pensamento. Uma linguagem que trate mais adequadamente as complexidades dinâmicas permite um modo de pensar mais eficiente.

Nos CLDs os *feedbacks* são as interconexões que ilustram a auto-organização em sistemas complexos (RICKLES *et al.*, 2007). O comportamento de sistemas complexos é em grande parte o efeito cumulativo de mecanismos de *feedback* positivo e negativo, podendo descrevê-los como 'virtuoso' ou 'vicioso', respectivamente (CHECKLAND; SCHOLLES, 1990).

O desenvolvimento dos CLDs envolve a identificação de *stakeholders* e variáveis endógenas e a formulação de relações causais entre as variáveis (STERMAN, 2000). Esse processo consiste em: coletar, refinar e validar os dados de modo iterativo muitas vezes usando uma abordagem principalmente qualitativa, incluindo revisões de literatura, observações, entrevistas e consultas com as partes interessadas (FORD; STERMAN, 1998).

Apesar das facilidades obtidas com o uso dos CLDs, admite-se que um CLD é imperfeito para muitas situações, pois oferece oportunidades limitadas à análise qualitativa (MARTINEZ-MOYANO, 2013). Por outro lado, destaca-se que o uso adequado de um modelo

computadorizado nem sempre é viável, pois pode exigir consideravelmente mais esforço que um CLD (COYLE, 2001). Este esforço não é aceitável quando uma decisão deve ser realizada rapidamente ou quando as apostas não são altas o suficiente para justificar tal investimento (HOMER; OLIVA, 2001).

Experiência com seções práticas (VENNIX, 1996) mostraram que as partes interessadas nem sempre são capazes de produzir dados quantitativos com um esforço aceitável, mas são mais aptos a concordarem com uma visão um tanto holística das dimensões ‘força’ e ‘velocidade’ das relações causais fornecidas por um CLD. Segundo o autor, nessas situações é desejável ter um método que possa lidar com informações gerais sobre estas duas dimensões e que possa fornecer resultados que geralmente são relevantes para uma análise sobre alavancas em um sistema. O autor lista que os resultados esperados de uma análise utilizando os CLDs geralmente incluem percepções sobre:

- (i) o consenso sobre a estrutura do problema;
- (ii) o poder relativo dos ciclos de *feedback* identificados;
- (iii) o comportamento do problema ao longo do tempo;
- (iv) os efeitos esperados das intervenções propostas e,
- (v) as variáveis adequadas a se propor intervenções.

Na Dinâmica de Sistemas, arquétipos são padrões de comportamento categorizados formados por combinações de enlacs, cujos comportamentos já são conhecidos, reduzindo a necessidade de simulação, caso mais enlacs e variáveis não sejam adicionados (ZINI, 2015; LOPES; VIDEIRA, 2015). Outra função dos arquétipos é facilitar o consenso com linguagem e estrutura para a interpretação dos comportamentos, facilitando a compreensão das variáveis mais relevantes de um sistema.

Contudo, na implementação de tecnologias para a I4.0, por sua natureza incerta, muitas vezes não é possível medir esta recorrência. Por esse motivo, faz-se necessária a utilização dos arquétipos para encontrar possíveis elementos impulsionadores de eventos ainda que estes estejam longe do campo de visão dos analistas e decisores. Assim, ao possibilitar a análise dos mecanismos comportamentais das incertezas é possível, por meio dos arquétipos adequados, enfocar as causas e efeitos das incertezas existentes na implementação de tecnologias da I4.0. Em especial, destaca-se o arquétipo de **crescimento e declínio** apresentado na Figura 9.

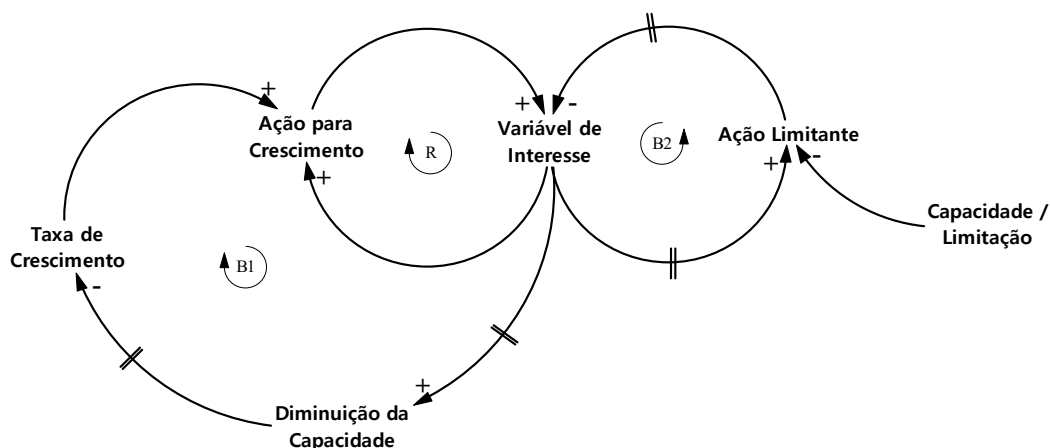


Figura 9 – Arquétipo de Crescimento e Declínio.

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em Sterman, 2000

O arquétipo representa o declínio de uma atividade devido ao esgotamento de um recurso (STERMAN, 2000). Ele é estruturado através de um enlace reforçador, representando o aumento da atividade, um enlace balanceador, para representar o interesse na utilização do recurso, e outro enlace balanceador para o consumo do recurso (ZINI, 2015). Verificou-se que a incerteza sobre fatores como concorrência, novos entrantes ou tecnologias substitutas, recai neste arquétipo. Podendo então, ser aplicado para estruturar comportamentos que reflitam o interesse e desinteresse dos adotantes de uma tecnologia ou inovação.

Findando este tópico, a complexidade que observamos no comportamento de um sistema se deve a mudanças na dominância dos ciclos de *feedback* ao longo do tempo, o que também é válido para atrasos e informações que existem dentro do sistema. Isso significa que o comportamento futuro dos sistemas complexos precisa ser compreendido com o auxílio de ferramentas essenciais como o Pensamento Sistêmico e os CLDs. Na subseção seguinte buscase apresentar métodos úteis à quantificação das relações de causa e efeito presentes em um sistema.

2.2.2 Análise de Impacto Cruzado

A análise de impacto cruzado (CIA, do inglês *Cross-Impact Analysis*) é uma abordagem usada em estudos de pesquisa de futuros que surgiu em meados da década de 1960 (GORDON; STOVER, 2003; GORDON; HAYWARD, 1968) e foi inicialmente desenvolvido para analisar sistemas estruturados (*soft*) para os quais modelos computacionais (*hard*) não funcionam adequadamente devido à complexidade, incerteza e heterogeneidade disciplinar presentes em determinados sistemas.

Desde a sua criação, a CIA tem sido um “método genérico para avaliar as inter-relações de fatores influentes em um sistema por meio de avaliações subjetivas aos pares desses fatores” (WEIMER-JEHLE, 2006, p. 336). Os diferentes métodos de análise de impacto cruzado diferem em como essas inter-relações são formuladas (probabilística ou determinística) e se uma abordagem qualitativa, quantitativa ou mista é usada para descrever as causalidades no sistema (ASAN; ASAN, 2007).

Além disso, como afirma Weimer-Jehle (2006), a CIA é particularmente apropriada para lidar com questões sociais humanas de grande escala, como as relacionadas à aceitação de uma nova tecnologia. Sua abordagem é flexível e se basta à avaliação de especialistas, o que é importante para identificar efetivamente as causas reais de um problema, em vez de um mero palpite intuitivo. Além disso, sua flexibilidade e versatilidade dá condições para que a ferramenta seja utilizada para comparar e descobrir os cenários mais apropriados em sistemas complexos (MUSKAT *et al.*, 2012).

Como a CIA admite uma grande quantidade de variantes, nesta proposta, a CIA se fundamenta em duas matrizes onde as variáveis são comparadas aos pares (ASAN; ASAN, 2007; WEIMER-JEHLE, 2006); na primeira são avaliados os impactos, e na segunda, é considerada a temporalidade. Essa ferramenta pode ser derivada dos CLDs como utilizada em diferentes ocasiões por diversos autores (LIEBOVITCH *et al.*, 2020; VIDEIRA, 2014; YEARWORTH; WHITE, 2013).

Em síntese, a análise proposta neste estudo segue a formulação utilizada por Beck *et al.* (2012), visando preencher lacunas existentes em outras abordagens não sistêmicas. Com esta formatação, procura-se provocar indagações como: **(i) Quais variáveis são mais influentes no CLD e, portanto, apropriadas para sofrer intervenção no sistema?** e **(ii) quais variáveis são mais adequadas para se medir mudanças no sistema?** Quanto às relações temporais entre as variáveis, busca-se estimar o intervalo de tempo entre o início da intervenção em uma variável e a chegada do impacto na variável relacionada. Sob essa segunda perspectiva, procura-se motivar questionamentos do tipo: **(i) Quanto tempo leva até que uma intervenção no sistema produza uma mudança detectável em uma variável (indicador)?** e **(ii) Qual é a magnitude do efeito na variável indicadora após uma intervenção?**

Matriz de Impacto. Na primeira perspectiva, a matriz de impacto (CIM - *do inglês, Cross-Impact Matrix*) descreve a influência e dependência de cada variável no sistema. Nela, são atribuídos escores entre os pares de variáveis para determinar a representatividade do impacto entre estas relações. Em contraste com Gomez e Probst (1999), onde todos os impactos, diretos e indiretos, são avaliados, nesta pesquisa apenas os links diretos são levados em

consideração. Para Beck *et al.* (2012) avaliar apenas as relações diretas melhora a qualidade dos dados e das avaliações coletadas por conta da dificuldade que os avaliadores têm em prover julgamentos sobre relações indiretas.

Matriz de Tempo. Considerar a dimensão temporal nas relações entre as variáveis é de extrema importância na abordagem de Dinâmica de Sistemas. Embora a CIA tradicionalmente não reflita o impacto do tempo nos eventos (RAUBITSCHKE, 1988), várias versões da CIA incorporam a noção de temporalidade. Uma dessas primeiras versões, proposta por Gordon e Hayward (1968), aborda o efeito de mudanças em uma variável em um instante no tempo, onde os atrasos de tempo são implícitos pela causalidade. Já os autores Mitchell e Tydeman (1978) apontam que a ordem dos eventos muitas vezes influencia estimativas de probabilidade. Muskat *et al.* (2012) traz a estimativa do comportamento das variáveis ao longo do tempo como fator chave, onde o impacto da mudança é importante, enquanto que Helmer (1981) considera as probabilidades dos eventos em função do tempo.

A definição de **influência e dependência** obtidos da CIM é estendida ao incorporar o conceito de **incerteza** promovido pela CTM (*Cross-Time Matrix*) de forma que uma variável possui duas características: **importância e incerteza**. A importância de uma variável descreve que variável relevante deve influenciar fortemente outras variáveis e, ao mesmo tempo, ser influenciada por elas. É por isso que ela se torna importante para prever o desenvolvimento futuro do sistema. Já a incerteza refere-se à previsibilidade incompleta dos desdobramentos futuros (GORDON, 2013). No contexto deste estudo, quanto mais tempo leva para um impacto surgir, mais incerto ele se torna (ASAN *et al.*, 2016), portanto, a incerteza é associada ao intervalo de tempo. De fato, a capacidade dos especialistas de antecipar eventos futuros que afetem de forma imprevista o sistema é reduzida em relações de longo prazo (PAHL *et al.*, 2014).

Uma vez que se procura identificar as variáveis-chave com base na importância e na incerteza, uma variável que seja identificada por um alto valor de influência e dependência, portanto de alto impacto, e curta defasagem de tempo implica em uma variável-chave ideal. Nesse contexto, a combinação das dimensões de impacto e de tempo são importantes para os tomadores de decisão identificarem as variáveis que podem ser usadas para intervenção ou como indicadores. Para agregar impacto e tempo de forma a expandir a análise, a CIA deve ser empregada tendo por objetivo maior identificar as variáveis-chave adequadas a serem representantes fidedignas do sistema em estudo.

2.2.3 Planejamento de Cenários

Frequentemente, a abordagem de Pensamento Sistêmico aparece associada ao Planejamento de Cenários, permitindo que a organização visualize a aplicação das soluções projetadas nos modelos de Dinâmica de Sistemas. O uso sinérgico destas abordagens tem sido útil como apoio ao processo estratégico das organizações (MORANDI, 2008; ANDRADE *et al.*, 2006).

O Pensamento Sistêmico possibilita o entendimento das forças estruturais que moldam a realidade atual, enquanto o Planejamento de Cenários promove o aprendizado organizacional, o desafio dos modelos mentais e a visualização dos futuros possíveis (MORANDI, 2008; ANDRADE *et al.*, 2006). Oliver e Parrett (2018) o classificam como uma técnica que ajuda os tomadores de decisão com a direção estratégica em ambientes de negócios incertos. Para Bowman *et al.* (2013), o Planejamento de Cenários é uma ferramenta de gestão estratégica amplamente utilizada para entender a incerteza ambiental futura.

O Planejamento de Cenários tem sido proposto por vários autores como uma abordagem sistemática para criar e testar possíveis cenários futuros em ambientes incertos (MAANI; CAVANA, 2007). Ao contrário da previsão, que extrapola tendências passadas e presentes para prever o futuro, o Planejamento de Cenários é um método estratégico desenvolvido expressamente para permitir que os gestores ensaiem o futuro.

Desde a década de 1970, o Planejamento de Cenários ganhou destaque como ferramenta estratégica e recentemente assumiu um lugar de destaque no desenvolvimento de *roadmaps* (MILLER; WALLER, 2003). Tem como principais vantagens pensar de forma não numérica, pensar em sistemas, ser uma ferramenta flexível e adaptativa, ter foco externo e promover a coordenação e a comunicação (MILLER; WALLER, 2003). Coates (2000) enfatiza que o valor do Planejamento de Cenários é poder apresentar todos os elementos de sistemas complexos juntos de forma coerente, sistemática, abrangente e plausível. Dentro da literatura, nenhuma abordagem única é dominante e a revisão de Amer *et al.*, (2013) revela que existem várias metodologias de Planejamento de Cenários.

Andrade *et al.* (2006) destacam que os principais produtos desse método são: o crescimento da aprendizagem com abordagem de questões críticas, a construção do planejamento estratégico, o planejamento de mudanças profundas, o desenvolvimento de uma visão de futuro para a organização, a identificação de oportunidades de mercado e a abordagem de projetos complexos. O Planejamento de Cenários geralmente requer o desenvolvimento e uso de modelos para antecipar possíveis futuros e avaliar as implicações das decisões de gestão sobre esses futuros.

2.2.4 Dinâmica de Sistemas para lidar com Sistemas Complexos

A abordagem de Dinâmica de Sistemas foi criada na década de 1950 por Jay Forrester no Massachusetts Institute of Technology (MIT). O conceito central em Dinâmica de Sistemas é entender a estrutura básica de um sistema e como os objetos do sistema interagem uns com os outros. Para Sterman (2000) A Dinâmica de Sistemas permite a aprendizagem sobre sistemas complexos. Ela usa mapas informais e modelos computacionais formais para descobrir e entender as fontes endógenas de comportamento do sistema. Para o autor, a Dinâmica de Sistemas essencialmente relaciona o comportamento das variáveis aos *feedbacks* que existem dentro do sistema. A partir desse entendimento, é possível formular hipóteses, testar e refinar explicações de mudança no sistema e usar essas explicações para orientar a política e a tomada de decisões (MORANDI, 2017).

Adicionalmente, faz-se a distinção entre modelagem *soft* e *hard*. A ideia associada à modelagem *soft*, defendida por Checkland entre outros pesquisadores, refere-se a abordagens conceituais e contextuais que buscam maior realismo, pluralismo e uma intervenção mais holística que a modelagem *hard* (BASTOS, 2003). Os conceitos de modelos *soft* e *hard* são comumente relacionados às ideias de qualitativo e quantitativo, respectivamente (MAANI; CAVANA, 2000).

A Dinâmica de Sistemas lida com as duas abordagens, sendo que, as definições tratadas por Senge tendem a recorrer às abordagens *soft*. Já as simulações próximas à linha de estudo de Forrester têm maior afinidade com o conceito *hard* de modelagem (MAANI; CAVANA, 2000). As diferenças entre as abordagens *soft* e *hard* estão resumidas no Quadro 3 (BASTOS, 2003, p.43).

Quadro 3 - Síntese das diferenças entre as abordagens *Soft* e *Hard* em Dinâmica de Sistema

	<i>SOFT</i>	<i>HARD</i>
Definição do modelo	Um método para gerar debates e <i>insights</i> sobre a realidade.	Uma representação da realidade.
Agentes / Organizações	Partes integrantes do modelo.	Não são levados em conta.
Dados / Informações	Qualitativos.	Quantitativos.
Definição do problema	Múltiplas dimensões (objetivos diversos).	Uma única e bem definida dimensão (objetivo específico).

(*Continua*)

Objetivos	<i>Insights</i> e aprendizagem.	Soluções e Otimizações.
Resultados	Aprendizado em grupo ou auto-desenvolvimento.	Produtos ou recomendações.

Fonte: adaptado de Bastos (2003, p. 43)

Um enredo baseado na Dinâmica de Sistemas cria uma compreensão dos sistemas complexos nos quais as empresas podem avaliar o resultado quando um ou mais fatores mudam. Além da criação de cenários, a Dinâmica de Sistemas permite testar suposições e avaliar os impactos das mudanças no sistema; políticas ou estratégias identificadas podem ser julgadas em diferentes cenários.

Bastos (2003) ressalta que a Dinâmica de Sistemas tem sido usada de maneira que objetivo principal não é a simulação exata do comportamento dos sistemas organizacionais, pois a ideia principal é a possibilidade de avaliar os padrões de comportamento do sistema visando ao aprimoramento dos modelos mentais. Isso cria uma melhor compreensão do complexo sistema em uma empresa esteja operando e o ajuste entre a direção estratégica escolhida e o futuro incerto.

Como a maioria destes sistemas são de difícil compreensão, é comum aplicar-se a integração numérica para a sua solução por meio de simulações que podem ser realizadas em um computador (STERMAN, 2000). Os modelos computadorizados geralmente têm se diferenciado por modelos de previsão, modelos de séries temporais (BURGER *et al.*, 2001), modelos econométricos (ALGIERI, 2006) e, mais recentemente, redes neurais (PALMER *et al.*, 2006).

Pidd (1998) conceitua modelo como sendo uma representação externa e explícita de parte da realidade vista pela pessoa que deseja usar aquele modelo para entender, mudar, gerenciar e controlar parte de uma realidade. Morandi (2008) e Andrade *et al.* (2006) corroboram com esta definição ao afirmarem que um modelo computacional é uma redução simplificada da realidade, construída em computador, cujo objetivo primordial seja desenvolver aprendizagem. Já Morecroft (1984) os reconhece como um método adequado para a modelagem de alternativas estratégicas para negócios. Para Pidd (1998) a modelagem computacional utiliza os Diagramas de Estoque e Fluxo (Figura 10) para criar um modelo quantitativo a partir de um modelo qualitativo.

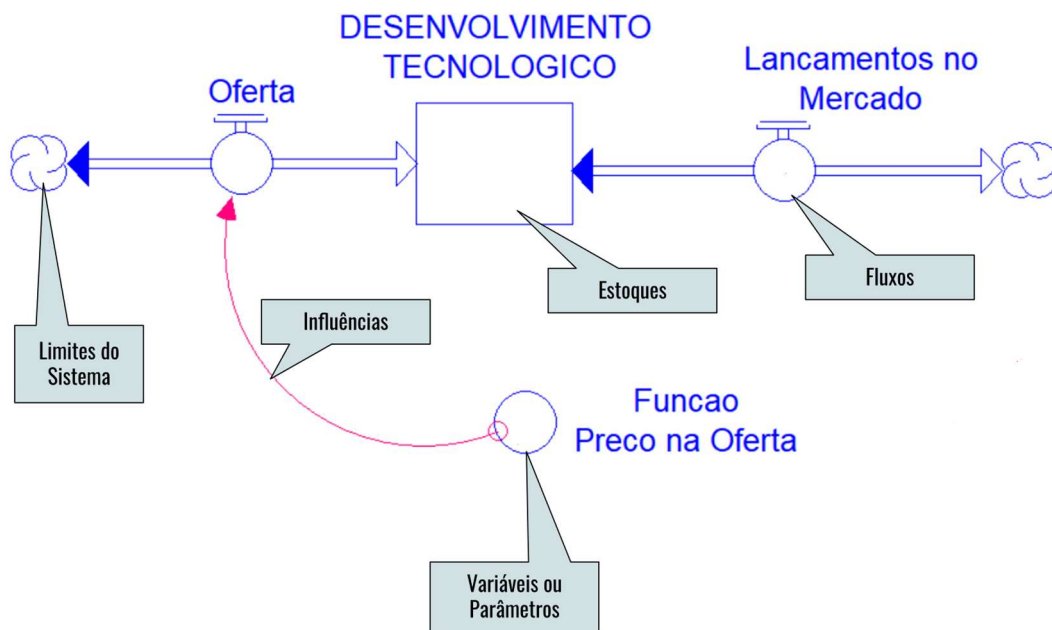


Figura 10 - Exemplo de Diagrama de Estoque e Fluxo.

Fonte: Andrade (2006)

Diferentemente dos CLDs, nos Diagramas de Estoque e Fluxo, a estrutura do sistema é representada por equações diferenciais, possibilitando a quantificação das relações entre os elementos do sistema (PIDD, 1998). No processo de tradução dos modelos mentais para o modelo computadorizado, Sterman (2000) enfatiza-se que sua proposta contempla a formulação da hipótese dinâmica, em outras palavras, a explicação do comportamento do modelo. Com esse objetivo, Sterman (2000) recomenda o emprego de mapas causais, dentre os quais cita que a estrutura sistêmica pode ser obtida através dos CLDs.

Assim que finalizado o modelo, alguns testes devem ser realizados. Segundo Sterman (2000), tais testes são efetuados por meio da comparação entre o comportamento obtido no modelo em relação a um modelo de referência ou a um comportamento observado. De acordo com a classificação proposta por Morecroft (2015, p.441), os testes do modelo se enquadram em três grandes categorias (Figura 11).

	Testes de Comportamento	Testes de Estrutura	Testes de Aprendizado
Conceitual ↑ ↓	Ajuste visual em termos de magnitude, forma, periodicidade e faseamento.	Adequação do limite os conceitos importantes são endógenos ao modelo?	Comparando simulações com expectativas conciliando opiniões.
	Ajuste estatístico em termos de erro absoluto médio ou erro quadrado médio.	Condições extremas cada equação faz sentido mesmo quando seus <i>inputs</i> são colocados em valores extremos?	Família de testes demonstrando generalidade.
Algebrico ↓ ↑		Consistência dimensional todas as equações são dimensionalmente corretas?	Modelo parcial simulações explicando equívocos.
		Verificação da estrutura a estrutura do modelo é consistente com conhecimento descrito?	Comportamento surpresa explicando surpresas.
		Verificação de parâmetro os parâmetros são consistentes com o conhecimento descrito e numérico?	Testes de implicações políticas prever corretamente resultados (imprevistos).

Figura 11 - Testes para construir confiança no modelo.

Fonte: adaptado de Morecroft (2015)

Para Morecroft (2015), existem os testes de comportamento, os testes de estrutura e os testes de aprendizagem. Contudo, nenhum desses testes comprovam que um modelo seja válido no sentido de ser a melhor representação de uma situação-problema. Na verdade, os testes demonstram que um determinado modelo é adequado para o propósito a que se destina.

Os testes de comportamento incluem o ajuste visual entre dados simulados e reais em termos de magnitude, forma e periodicidade. São uma maneira comum e eficaz de construir confiança em um modelo porque é um critério que as pessoas entendem prontamente, mesmo que não possuam experiência com a modelagem. A verificação da estrutura é o grupo de testes que requer que as suposições subjacentes à estrutura do modelo sejam consistentes com o conhecimento descritivo. Nesta categoria, os testes de condições extremas investigam se cada equação faz sentido e fornece resultados plausíveis quando suas entradas assumem valores extremos.

Por último, os testes de aprendizagem diferem fundamentalmente dos grupos anteriores porque se aplicam à interação entre o modelo formal e os modelos mentais em vez da fidelidade ou qualidade do próprio modelo formal. O teste mais comum nesta categoria é fazer comparações com expectativas com possíveis resultados conflitantes. Observe que esta comparação não é o mesmo que o ajuste visual ou estatístico aos dados, uma vez que o que é comparado são as expectativas (de seus modelos mentais) em vez de séries temporais (do mundo real). Para Morecroft (2015), os testes de aprendizado se aplicam a todos os modelos, mas são particularmente úteis para pequenos modelos ilustrativos, como por exemplo, o modelo de crescimento de mercado utilizado nesta pesquisa.

Conforme acrescenta Morandi (2017), um modelo não perde sua utilidade pelo fato de não poder ser validado. Para a autora, nestas situações, tanto Sterman (2000) quanto Forrester (1961) concordam que um modelo válido é aquele que se apresenta útil a quem vai utilizá-lo, permitindo a tomada de melhores decisões. Não é o objetivo dos modelos de Dinâmica de Sistemas fornecer previsões precisas, mas sim serem utilizados para entender como as interações e os ciclos de *feedback* entre os componentes do sistema influenciam o comportamento do sistema ao longo do tempo.

Por fim, ressalta-se que o processo de modelagem inclui transformar um modelo conceitual qualitativo em uma simulação quantitativa final (WOLSTENHOLME, 1999; WOLSTENHOLME, 1994). Nesse processo, especialistas e *stakeholders* são cruciais para esclarecer as relações entre as variáveis no sistema sob investigação (FORD; STERMAN, 1998).

2.3 Definições sobre Riscos e Incertezas

O conceito de indústria 4.0 gera novas categorias de riscos devido ao aumento das vulnerabilidades e ameaças (TUPA *et al.*, 2017). A conexão de fatores como o espaço cibernético, utilização de tecnologias sofisticadas e a utilização de terceirização de serviços são fortes candidatos para o aumento dessas vulnerabilidades. Por exemplo, Sommer (2015) traz à luz a discussão a respeito ao tamanho das organizações. Para o autor, o fato de as pequenas e médias empresas não estarem no mesmo patamar de preparo para o avanço tecnológico quanto as grandes companhias pode ampliar a diferença entre estes dois grupos empresariais, um aspecto negativo à complementaridade, fator essencial à I4.0. Essa diferença tecnológica pode afetar a cadeia de valor com um todo.

Em seu estudo, Provazzi (2019) diferencia risco e incerteza. O autor afirma que a situação de risco é aquela na qual se conhecem as probabilidades de ocorrências de um determinado evento, enquanto que na incerteza essa probabilidade não é conhecida. Segundo a ISO (2018), *International Organization for Standardization*, o risco é o efeito da incerteza nos objetivos, considerando que a gestão de uma organização esteja centrada no conjunto das melhores informações disponíveis no momento da tomada de decisão e ponderando toda a ambiguidade e as imperfeições que o tema implica.

Ainda, Souza (2011, p.26) ao analisar riscos e incertezas em projetos, observa que a maioria definições sobre riscos e incertezas diferenciam-se pela possibilidade de identificar as probabilidades de ocorrência dos eventos sob análise. A autora aponta que: “risco é não acontecer exatamente o que estava sendo previsto, seja o impacto resultante deste evento melhor ou pior para o projeto, e conseqüentemente, para a empresa em questão”.

Para os sistemas dinâmicos, ao contrário do que se pode sugerir o senso comum, os eventos de risco raramente são repentinos, mas são gerados de forma progressiva no tempo (AVEN, 2012). Isso equivale ao fato de diversos eventos de risco estarem distantes no tempo e no espaço, com muitas ações ou eventos tomando lugar até que o evento de risco se manifeste de forma aparentemente sem relação com as ações que o causaram.

Quanto à incerteza, Hubbard (2007), apresenta como a falta de completa “certeza”, ou seja, a verdadeira saída, resultado ou valor não é conhecido; a existência de mais de uma possibilidade. A percepção da necessidade de estudo dinâmico das incertezas não é nova e requer uma avaliação mais abrangente. Como o objetivo é a identificação de causas, o estudo dinâmico das incertezas deve buscar a compreensão dos mecanismos que geram os comportamentos a serem estudados como endógenos ao sistema (KIM; SPRINGER, 2008).

Como diretriz para este estudo, destaca-se a busca pelo adequado levantamento das variáveis relevantes ao sistema, evitando o que Senge descreve como recair no erro de “elaborar primeiramente o modelo” (SENGE, 1997). Como consequência, entende-se que a identificação de variáveis com um grau relevante de incerteza proporciona uma melhor relação entre o problema estudado e o modelo a ser elaborado para simulação.

No estudo de Benitez *et al.* (2020) são identificados algumas das incertezas mais relevantes à implementação de tecnologias da indústria 4.0. A Tabela 2 apresenta o *ranking* das cinco primeiras barreiras à implementação de tecnologias na opinião das 87 empresas pesquisadas.

Tabela 2 - Principais barreiras para ampliação da oferta de tecnologias da Indústria 4.0

Barreiras potenciais	Citação das empresas
Falta de recursos financeiros	63%
Falta de clareza do retorno do investimento	61%
Custos de tecnologias/software e/ou sistemas	54%
Incerteza sobre as necessidades do cliente	37%
Falta de identificação de potenciais clientes	34%

Fonte: Benitez *et al.* (2020)

Interessante notar que dentre as incertezas listadas os aspectos financeiros e o potencial de aquisição de clientes dominam sobre as demais. Isso evidencia uma grande preocupação das organizações com o montante financeiro que pode ser aplicado devido à complexa infraestrutura requerida pelas tecnologias da Indústria 4.0.

Com as mudanças que acompanharão a transformação digital da indústria, existe uma perspectiva elevada de que novos riscos e incertezas ocorram e tenham um impacto em vários aspectos nas empresas. Para Roblek *et al.* (2016), os riscos estão relacionados às incertezas que, por sua vez, são largamente presentes no contexto da Indústria 4.0 devido a seu estado conceitual e às divergentes definições que podem ser encontradas. Segundo Müller *et al.* (2018), existe também a pretensão de que sejam necessárias novas abordagens para a gestão de riscos. Para os autores, a implantação da I4.0 exige que as oportunidades compensem os desafios e que os riscos sejam avaliados.

Sob a perspectiva econômica, alguns estudos abordaram os riscos organizacionais mais expressivos na I4.0. Kiel *et al.* (2017) apontam os altos custos de implementação como os riscos mais relevantes, evidenciando a preocupação com o montante financeiro que deve ser aplicado devido à complexa infraestrutura exigida pelas tecnologias envolvidas na I4. Outro aspecto relevante apontado pelos autores descreve a incerteza sobre o retorno dos investimentos e lucratividade, considerando as imprecisões na implementação dessas tecnologias.

No contexto da I4.0, o aumento de competidores e os desafios de aceitação por parte dos clientes também são incertezas que devem ser consideradas. Para Schneider (2018), as novas tecnologias podem trazer uma facilitação para entrada de novos agentes no mercado devido à integração de empresas de diferentes regiões e setores, por outro lado, há incertezas relacionadas às intervenções de clientes e dependência de parceiros.

A primeira forma de dependência diz respeito ao grau de personalização que clientes podem requerer de um produto ou serviço. Soltovski *et al.* (2020) aponta o fato que os clientes

poderão ajustar especificações não apenas antes da finalização de um pedido, mas também durante as fases de projeto, fabricação e montagem, incorporando também mudanças de última hora. Já a segunda forma está relacionada à eventualidade de as empresas ficarem dependentes de outros atores possuidores de conhecimento técnico (SCHNEIDER, 2018).

No aspecto organizacional, as tecnologias emergentes na Indústria 4.0 promovem de forma avançada tanto a integração horizontal e vertical. Para Marodin *et al.* (2017), esses dois formatos de integração se traduzem em melhoria da matéria-prima, entrega final do produto na cadeia de abastecimento, ajuda na tomada de decisão e menor dependência da intervenção humana, o que por sua vez introduz enorme variabilidade no sistema, impactando principalmente custos operacionais e tempo de entrega.

No que diz respeito à utilização de plataformas digitais industriais, os benefícios revelam-se em termos de maior compreensão das necessidades dos clientes, antecipação de problemas futuros, desenvolvimento de mercado, tomada de decisão, entre outros (ZHANG *et al.* 2020). Contudo, ao promoverem tais benefícios, a sinergia e a colaboração geradas entre diferentes agentes vêm à custa do incremento de incertezas (TORTORELLA *et al.*, 2018).

Em síntese, a implementação da I4.0 traz consigo vantagens e, ao fazer isso, introduz riscos e incertezas para as organizações. Marinho (2020) aponta como proveitoso para as empresas ter a sua disposição um conjunto de ferramentas para melhorar a inteligência dos negócios, onde colaboradores podem usar a inteligência das máquinas para se tornarem mais produtivos, prever a melhor forma de expandir os negócios ou cortar custos, e isto tem se traduzido em vantagens competitivas para as empresas. Além disso, as empresas podem se beneficiar das vantagens estratégicas advindas da existência de recursos em tempo real para que possam atrair e criar oportunidades de negócios digitais e reagir rapidamente às ameaças dos concorrentes. Em contrapartida, a rápida proliferação das tecnologias voltadas à I4.0 aumentará a necessidade de ambientes escalonáveis. Segundo Evans e Eyers (2012), a IIoT, trará consigo um aumento explosivo de oportunidades sem precedentes, e com ele o aumento de novos riscos desconhecidos até então.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo são apresentados o método de pesquisa e o método de trabalho propostos. Na primeira seção são apresentados os métodos científicos utilizados para a pesquisa. Já a segunda seção expõe o método de trabalho a ser empregado para que os objetivos do estudo sejam atingidos.

3.1 Método de Pesquisa

Inicialmente, é oportuno expor a classificação metodológica desta pesquisa. Uma vez que se objetiva discutir a geração de conhecimento de mercados, é necessário que sejam conduzidos procedimentos que garantam que os resultados a serem apresentados sejam confiáveis (DRESCH *et al.*, 2018). Assim, este estudo, por natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada. Neste tipo de pesquisa o objetivo é gerar conhecimentos que permitam solucionar problemas de caráter prático enfrentados pelas organizações.

O método científico utilizado na pesquisa é concebido principalmente como indutivo. O método sistêmico que subsidia a construção das relações de causa e efeito e, posteriormente o modelo de Dinâmica de Sistemas, é um processo indutivo que ocorre em três fases: a observação dos fenômenos, a descoberta da relação entre eles e a generalização dessa relação (MORANDI, 2017). A autora ainda destaca que no método sistêmico, a partir de uma lista de eventos observados, são desdobradas as variáveis para as quais são levantados os padrões de comportamento.

Pela maneira com que serão abordados os problemas identificados, esta dissertação pode ser denominada como quali quantitativa (VENKATESH *et al.*, 2013). Uma pesquisa qualitativa tem por objetivo compreender os fenômenos através da coleta de dados narrativos, estudando as particularidades e experiências individuais. Já uma pesquisa quantitativa busca a compreensão dos fenômenos através de dados numéricos que indicam preferências, comportamentos e outras ações individuais (PRODANOV; DE FREITAS, 2013). Para Leedy e Ormrod (2005), a pesquisa quantitativa é utilizada para responder questões de relacionamento entre variáveis previamente medidas, com o objetivo de explicar um fenômeno. Já a pesquisa qualitativa é aplicada para responder questões sobre fenômenos complexos, com a finalidade de descrevê-los do ponto de vista dos participantes. A exemplo, neste estudo, os elementos subjetivos levantados a partir de pesquisa qualitativa são incorporados quantitativamente no modelo computadorizado.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos utilizados, a pesquisa dispõe de um estudo de caso, tornando possível a perspectiva empírica do estudo. O estudo de caso, conforme Prodanov e De Freitas (2013), envolve um estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos de forma a ampliar e detalhar o conhecimento sobre o mesmo. Para os autores, nesta modalidade a aplicação prática e imediata dos conhecimentos adquiridos previamente revela aderência da teoria à prática (PRODANOV; DE FREITAS, 2013; CIRIBELLI, 2003).

Ademais, foram realizadas entrevistas semiestruturadas com especialistas da empresa participante da pesquisa para se obter as informações necessárias à execução dos métodos propostos no trabalho. Um questionário de pesquisa (Apêndice A – Questionário para Entrevistas) foi utilizado para facilitar a coleta e análise dos dados de modo que possa servir como fonte para abastecer os diferentes métodos e abordagens utilizados.

Quanto aos objetivos, este estudo pode ser classificado como exploratório. Nesta categoria, os fatos são observados, registrados, analisados e interpretados, e os dados, geralmente, são coletados através de questionários, entrevistas ou levantamentos (CIRIBELLI, 2003; PRODANOV; DE FREITAS, 2013). A Figura 12 ilustra a classificação metodológica da pesquisa.

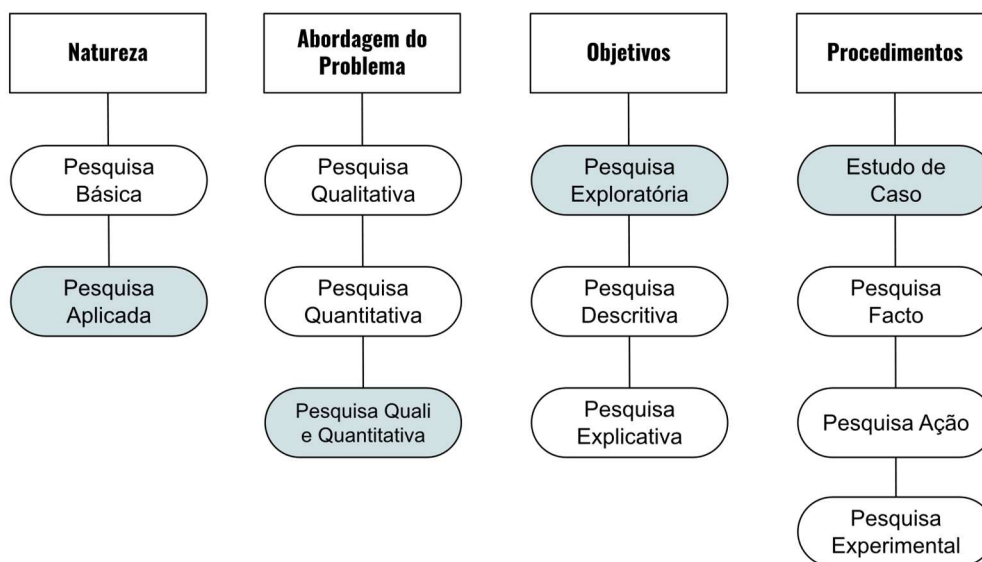


Figura 12 - Classificação metodológica empregada no estudo.

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em Prodanov e De Freitas (2013)

A motivação para a realização desta pesquisa está fundamentada na exploração dos fatores que influenciam a adoção de uma plataforma digital de aplicação industrial, dessa forma explicitando as razões de sua realização que, neste caso, se alinha com a compreensão em

profundidade de um fenômeno. Tal compreensão subsidia o objetivo geral do estudo disposto na seção 1.2: **analisar uma plataforma digital industrial a partir da identificação das incertezas relacionadas à sua adoção**. Assim, o emprego da modelagem e simulação mostra-se como adequado para este fim.

3.2 Método de Trabalho

Para atingir os objetivos do estudo, é proposta uma sequência de fases e etapas, que se desdobram em tarefas, baseadas no método de pesquisa apresentado anteriormente. A Figura 13 apresenta o método de trabalho desta pesquisa, adaptando-o para as necessidades deste trabalho específico. Nela estão descritas as etapas e as técnicas ou ferramentas para a coleta e análise de dados, explicitando o produto esperado e a finalidade de cada uma das etapas.

O método de trabalho inicia-se pela exposição do problema de pesquisa. O problema advém da necessidade de avaliar o lançamento de uma tecnologia emergente, considerando o impacto de algumas variáveis a partir de cenários futuros. Nesta primeira fase, o objetivo é tomar consciência sobre o problema de pesquisa, compreendendo de forma mais ampla o contexto da tecnologia em questão. Para isso, realiza-se uma revisão da literatura, de modo a fundamentar a justificativa da pesquisa apresentada na seção 1.3. Com isso, também é possível levantar os tópicos a serem detalhados no referencial teórico.

Os conhecimentos obtidos na primeira etapa embasam uma segunda revisão da literatura, dessa vez, focada na identificação das técnicas existentes para avaliação de mercado para tecnologias emergentes. Como resultado dessa revisão, é possível identificar os métodos anteriormente utilizados, suas vantagens e as lacunas a serem preenchidas pela aplicação proposta. A Fase 1 encerra-se com observações sobre a equipe de trabalho e particularidades sobre os métodos empregados.

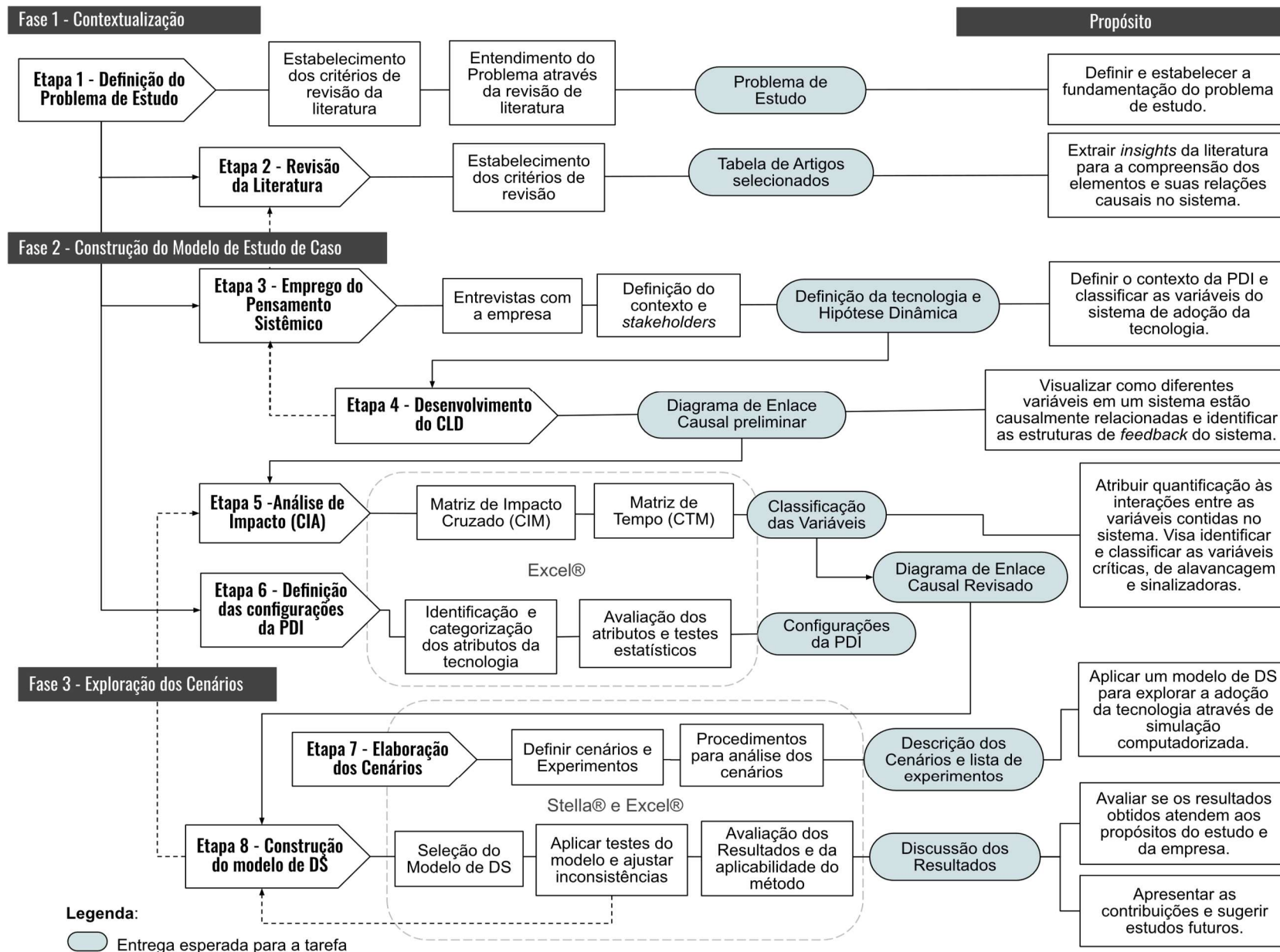


Figura 13 - Estrutura do Método de Trabalho.
 Fonte: elaborado pelo autor

Na Fase 2 – Construção do modelo de estudo de caso – são identificadas as técnicas utilizadas para a construção do método. Como resultado final dessa fase tem-se a sequência de aplicação das ferramentas e métodos empregados e são explicitadas as condições e situações para utilização destes.

A terceira e última fase do método de trabalho trata da elaboração dos cenários e do emprego de simulação a fim de analisar os resultados por ele gerado. Em seguida, averigua-se a viabilidade operacional, a facilidade de uso e a utilidade do modelo proposto. Para tanto, é realizada uma análise crítica dos resultados através da explicitação das aprendizagens. Isso inclui a incorporação de sugestões para melhoria do método. Apresentado o método de trabalho, a seção seguinte expõe os procedimentos que foram aplicados para a coleta de dados.

3.2.1 Coleta de Dados

As técnicas de coleta de dados buscam dar suporte às etapas projetadas no Método de Trabalho. A etapa de obtenção dos dados pode ser considerada a mais crítica ao longo das várias etapas previstas para o Método de Trabalho. Isto porque se faz necessária uma base de dados bastante robusta e completa para gerar as informações necessárias ao modelo, exigindo que os participantes envolvidos comprometam tempo e dedicação.

Considerando o caráter exploratório da pesquisa, o primeiro procedimento de coleta de dados, que ampara as Fases 2 e 3 do Método de Trabalho, é a revisão da literatura. Nesta revisão preliminar são abrangidas as etapas que compreendem a elaboração da questão de pesquisa e fundamentação para a criação da estrutura sistêmica conceitual, sendo, portanto, técnicas para coleta de dados. Tal revisão permite a conscientização do problema, sendo essencialmente realizada pelo pesquisador. Os resultados são apresentados na seção denominada Problema de Pesquisa (seção 1.1). Já a segunda revisão sistemática, igualmente realizada na Fase 1, é executada com a finalidade de identificar abordagens, métodos e ferramentas de modo a responder o problema de pesquisa a atender os objetivos do estudo. Os resultados desta segunda revisão são apresentados e discutidos na seção 3.2.4.

No que respeito às Etapas 3 a 7 do Método de Trabalho, estas foram executadas com a aplicação em um ambiente real. Tal aplicação, apresentadas no Capítulo 4, é conduzida pelo pesquisador, de modo que a técnica de coleta de dados utilizada é a observação participante em relação às abordagens selecionadas para o estudo de caso.

Já para a última etapa – Etapa 8, Exploração dos Cenários - os dados coletados visam principalmente a descrição da empresa focal, dados para definição do mercado para a

tecnologia, por exemplo, número de concorrentes, capacidade de produção, entre outros. Adicionalmente, foram incluídas as projeções previamente realizadas pela empresa focal a fim de incluir as incertezas críticas para a elaboração dos cenários, de modo que tornassem possível sua simulação. Contudo, uma exigência das várias etapas propostas é que a de coleta de dados deve ser complementada a cada novo elemento introduzido no sistema.

Para os propósitos de exploração do mercado potencial para a tecnologia em estudo, a coleta de dados cumpre o papel de alimentar o modelo, definir a escala dos parâmetros, e fornecer informações para sua posterior avaliação. Uma vez que a técnica de coleta de dados utiliza a entrevista semiestruturada para este fim, aos participantes foi solicitado que fornecessem suas avaliações sobre os atributos da tecnologia, devendo, caso desejassem, acrescentar novos elementos no sistema. Com isso, as avaliações dos *stakeholders*, para os propósitos deste estudo, tem o papel principal de alimentar a construção do modelo, estabelecer a escala a ser empregada nos parâmetros e prover meios para a avaliação do modelo. Dessa forma, poderiam recorrer ao histórico de suas empresa e à suas experiências no mercado de atuação.

No que diz respeito à a simulação do modelo, foi considerado que este seria fundamentado no modelo de concorrência proposto por Morecroft. (2008), sendo que uma parte dos parâmetros foi baseada na formulação original deste. Considerando que um dos objetivos do estudo é simular o comportamento de adoção de uma plataforma digital, um conjunto de fontes secundárias auxiliou na coleta de informações sobre o mercado-alvo. Tais fontes de dados são apresentadas no Apêndice B (Fontes de Dados Utilizadas). Na próxima seção são abordados os procedimentos de análise de dados empregados neste estudo.

3.2.2 Análise de Dados

As etapas de obtenção dos resultados referem-se aos métodos e ferramentas empregados para análise dos dados. Estes foram levantados dentro do processo de uma segunda revisão da literatura a fim de gerar um conhecimento que inexistia nos estudos primários, havendo uma série de técnicas qualitativas e quantitativas a serem utilizadas para esse fim (MORANDI; CAMARGO, 2015). A partir de segunda revisão literária, busca-se identificar as lacunas das abordagens para avaliação de tecnologias emergentes, principalmente aquelas relacionadas à I4.0. Além disso, a partir desta busca, procura-se organizar e analisar os dados encontrados que, nesta pesquisa, são organizados na Tabela 3.

Dentre os métodos encontrados pode-se destacar o Pensamento Sistêmico (ANDRADE *et al.*, 2006), a Formulação da Hipótese Dinâmica (STERMAN, 2000), os Diagramas de Enlace causal e Estruturas Sistêmicas (STERMAN, 2000). Para os testes do modelo destacam-se os testes apresentados por Morecroft (2015). Além disso, são empregados o Planejamento por Cenários (DAY; SCHOEMAKER, 2002), as informações advindas dos participantes e a avaliação do Modelo (STERMAN, 2000).

Neste estudo, um dos objetivos é comparar os dados obtidos com as simulações do modelo (por exemplo, a quantidade de adotantes). Para este fim, são realizadas análises a partir dos dados gerados pelo modelo de simulação. Sendo um modelo estocástico, por ter a presença de aleatoriedade em algumas de suas variáveis, são executadas replicações para a geração dos resultados necessários à análise. Seguido a isso, esses resultados recebem o devido tratamento no SPSS para a obtenção das estatísticas descritivas.

A técnica selecionada para obtenção das estatísticas descritivas foi o teste estatístico ANOVA, avaliando a significância estatística das séries obtidas por meio da existência ou não de diferença entre as médias de duas séries de dados. Cabe mencionar que os devidos testes de homogeneidade e normalidade (Levine e Shapiro Wilk, respectivamente) para validação da ANOVA foram devidamente utilizados. Estes procedimentos têm o objetivo de fornecer resultados de fácil interpretação sobre o impacto que as diferentes configurações tecnológicas têm sobre a adoção da tecnologia. Além disso, para avaliação das importâncias sobre as configurações da tecnologia são empregados testes não-paramétricos utilizando o teste de Friedman com os dados obtidos da avaliação dos entrevistados.

Em suma, o objetivo das análises dos dados obtidos neste estudo é identificar as variáveis de incerteza mais relevantes para a aceitação da tecnologia pelo mercado. Deve-se considerar que nenhuma destas técnicas, isoladamente, fornece conclusões decisivas, contudo, busca-se por meio delas uma maior robustez e agilidade na construção de orientações para a tomada de decisão. A seção seguinte descreve as circunstâncias para a aplicação do estudo de caso.

3.2.3 Condições de aplicação do Estudo de Caso

O método proposto para a avaliação da adoção de uma tecnologia emergente foi concebido para organizações que operam em ambientes de rápidas mudanças tecnológicas, a partir do ponto de vista de uma empresa emergente, onde o número *stakeholders*, inicialmente baixo, pode se tornar elevado conforme a tecnologia vá sendo aceita pelos demais atores do

ecossistema. Também se considera que o serviço oferecido tenha características de diferenciação, isto é, que o aspecto principal seja a diferenciação e não a padronização, o que faz com que os clientes dificilmente migrem de um fornecedor para outro, dado a elevada exigência técnica sobre a tecnologia analisada.

Outra condição em que o estudo foi executado recai sobre os conhecimentos e habilidades relacionados ao método que, no caso da equipe de trabalho, eram consideravelmente baixos. Porém, procurou-se suprir estas lacunas por meio de breves instruções de caráter conceitual aplicadas previamente às tarefas propostas em cada etapa. Neste caso, o pesquisador procurou agir como condutor da equipe sendo responsável pela aplicação do método.

Na pesquisa em questão, a equipe de trabalho também é o cliente do método, portanto também coube a definição dos elementos que deveriam ser modelados, bem como os cenários nos quais as configurações de sua tecnologia seriam avaliadas. Outra característica pensada para o método é a de que ele não fosse dependente dos tradicionais softwares utilizados nos modelos de Dinâmica de Sistemas. Assim, ao menos na criação dos CLDs e avaliação por meio das matrizes de impacto, empresas em estágios iniciais não incorrem nos custos atrelados as licenças ou contratação e treinamento para a utilização de modelos computadorizados mais sofisticados.

O sistema proposto é voltado para atender organizações em contextos de incertezas. Neste caso, a melhoria da proposta de valor de uma empresa em estágio nascente, portanto, carente de incorporação de vários processos organizacionais. Além disso, os atributos da tecnologia selecionados para serem avaliados pelos usuários podem ser adaptados para atender outras particularidades. Assim, espera-se que o modelo proposto seja passível de adaptação para outros enredos carregados de indeterminações.

3.2.4 Fase 1 - Contextualização

Diferentemente da primeira revisão apresentada na subseção 1.3, cujo objetivo foi a seleção de publicações para a estruturação do problema de pesquisa, realizou-se uma segunda revisão da literatura, igualmente na base SCOPUS, para averiguar a existência de algum método que reunisse Dinâmica de Sistemas com a avaliação de tecnologias emergentes. Os critérios de busca foram direcionados aos resumos e não foi estabelecido limitação temporal da consulta. Com critérios de inclusão das publicações, procurou-se selecionar aquelas que apresentassem ‘métodos e ferramentas para avaliação de incertezas em tecnologias emergentes’, bem como

‘métodos e ferramentas para prospecção de mercados para tecnologias’. Por outro lado, foram excluídos artigos em que constassem os termos ‘métodos para análises multicriteriais’, análises ‘SWOT’, ‘PDCA’ e ‘BSC’. Além disso, devido ao contexto de escassez de dados no qual a pesquisa se desenvolve, uma quarta busca foi realizada adicionando o termo ‘*Qualitative*’, na expectativa que a busca retornasse métodos qualitativos para serem examinados. O resultado dessa busca é apresentado na Tabela 3, contendo os artigos localizados a partir das combinações de termos pesquisados.

Tabela 3 - Resultado da Revisão da Literatura para identificação de métodos.

Termo de Busca	Delimitações	Número de Publicações
“ <i>Emerging Technology</i> ” AND “ <i>Assessment</i> ” OR “ <i>Valuation</i> ” OR “ <i>Forecasting Methods</i> ”	Abstract	1.963
<i>Emerging Technology Assesment</i>	Nenhuma	1.443
“ <i>Emerging Technology Assesment</i> ”	Nenhuma	128
“ <i>Emerging Technology</i> ” AND “ <i>Assessment</i> ” OR “ <i>Valuation</i> ” OR “ <i>Forecasting Methods</i> ” AND “ <i>Qualitative</i> ”	Abstract	74

Fonte: elaborado pelo autor

Da totalidade de publicações encontradas na busca, 720 duplicatas foram identificadas e eliminadas juntamente com 2.305 artigos que se enquadravam nos critérios de exclusão predefinidos, tratando-se especialmente de artigos das áreas sociais, fintechs e saúde. Os títulos dos 583 estudos restantes foram lidos, sendo que, 90 foram descartados devido ao idioma da publicação, 320 publicações foram excluídas por não possuírem os textos completos e 40 resenhas de livros foram desconsideradas. Assim, a fim de se verificar a adequação aos critérios de inclusão, restaram 133 artigos cujos resumos foram lidos integralmente. Durante a leitura destes resumos, 39 publicações restantes foram lidas por completo. Após a leitura, verificou-se que 8 publicações não apresentavam métodos ou ferramentas para a análise de incertezas ou riscos. Dessa forma, ao final, 31 publicações foram consideradas aptas para dar suporte a identificação dos métodos convenientes à pesquisa.

Das publicações selecionadas para a leitura integral, algumas das ferramentas matemáticas obtidas a partir da literatura podem ser destacadas, como: 12 publicações trazendo o uso de equações para calcular os impactos indiretos (o efeito devido às interconexões) a partir de observações diretas de um sistema matemático; 4 publicações apresentando modelos

econômicos insumo-produto; 3 publicações aplicando a análise estrutural MICMAC; e, 8 publicações empregando a análise de impacto cruzado. Essas publicações serviram como pontos de partida, pois se concentram na ciência das relações entre as variáveis. Por isso, servem como base para a construção de um método para entender a trajetória de longo prazo e o sucesso da adoção de tecnologia sob com uma perspectiva sistêmica.

A partir dessa base literária, pode-se destacar que 'métodos de previsão' são habitualmente usados para auxiliar na tomada de decisão nas organizações, fornecendo um guia inicial para futuras oportunidades, riscos, desafios e áreas de incerteza (DAIM *et al.*, 2006), tais como incerteza do processo de produção, integração de diferentes métodos e aplicabilidade do modelo. Villares *et al.* (2017) fazem recomendações sobre o uso de cenários preditivos ao proporem uma revisão sobre tecnologias emergentes existentes no segmento de energia.

Além disso, cada vez mais são requeridas habilidades analíticas de nível sistêmico baseadas nos primeiros estágios de desenvolvimento de tecnologia antes ou durante o surgimento de uma tecnologia em um mercado (WENDER *et al.*, 2014). Por exemplo, Moni *et al.* (2020) relatam que várias agências de financiamento agora exigem que os desenvolvedores relatem os resultados relacionados ao ciclo de vida de tecnologias emergentes, usando-os para rastrear o progresso ao longo das etapas de financiamento.

Realizada essa revisão, têm-se, em conjunto com a primeira revisão da literatura, os resultados da elaboração do problema de Estudo (Etapa 1) e os artigos selecionados para a revisão da literatura (Etapa 2), ambos cumprindo seus propósitos previstos para esta primeira Fase da pesquisa. A seção seguinte detalha o processo de aplicação das ferramentas e métodos para a elaboração do modelo para o estudo de caso.

3.2.5 Fase 2 – Construção do Modelo de Estudo de Caso

A primeira etapa desta Fase consiste na compreensão do sistema, em conjunto com a empresa participante, com o objetivo de construir uma estrutura que facilite o entendimento das relações entre os elementos presentes no sistema e a influência dessas relações sobre as estruturas do mercado-alvo. Nesta etapa o conhecimento dos especialistas da empresa é essencial para a construção da estrutura sistêmica. A segunda etapa desta Fase consiste na formulação dos CLDs, neles são estabelecidas todas as relações e suas polaridades, *feedbacks* e atrasos necessários à compreensão mais profunda sobre as variáveis presentes no sistema analisado.

Finalizada a identificação das variáveis do sistema através dos CLDs, faz-se necessário uma ferramenta que possibilite a avaliação das relações entre as variáveis. Para isso, foi

utilizada a Análise de Impacto Cruzado (CIA). Com ela é possível atribuir valores às relações identificadas nos CLDs, classificando as variáveis de acordo com sua dependência e influência no sistema; o resultado é um CLD revisado, agora mais condensado e apto para ser traduzido para o modelo computadorizado. Por fim, a última etapa desta fase consiste na definição das configurações tecnológicas que a PDI pode assumir. Em um primeiro momento, são identificados e categorizados os atributos tecnológicos para que, em seguida, sejam feitas as avaliações por meio das entrevistas realizadas com os *stakeholders*.

3.2.5.1 Etapa 3 – Emprego do Pensamento Sistêmico

Uma abordagem sistêmica sobre os fatores de impacto exige que os decisores adquiram um certo nível de consciência e maturidade antes da tomada de decisões. Por conta da falta de familiaridade dos participantes com os fundamentos do Pensamento Sistêmico, procurou-se conduzi-los nas seções de *Brainstorming* através de melhores práticas de forma a ajustar as perspectivas e fomentar novos hábitos nos participantes.

Essas melhores práticas foram descritas por Benson e Marlin (2017) e estão listadas no Anexo A (Hábitos do Pensador Sistêmico). Esses hábitos também podem ser entendidos como estratégias de pensamento que um tomador de decisão pode empregar para resolver problemas complexos. Neles são sugeridas práticas úteis ao emprego do Pensamento Sistêmico no contexto de adoção das tecnologias e, portanto, buscou-se empregá-las nas reuniões realizadas.

Ao aplicar o Pensamento Sistêmico com os participantes da pesquisa buscou-se traduzir para o contexto do estudo os princípios já extensivamente abordados por Senge e Andrade, dentre eles:

- (i) Interpretar propriedades emergentes do desenvolvimento tecnológico, incluindo mecanismos de *feedback*;
- (ii) Identificar e explorar pontos de alavancagem ou pontos de inflexão - locais críticos para intervir em diferentes escalas que mais beneficiarão a adoção de uma tecnologia;
- (iii) Desenvolver soluções aproximadas, mas suficientemente boas, que sejam mais flexíveis e adaptáveis às mudanças do que as tradicionais soluções determinísticas de longo prazo.

Aqui, é importante listar elementos que possam gerar impactos, sejam positivos ou negativos, sobre os potenciais adotantes, as restrições para o desenvolvimento da tecnologia, fatores que afetem o mercado-alvo, reações de concorrentes, posicionamento dos fornecedores

e disputa por recursos do sistema. Muitos desses fatores identificados foram advindos da literatura levantada nas etapas anteriores, contudo foram validados e até mesmo ampliados através das entrevistas realizadas com os *stakeholders*. Tais informações permitiram uma visão mais profunda do mercado em que a PDI opera, seu contexto e a identificação das partes interessadas.

Como resultado esperado para esta etapa tem-se a definição do mercado para a tecnologia e a hipótese dinâmica a ser explorada nas análises do modelo de simulação. Feito isso, foram obtidos fundamentos suficientes para a concepção da Análise de Impacto Cruzado.

3.2.5.2 Etapa 4 - Diagramas de Enlace Causal (CLD)

A área de Dinâmica de Sistemas oferece diversas técnicas de modelagem e análise. Uma delas é o Diagrama de Enlace Causal (CLD) que serve à finalidade de obter *insights* sobre a estrutura de um problema sem exigir muitos dados. Um CLD descreve variáveis importantes e as relações causais entre elas (STERMAN, 2000).

Neste estudo, propôs-se aos participantes da empresa focal a utilização dos CLD para que se explorasse os elementos presentes no contexto dinâmico de negócios da plataforma digital. Estes elementos foram dentro do possível descritos: (i) em termos de relações causais; (ii) em ciclos de *feedback* dentro do sistema; e, (iii) em ideias gerais sobre a intensidade e a temporalidade das relações.

Para auxiliar nesta tarefa, utilizou-se um conjunto de fontes secundárias para coletar informações sobre o mercado-alvo. Entre elas, encontram-se essencialmente guias tecnológicos e relatórios retrospectivos, principalmente de caráter financeiro. Estas fontes de dados e seus detalhamentos estão listados no Apêndice B. As informações coletadas nestas fontes auxiliaram na construção do CLD e os parâmetros para o modelo computadorizado.

Também foram considerados para a construção do CLD o comportamento dinâmico do arquétipo de Crescimento e Declínio, se mostrando essencial para desenvolvimento da hipótese dinâmica. Para esta tarefa foram realizadas duas reuniões como a equipe de trabalho da empresa participante, com duração de 2h cada reunião. Durante esse processo, seguiu-se as recomendações aceitas na literatura (BALA *et al.*, 2017). O Quadro 4 sumariza estes passos:

Quadro 4 - Passos para a construção do Diagrama de Enlace Causal

Passos	Objetivos
1. Definir o problema e os objetivos	Estudar o sistema com base em informações coletadas por meio de entrevistas, discussão em grupo focal, relatório de pesquisa e estudo de caso. Nesta etapa, busca-se descrever o sistema e definir o problema com o modo de referência do comportamento do sistema.
2. Identificar os elementos mais importantes dos sistemas	Identificar as variáveis que afetam o comportamento do sistema, Em seguida, desenvolver o Diagrama de Enlace Causal. Outras variáveis podem ser adicionadas durante os estágios posteriores do desenvolvimento do CLD.
3. Identificar os elementos secundários importantes dos sistemas	Variáveis secundárias dentro do limite do sistema devem ser adicionadas após cuidadosa identificação das variáveis mais importantes. Isso dá uma oportunidade de considerar as variáveis secundárias do sistema.
4. Definir as relações de causa e efeito	Encontrar as relações causa-e-efeito usando setas com sua polaridade definida para variáveis primárias, e, em seguida, para as variáveis secundárias.
5. Identificar os ciclos fechados	Buscar por possíveis ciclos fechados formados por relações de causa e efeito entre as variáveis do sistema.
6. Identificar os laços de balanceamento e reforço	Identificar o número de relações negativas de causa e efeito em cada um dos ciclos. Os ciclos fechados com número ímpar de relações negativas são negativos, isto é, laços de equilíbrio, e os outros são positivos, ou seja, laços de reforço.

Fonte: adaptado de Bala *et al.* (2017)

3.2.5.3 Etapa 5 - Análise de Impacto Cruzado (CIA)

Finalizada a identificação das variáveis do sistema através do CLD, faz-se necessário uma ferramenta que possibilite a avaliação das relações entre as variáveis. Para esta finalidade, julgou-se apropriada a utilização da análise de impacto baseada em Beck *et al.* (2012). Acrescenta-se às exposições mencionadas no capítulo 2, a praticidade fornecida pela ferramenta para o contexto de aplicação desta pesquisa. Para Muskat *et al.*, (2012), a CIA é um método para entender sistemas complexos com relativamente pouco esforço de forma concisa e informativa. A Figura 14 apresenta em detalhes os passos para a execução da análise proposta.

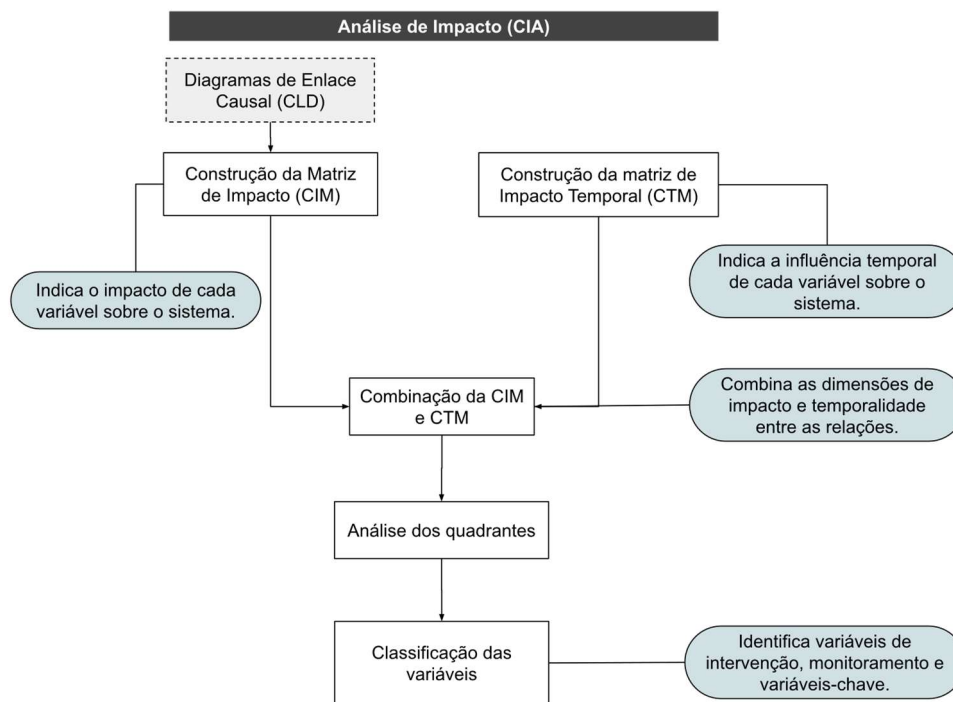


Figura 14 - Modelo para desenvolvimento da Análise de Impacto Cruzado.

Fonte: elaborado pelo autor

Com o objetivo de analisar os CLDs, a abordagem apresentada é baseada principalmente em duas matrizes. Como afirma Oliva (2004), a estrutura de um modelo de dinâmica de sistemas pode ser representada como um CLD, onde as variáveis são os vértices e as arestas são as relações em que estas se conectam, ou seja, os CLDs podem ser representados como uma matriz. Portanto, nesta aplicação o ponto de partida da análise é um CLD, seguido pela construção de duas matrizes, representando impacto e tempo de atraso para cada aresta (relacionamento). Assim, fez-se o uso da Matriz de Impacto Cruzado (CIM) seguido da Matriz de Tempo (CTM). O emprego dessas duas ferramentas é essencial para que, nos passos seguintes, ocorra a classificação das variáveis de acordo com seu grau de influência ou dependência no sistema analisado.

Matriz de Impacto Cruzado (CIM). Uma vez que um CLD foi construído com os participantes, o peso relativo de cada aresta (cada par de variáveis) identificadas deve ser especificado. Isso foi feito em uma reunião de 2h com a empresa focal (a terceira de um total de quatro reuniões).

Assumiu-se que os escores (Quadro 5) deveriam variar 0 (impacto neutro) a 3 (impacto mais positivo ou mais negativo). Uma vez que cada um dos quatro escores referem-se à magnitude relativa dessas interações, aqui, optou-se por empregar apenas valores positivos para

a composição da escala. Quando este for o caso, não se deve esquecer a polaridade das relações. Aspecto que deve ser reintegrado quando na etapa de revisão do CLD.

Quadro 5 - Escala para avaliar interações entre as variáveis

Força / Título	Descrição
3 - Promotor/ Cancelador	A variável y reage fortemente a uma mudança na variável x .
2 - Reforçador/ Contrariador	A variável y será influenciada moderadamente pela variável x , com apenas uma quantidade relativamente pequena de trabalho necessária.
1 - Ativador/ Restritor	A variável y reage fracamente a uma mudança na variável x . Cria condições que promovem o progresso de outra variável ou limita a sua ocorrência.
0- Neutro	Não há ligação direta entre as variáveis x e y . Nenhuma interação positiva ou negativa existe entre as variáveis.

Fonte: adaptado de Zelinka e Amadei (2019)

Usando os escores atribuídos é possível obter os índices de influência (soma dos valores nas linhas) e dependência (soma dos valores nas colunas) da matriz de impacto. A partir destes, três outros índices podem ser calculados para cada variável (ZELINKA; AMADEI, 2019). O primeiro, a **influência líquida (IL)**, é calculado como a diferença entre influência e dependência. Ele representa a influência absoluta de um fator. Quanto maior o IL (em módulo), mais ‘poder’ esse fator tem para influenciar os demais fatores. O segundo índice é a **razão influência (RI = I/D)**. Ele se concentra na eficiência com que um fator impacta os demais fatores. Como a influência líquida pode ser positiva ou negativa, um algoritmo (Anexo B – Algoritmo para cálculo de Razão de Influência) foi empregado para calcular a RI, evitando a possibilidade de sua indeterminação.

Finalmente, o terceiro índice, definido como o **índice de prioridade (IP)**, é uma média ponderada em relação à razão de influência (RI) e influência líquida (IL) em relação aos menores e maiores valores para cada conjunto de fatores, sendo obtido por meio da Equação (1). Quanto maior o índice, mais crítica se torna uma variável para o sistema como um todo. Esse índice varia entre 0 e 1, indicando, respectivamente, fatores de baixa e de alta prioridade.

$$IP = A \frac{RI_x - \min RI}{\max RI - \min RI} + B \frac{IL_x - \min IL}{\max IL - \min IL} \quad (1)$$

Onde:

A: peso da Razão de Influência

B: peso da Influência Líquida

min: valor mínimo para um conjunto de valores

max: valor máximo para um conjunto de valores

Deve-se notar que a soma dos dois pesos (A e B) deve ser sempre igual a 1. Se os decisores quiserem se concentrar no aspecto de impacto, eles adotarão apenas a influência líquida e selecionarão $A = 1$ ($B = 0$). Inversamente, $B = 1$ ($A = 0$) corresponderia à uma análise onde aspectos de dependência são prioritariamente considerados.

Matriz de Tempo (CTM). No passo seguinte, devem ser estimadas as defasagens de tempo entre os pares de variáveis, ou seja, o tempo necessário para um impulso viajar do vértice (x) para o vértice (y); o aspecto importante a ser analisado é a rapidez com que um impacto é difundido de uma variável para outra (BECK *et al.*, 2012). Esta informação deve então ser associada à matriz de impacto apresentada no passo anterior.

Seguindo a aplicação recomendada por Beck *et al.* (2012), procedeu-se à construção de uma Matriz de Tempo, solicitando aos participantes que indicassem o tempo de atraso entre duas variáveis consecutivas (diretas). Isso fora realizado conjuntamente com o preenchimento da CIM, portanto ocupando o tempo das reuniões já mencionadas na seção anterior.

Assim como na CIM, foram avaliadas apenas as relações diretas, utilizando a escala apresentada no Quadro 6. As categorias de tempo foram associadas a números inteiros e codificadas proporcionalmente. Uma estimativa de tempo que ultrapasse o horizonte determinado deve ter seu valor de impacto na CIM excluído.

Quadro 6 - Códigos usados para indicar o tempo de atraso entre as variáveis x e y .

Código	Descrição
1 - Imediatamente (< 1 ano)	A variável y reage imediatamente a mudanças na variável x .
2 - Curto prazo (2 anos)	A variável y reage com um pequeno atraso às mudanças na variável x .
5 - Médio prazo (5 anos)	A variável y reage com um atraso de tempo moderado a mudanças na variável x .

(Continua)

10 - Longo prazo (10 anos)	A variável y reage com um longo atraso às mudanças na variável x .
-----------------------------------	--

Fonte: adaptado de Beck *et al.* (2012)

Aqui, para cada par de variáveis com um relacionamento direto a pergunta feita aos participantes foi: “**Se assumirmos uma mudança na variável x como ponto de partida, quanto tempo leva para perceber/observar os impactos iniciais na variável y ?** Nesta ocasião, ao invés dos índices da CIM, são obtidos o **Atraso Produzido (AP)** e **Atraso Recebido (AR)** para caracterizar as variáveis no contexto temporal.

Atraso Produzido indica quanto atraso é causado por uma determinada variável. Uma variável com um valor AP alto transmite estímulos lentamente através de suas relações de saída. Semelhantemente, Atraso Recebido indica se uma variável apresenta uma reação lenta ou rápida às mudanças no sistema. Assim, uma variável com um alto valor AR recebe impulsos lentamente através de suas relações de entrada. Ao contrário da CIM, onde o IR e NI combinam os pontos fortes dos impactos, não faz sentido somar todos os atrasos na CTM, pois o atraso depende apenas de sua classificação quanto a curto, médio ou longo prazos. Por isso, os autores recomendam o uso da média aritmética, por ser menos dispersa.

A combinação das dimensões de tempo e impacto é importante para os tomadores de decisão selecionarem quais variáveis podem ser usadas para intervenção e quais variáveis como indicadores. Para isso, foram construídos dois planos: o primeiro combina a Influência e o Atraso Produzido a fim de identificar variáveis adequadas para intervenção. Já o segundo, combina a Dependência com o Atraso Recebido para detecção de variáveis indicadoras.

Para facilitar a interpretação, cada uma das variáveis pode ser classificada de acordo com os quadrantes apresentados nos Quadros 7 e 8, respectivamente. Cada variável é atribuída a uma das quatro diferentes regiões.

Quadro 7 - Categorização de variáveis de acordo com sua utilidade como variáveis de intervenção

Quadrante	Interpretação
I	Alta influência e baixo valor de AP. Possui alto impacto e reage rapidamente às mudanças. Mais adequada para intervenções dentro de um sistema.
II	Alta influência e alto valor de AP. Possui alto impacto, porém, difundido lentamente pelo sistema. Funcionam como pontos de intervenção se o objetivo for uma mudança lenta, mas substancial.
III	Baixa Influência e alto valor de AP. Sem impacto e com reação retardada. Não é apropriada para uma intervenção.

(Continua)

IV	Baixa influência e baixo valor de AP. Reage rapidamente às mudanças, com alto impacto restritivo. Não é adequada para intervenções dentro de um sistema.
-----------	--

Fonte: adaptado de Beck *et al.* (2012)

Quadro 8 - Categorização de variáveis de acordo com sua utilidade como variáveis indicadoras

Quadrante	Interpretação
I	Alta dependência e baixo valor de AR. Reagem intensa e rapidamente às mudanças no sistema. São ideais para servirem como indicadores.
II	Alta dependência e alto valor de AR. Reagem de maneira intensa, mas lentamente às mudanças no sistema. Não são adequadas como indicadores.
III	Baixa dependência e alto valor de AR. Reagem mínima e lentamente às mudanças no sistema. Não são adequadas como indicadores.
IV	Baixa dependência e baixo valor de AR. Reagem rapidamente, porém sem intensidade. Não são adequadas como indicadores.

Fonte: adaptado de Beck *et al.* (2012)

Como resultado final desta etapa, é possível identificar as:

- (i) **Variáveis influentes.** Elas podem ser rotuladas como variáveis determinantes do sistema.
- (ii) **Variáveis dependentes.** Elas podem ser classificadas como variáveis ideais a serem monitoradas.
- (iii) **Variáveis-chave.** Elas têm valores de alta influência e alta dependência, podendo serem expressas como incertezas-críticas dentro do sistema analisado.

De posse da classificação das variáveis, é possível revisar o CLD preliminar de forma a selecionar aquelas variáveis que apresentem papéis relacionados à ênfase que se deseje dar à estrutura sistêmica. Utilizando as informações geradas até esta etapa, é possível reordenar o sistema desenvolvido na primeira versão do CLD. Assim, é possível agregar maior qualidade à construção da versão revisada do CLD, desta vez, utilizando a priorização e classificação das variáveis identificadas nas etapas anteriores. Para isto, o Índice de Prioridade é utilizado de modo a produzir uma classificação prioritária das variáveis, possibilitando que o CLD revisado seja construído com as variáveis mais importantes do sistema.

Encerrando esta etapa, ressalta-se que algumas das ferramentas sistêmicas pesquisadas para o propósito deste estudo, como os CLDs e a CIA, permitem que os decisores explorem o

impacto e as interconexões em todo o sistema de adoção de uma forma mais rigorosa e analítica, com relativa facilidade.

3.2.5.4 Etapa 6 – Definição das Configurações da PDI

Nesta etapa são identificadas, classificadas e avaliadas as características da PDI. Na tarefa de identificação dos atributos foi considerada a experiência da equipe de trabalho para, em conjunto com pesquisas em publicações e em fontes de dados adicionais (ver Apêndice B), fosse possível se chegar a uma lista aceitável de atributos para serem consultados pelos clientes potenciais (*stakeholders*) participantes da pesquisa. Esta lista contendo a descrição e fonte constitui o Apêndice C (Configurações da PDI).

Em seguida, foram classificados e codificados cada um dos atributos com a finalidade de facilitar sua utilização ao longo da aplicação e análise dos resultados. Tal classificação foi realizada tendo por base os princípios elencados por Hermann *et al.* (2015) constante na subseção 2.1.2.

Na sequência foi solicitado à equipe de trabalho, utilizando a lista de atributos, criassem três possíveis configurações para a PDI de forma que (i) fossem compostas por atributos diferentes daqueles existentes na oferta atual da empresa; (ii) todas as categorias (princípios) deveriam estar presentes e, (iii) as configurações não poderiam conter os mesmos atributos, ou seja, cada configuração da tecnologia não possuiria nenhuma característica em comum com as demais.

Feito isto, o passo seguinte consistiu em apresentar as três configurações desenvolvidas para os demais participantes da pesquisa (*stakeholders*) e solicitar que a avaliassem conforme a importância de cada atributo para suas organizações. A descrição das configurações e o questionário empregado para a coleta dos dados constam na segunda parte do Apêndice A. Aqui, foram empregados testes estatísticos para dados não paramétricos (teste de Friedman) a fim de observar a presença de diferenças significativas nas avaliações.

Uma vez realizadas as avaliações, foi possível obter um índice para cada configuração da PDI de forma que, ao ser incorporado ao modelo computadorizado, permitisse diferenciar as configurações quanto aos seus resultados nos diferentes cenários. Para gerar o índice de desempenho, foi utilizada uma normalização decimal dos dados. A partir do vetor característica é transformado em um vetor unitário seguindo a Equação (2).

$$x_i = \frac{x_i}{\|\vec{x}\|} \quad (2)$$

Onde:

$$\|\vec{x}\| = \sqrt{\sum_{j=1}^p x_j^2}$$

x_i , valor total das notas da configuração

p , número de dimensões que possui o vetor

O Índice de Desempenho é a mediana de x_{ij} , para uma dada configuração. Com isso, é possível, através da codificação dada a cada atributo, inferir sua participação na adoção da tecnologia, bem como endereçar as categorias de maior participação no índice. Os resultados desse processo constam no capítulo 4.

3.2.6 Fase 3 – Exploração dos Cenários

Esta Fase trata-se da definição de cenários adequados para a avaliação das diferentes configurações tecnológicas. Com base nas relações caracterizadas nas etapas qualitativas (CLD e CIA), busca-se traduzir os resultados obtidos até então para um formato quantitativo por meio da elaboração de cenários. Para tanto, é necessária a construção de um modelo Dinâmica de Sistemas, permitindo a simulação das configurações em diferentes cenários. A partir disso, espera-se que uma série de análises possam ser desenvolvidas, auxiliando os tomadores de decisão.

3.2.6.1 Etapa 7 – Elaboração dos Cenários

A última fase inicia-se com formulação dos cenários para a avaliação das diferentes configurações da tecnologia. A construção de cenários frequentemente requer o exame de desenvolvimentos em muitos campos diferentes (por exemplo, desenvolvimentos econômicos, políticos, sociais ou tecnológicos). Nesta etapa, deve-se definir as incertezas-críticas do sistema em análise. Para isto, foram selecionadas duas variáveis-chave identificadas na etapa de classificação das variáveis e a elas atribuídos níveis, resultando em quatro cenários representativos do sistema estudado. Os resultados desta etapa são apresentados no capítulo 4.

No passo seguinte, para possibilitar a avaliação das diferentes configurações da PDI nos cenários desenvolvidos, um projeto de experimentos foi definido de modo que as possíveis combinações fossem testadas, como recomendado por Morandi (2017). A definição das combinações e expertise dos participantes é fundamental para esta atividade. Cada experimento contém as informações sobre quais configurações serão avaliadas e em quais cenários, sendo apresentadas no Apêndice D (Planejamento dos Experimentos).

Uma vez estabelecidos os experimentos de simulações, é possível realizar as análises através de uma série de procedimentos. Uma possibilidade é comparar os resultados das diversas configurações da tecnologia para um dado cenário, por exemplo, verificando qual das configurações apresenta maior quantidade de adotantes.

No estudo em questão, algumas variáveis adotadas foram representadas por probabilidades, conferindo certa aleatoriedade ao modelo de simulação. Dessa forma, são necessárias replicações para cada um dos experimentos. Como aponta Morandi (2017), havendo a presença da aleatoriedade nas variáveis, estas serão representadas por intervalos de confiança. Tal aleatoriedade deve ser integrada ao modelo. Sendo sua função de distribuição de probabilidade desconhecida, sugere-se a utilização da simulação de Monte Carlo.

Aqui, para verificar se as configurações da PDI apresentam diferenças estatísticas significativas, como sugerido por Morandi (2017) é aplicado o teste ANOVA. A autora sugere a aplicação de uma segunda análise para se verificar a robustez dos resultados. No caso em estudo, uma configuração será considerada tão mais robusta quanto maior for o número de cenários em a quantidade de adotantes superar a quantidade de adotantes dada a atual configuração ofertada pela empresa. A Figura 15 exemplifica os resultados esperados para tal análise nos quatro cenários estabelecidos.

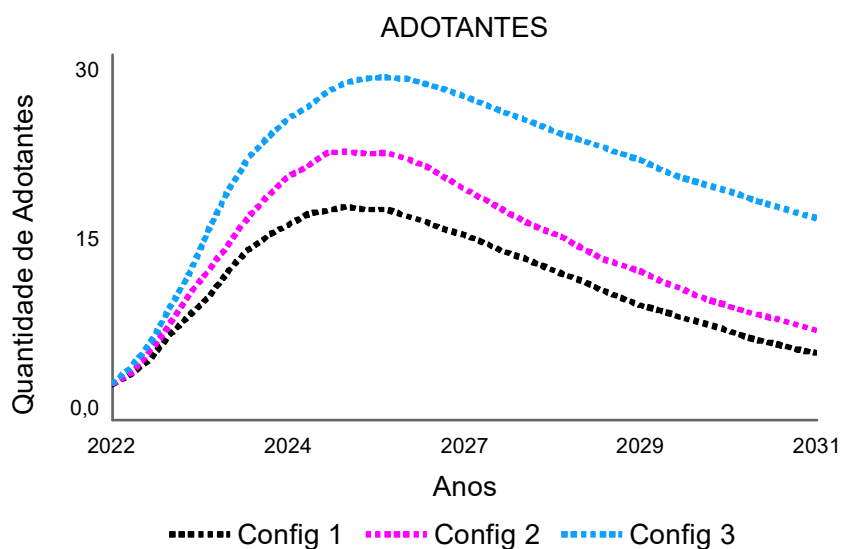


Figura 15 - Exemplo de Análise Comparativa entre as Diferentes Configurações da Tecnologia.

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em Morandi (2017)

A Figura 15 exemplifica os resultados esperados para tal análise nos quatro cenários estabelecidos. Dada uma configuração da tecnologia, quanto maior é o número de cenários em que a quantidade de adotantes superar a quantidade em relação ao cenário base, mais robusta será considerada a configuração (MORANDI, 2017). Uma terceira e última análise envolve averiguar se uma determinada configuração difere em seus resultados a depender do cenário. Para isso, novamente o teste ANOVA pode ser utilizado. Em síntese, busca-se com esta etapa determinar a configuração tecnológica mais robusta e, se possível, que tal configuração apresente resultados superiores, em termos de adotantes, às demais configurações.

3.2.6.2 Etapa 8 – Construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas

A construção de um modelo para suporte aos provedores da tecnologia está identificada como uma etapa da Fase 3. Nesta etapa, permitiu-se identificar e selecionar o modelo de Dinâmica de Sistemas utilizado como recurso para análises dos cenários e configurações da tecnologia.

Além disso, também foi considerado como ideal para a adaptação e simulação um modelo proposto por Morecroft (2008) cuja finalidade é avaliar clientes potenciais para linhas aéreas. Adicionalmente, foram definidos os resultados esperados a serem simulados no modelo, as incertezas relevantes para a avaliação e a estrutura geral do modelo. A execução desta etapa está demonstrada na seção 4.3.2. Em seguida, averiguada a formulação matemática do modelo

(apresentada no Apêndice E – Formulação Matemática para o Modelo), o mesmo foi adaptado e ampliado com o propósito de adequação às modificações desejadas para a simulação no contexto da PDI.

Seguida à verificação matemática do modelo, ocorreu sua efetiva implementação. Optou-se por utilizar um *time step* (Dt) de 0.25 com o método de Euler para integração numérica, possibilitando a comparação de seus resultados àqueles produzidos pelo modelo de Morecroft (2008) original. Neste ambiente, foi possível executar o modelo computacional e realizar a maior parte dos experimentos e análises pretendidas neste trabalho.

Com a ausência de dados históricos para comparação com os resultados do modelo, este ficou carente de validação. Restando avaliar se há vieses estruturais na concepção do modelo, como sugere Sterman (2000). Para este fim, foram empregados os testes de adequação visual e de adequação dos limites do modelo. O processo de classificação das variáveis apresentado anteriormente auxilia no estabelecimento dos limites do modelo, visto que os mesmos definem quais variáveis devem ser tratadas de modo endógeno. Isto está de acordo com o que recomenda Sterman (2000).

Uma vez selecionado e realizados os devidos testes, o modelo foi executado a fim de observar o desempenho das diferentes configurações tecnológicas em um conjunto de quatro cenários definidos a partir das incertezas-críticas identificadas. Os parâmetros utilizados na simulação foram obtidos de três maneiras distintas. Considerando que o modelo construído foi baseado no modelo competitivo de Morecroft (2008), uma parte dos parâmetros foi baseada nos parâmetros originais, não se diferenciando quanto à formulação algébrica das relações, mas quanto às variáveis adaptadas ao modelo. Nos casos onde as informações ou parâmetros desejados não puderam ser utilizados, buscou-se as fontes mencionadas na etapa de coleta de dados ou dados foram arbitrados pela equipe de trabalho.

O modelo foi simulado em um Desktop Intel ddr4, i5, 4GB RAM, utilizando o sistema operacional Windows 11 e a execução de todas as simulações durou cerca de 42 minutos. Em cada uma das simulações o período definido foi de 10 anos. Utilizou-se para esse fim, o software STELLA, no entanto, outros softwares como iThink e Vensim. estão disponíveis no mercado.

Cabe também mencionar algumas limitações à aplicação do modelo. O modelo não representa diferentes mercados aos quais possa a PDI também ter utilidade. Todos os mercados são representados por uma única curva de adoção. Outra delimitação é que o modelo não representa fusões e aquisições entre os *stakeholders* do ecossistema considerado, sabendo ser essa uma prática comum nas relações entre grandes empresas e *startups*.

Durante a construção do modelo são realizados alguns dos testes indicados na seção 2.3.1 deste trabalho. Nesta etapa também ocorre a coleta de dados e parâmetros para o modelo, por exemplo, o crescimento do segmento industrial e o preço praticado pelos concorrentes. No modelo em questão, foram incluídas as incertezas críticas selecionadas a fim de caracterizar os cenários para que sejam simulados.

Somado a estas características, o modelo construído tem como ponto central os provedores da PDI, ou seja, a empresa focal participante da pesquisa. Como consequência, o modelo em sua condição inicial não é capaz de reproduzir possíveis decisões relacionadas a outros atores do ecossistema. Concluídas a proposta e o desenvolvimento do estudo, o próximo capítulo descreve os resultados obtidos e avalia se a aplicação proposta fornece um modelo adequado e prático para identificação de incertezas no contexto apresentado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir das aplicações do método abordado no capítulo anterior. Inicialmente ocorre a descrição da empresa e seus serviços. Em seguida, são apresentadas as etapas desenvolvidas ao longo da aplicação do método proposto, relatando também a participação da equipe de trabalho e os resultados obtidos nas tarefas desenvolvidas em cada uma das etapas bem como uma breve discussão sobre as vantagens e desvantagens das ferramentas empregadas. O capítulo se encerra com a construção dos cenários e do modelo computacional para desenvolver a análise comparativa entre os resultados. Por fim, é realizada uma avaliação a respeito da aplicação do método proposto e são apresentadas as considerações finais.

4.1 Fase 1 – Contextualização do Estudo

A Fase de contextualização compreende as etapas 1 e 2, visando fundamentar o problema de estudo e compreender os elementos do sistema e suas relações causais, como já mencionado no capítulo 3. Entende-se que estas etapas já se apresentam na formulação do problema de estudo (seção 1.1) e emprego da revisão literária seguindo o descrito na seção 3.2.4. Contudo, considera-se como produto final desta Fase a descrição da atuação e ambiente da empresa do estudo de caso. Para isto, o primeiro passo foi o envolvimento da empresa provedora da PDI com a aplicação do modelo proposto. A decisão de aplicar o modelo partiu conjuntamente do pesquisador e dos gestores da empresa, a qual encontra-se em fase de crescimento, prospectando potenciais clientes. Isso gerou nos gestores a necessidade de uma maior compreensão do mercado potencial para a tecnologia oferecida.

Assim, a aplicação do modelo desenvolvido neste estudo tornou-se oportuna, pois converge os objetivos acadêmicos propostos com os objetivos concebidos pela organização no que se refere a análise sistêmica dos fatores que influenciam a adoção de sua plataforma digital. Sendo percebida a conexão do modelo às perspectivas da empresa, sua aplicação levou em torno de 3 meses para a completa implementação. Aqui, se reconhece como necessárias algumas melhorias nas interfaces de utilização do modelo.

A empresa designada para a aplicação do modelo atua provendo análises de dados com foco no desenvolvimento de soluções voltadas à manutenção preditiva a partir de dados captados no ‘chão de fábrica’. Trata-se de uma empresa nascente com 3 anos de atuação, sendo dois destes dedicados a um programa de incubação de *startups*, onde foi possível desenvolver

alguns de seus processos de negócios. Atualmente, seu mercado é nacional, porém concentrado em empresas da região sul do Brasil e no Estado de Minas Gerais.

Entre os principais produtos desenvolvidos pela empresa está um painel de gestão de dados (*dashboard*) onde podem ser visualizados indicadores de diversos parâmetros de funcionamento das máquinas e do ambiente fabril, utilizados para a tomada de decisão. A empresa ainda fornece, através de parcerias, a instalação de sensores para a captura dos dados.

Através da plataforma digital desenvolvida pela empresa, é possível rapidamente coletar informações sobre a saúde dos equipamentos e integrar facilmente os indicadores ao sistema de informação do cliente. Tanto os indicadores quanto o *dashboard* podem ser customizáveis conforme o interesse de diferentes equipes, por exemplo, produção e sala de controle. Além disso, é possível a customização de relatórios e envio de alarmes e alertas por diversos meios de comunicação. Em um caso de aplicação de suas soluções em uma fabricante de equipamentos de utilidade doméstica e jardinagem, a empresa demonstrou comprovadamente resultados satisfatórios em termos de aumento da vida útil das máquinas, queda nos custos de manutenção e redução significativa no tempo em que as equipes de engenheiros despendiam para a análise dos dados de manutenção.

A aplicação deste estudo foi constituída em conjunto com os sócios-gestores da empresa e demais *stakeholders* presentes no ecossistema. O estudo foi conduzido pelo próprio pesquisador e a maioria dos encontros foi realizada de modo remoto através de ferramentas de comunicação via internet. Por ocasião, os sócios-gestores possuem amplo conhecimento e experiência no tratamento de dados. Contudo, nenhum dos participantes apresentara perícia em modelagem de Dinâmica de Sistemas ou nas demais ferramentas utilizadas no estudo.

Quanto aos demais *stakeholders* envolvidos, convencionou-se como requisito que deveriam ser representados por especialistas em produção, preferencialmente na área de manutenção e que essencialmente desenvolveriam um papel consultivo no estudo, validando algumas das definições tomadas com a equipe de trabalho formada com os sócios-gestores. Neste caso, procurou-se focalizar suas atuações no desenvolvimento e avaliação das configurações para a tecnologia ofertada pela empresa focal, obtendo assim, valiosas compreensões sobre as características que a plataforma deveria assumir. Ademais, os *stakeholders* participantes igualmente não possuíam conhecimentos da linguagem sistêmica ou a respeito das demais ferramentas, sendo, portanto, o primeiro contato deles com o método. Assim, tanto para a equipe de trabalho quanto para os *stakeholders*, optou-se por realizar uma breve instrução sobre a Dinâmica de Sistemas durante as reuniões a fim de capacitá-los minimamente às exigências de cada tarefa.

4.2 Fase 2 - Aplicação do Modelo de Estudo de Caso

Realizadas as etapas 1 e 2 para fundamentar do problema de estudo e compreender dos elementos e suas relações causais no sistema, segue-se a aplicação do modelo de estudo de caso, dividindo-se em duas fases subsequentes. A Fase 2 dedica-se à construção do modelo por meio do Pensamento Sistêmico, desenvolvimento do CLD, Análise de Impacto e identificação e avaliação das configurações da PDI. Já a Fase 3 – Exploração dos Cenários - se ocupa em definir e avaliar os resultados em distintos cenários. Isso é obtido por meio do emprego de um modelo de Dinâmica de Sistemas que permite a execução das simulações necessárias para a geração dos resultados.

4.2.1 Etapa 3 - Emprego do Pensamento Sistêmico

Nesta etapa o arquétipo de Crescimento e Declínio foi empregado como auxílio para a aprendizagem da equipe de forma a permitir construção da estrutura sistêmica. Neste arquétipo, o comportamento dos elementos do sistema depende de um recurso esgotável, como a demanda pela tecnologia.

Partindo da compreensão gerada com o uso desse arquétipo, a estrutura sistêmica desenvolvida permitiu, ainda que de modo superficial, identificar os elementos presentes e expor relações sistêmicas para o crescimento da adoção da tecnologia. A Figura 16 apresenta um dos diagramas desenvolvidos, neste caso, criado para estruturar a presença de concorrência para empresa. O Apêndice F (Diagramas de Estrutura Sistêmica) apresenta os demais diagramas desenvolvidos. Já o Quadro 9 apresenta as variáveis que foram adicionadas de modo a reforçar e particularizar a estrutura desenvolvida.

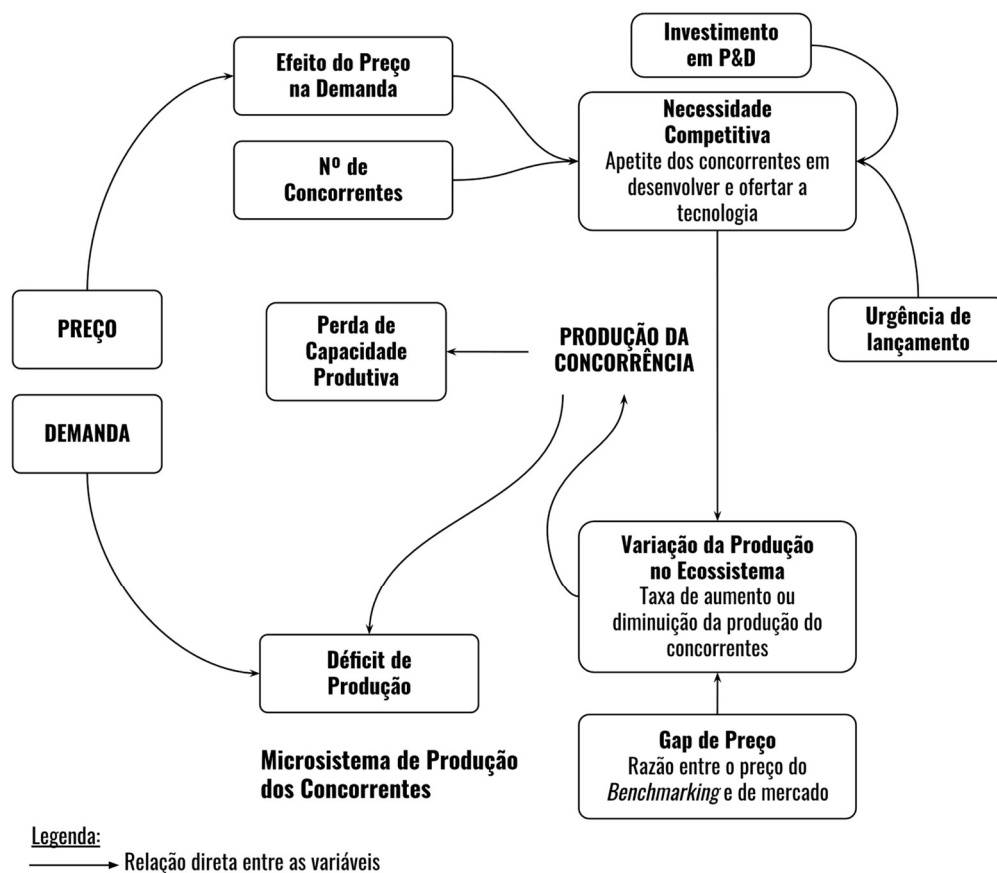


Figura 16 - Diagrama de estrutura sistêmica explicitando a concorrência.

Fonte: elaborado pelo autor

Uma das relações identificadas durante esta etapa diz respeito a resposta da concorrência no segmento de atuação da empresa. A Figura 16 apresenta como os concorrentes, coletivamente, podem impedir as ambições de crescimento da empresa estudada. Assume-se que a adoção da PDI depende do preço praticado pelo provedor da PDI ser mais baixo do que o de seus rivais. Esta formulação sugere que os concorrentes não podem reduzir seus preços até que cortem custos, o que pode levar até meses para atingir a paridade de custos. Aqui a produção da concorrência é ditada pela capacidade disponível. A justificativa para a expansão da capacidade é dominada por fatores comerciais; assim que os concorrentes julgam que o mercado-alvo é lucrativo decidem por adicionar nova capacidade.

Com base nos diagramas desenvolvidos, foi possível à equipe de trabalho explorar novas variáveis e relações. Adicionalmente, decidiu-se que a tarefa seria facilitada se fossem identificadas barreiras e impulsionadores à adoção da PDI. Estes dois grupos foram classificados dentro de cinco dimensões, onde aquelas variáveis que tivessem uma relação

externa à empresa seriam identificadas com a letra “E”. O resultado é apresentado na Quadro 9.

Quadro 9 - Barreiras e Impulsionadores para a adoção da Plataforma Digital

Dimensão	Barreiras	Impulsionadores
Mercadológica	Percepção de valor (tecnologia muito recente, falta experimentação (E)).	Necessidade crescente de reduzir o custo de manutenção (E).
		Necessidade crescente de reduzir tempo de inatividade (E).
		Emergência de IOS (<i>Internet Oriented Business</i>).
Estratégica	Falta de políticas e apoio do governo (E).	Novos modelos de negócios.
	Aumento da complexidade do negócio ao implementar a PDI.	Novas proposta de valor para aumento da competitividade.
	Dados em Nuvem vistos como problema para segurança dos dados (E).	
Tecnológica	Falta de infraestrutura digital (E).	Menor tempo entre manutenções.
		Capacidade computacional e serviços baseados em nuvem.
	Redução do impacto ambiental (desperdícios de matéria-prima).	Redução de tempo de análise de dados.
		Maior precisão em pedidos de peças de reposição.
	Má qualidade e gerenciamento de dados (coleta inadequada, falta registro de problemas, mal configurado).	Menos falha de máquinas.
	Falta de padronização dos protocolos de comunicação industrial.	Aumento da vida útil das máquinas.
	Utilização de equipamentos que não se integram na rede.	
	Custos de sensoriamento e transmissão (E).	Programação de manutenção flexível.
		Menor consumo de energia e recursos.
		Adoção de <i>big data</i> e demais tecnologias, como IoT e Nuvem (E).
Disponibilidade 24x7.		
	Restrições financeiras (E).	Maior eficiência operacional.
	Resistência à mudança (E).	

(Continua)

Organizacional	Rígidez organizacional (E).	Aumento do Retorno do Investimento (ROI).
	Falta de apoio da gestão (E).	
	Falta de visão e estratégia digital (E).	
	Falta de cultura digital (depende da governança organizacional) (E).	Diminui o <i>Payback</i> em relação à outras tecnologias substitutas (comparáveis).
	Benefícios econômicos pouco claros (intangível). Decisores não vêem valor nos Algoritmos, não entendem o processo de análise por meio dos indicadores (E).	
Legal e ética	Cultura Colaborativa (E).	Transparência dos processos de negócios e produção.
	Questões legais (E).	Redução no impacto ambiental.
	Dificuldade em se ajustar às normas e regulamentos.	Redução de reclamações trabalhistas (satisfação do trabalhador).
	Questões de privacidade e segurança de dados.	Segurança operacional melhorada.

Fonte: elaborada pelo autor

Ainda nesta etapa, foi observado que deveriam ser incluídos alguns processos organizacionais que seriam afetados ao se adotar a PDI. Dessa forma, foram identificados quatro processos relevantes relacionados à manutenção industrial. Assim, foram identificados e incluídos no CLD os seguintes processos: (i) monitoramento de parâmetros ambientais; (ii) controle de qualidade do processo produtivo; (iii) fornecimento de materiais e (iv) relatório de informações.

Um dos produtos esperados para esta etapa é a descrição da PDI. A Figura 17 apresenta a PDI seguindo informações dos sócios-gestores da empresa. Em termos gerais, a plataforma atua como uma ponte entre os ativos industriais e as aplicações, dispondo sua estrutura na forma de camadas. A primeira camada compreende todos os ativos físicos e dispositivos, mais especificamente seus sensores para captura de dados e atuadores. Já nas camadas intermediárias, a PDI conta com um conjunto consideravelmente mais diversos de tecnologias de base e atores necessários para a criação de valor. Por fim, a última camada compreende as diversas possibilidades de aplicações úteis às tarefas operacionais e gerencias de manutenção. Observa-se que a PDI deste estudo não tem por objetivo processos reativos para provocar ações das máquinas.

Na PDI em questão, são operados um conjunto heterogêneo de ativos industriais, que por sua vez operam em um ambiente B2B complexo, o que significa que os ‘usuários finais’ são empresas industriais em vez de indivíduos consumidores. Realizando o preconizado para esta atividade, foram identificados como *stakeholders* de interesse do estudo: (i) provedores de hardware, (ii) desenvolvedores de aplicações, (iii) integrador de sistemas (MES), (iv) consultores e (v) uma empresa líder estratégica.

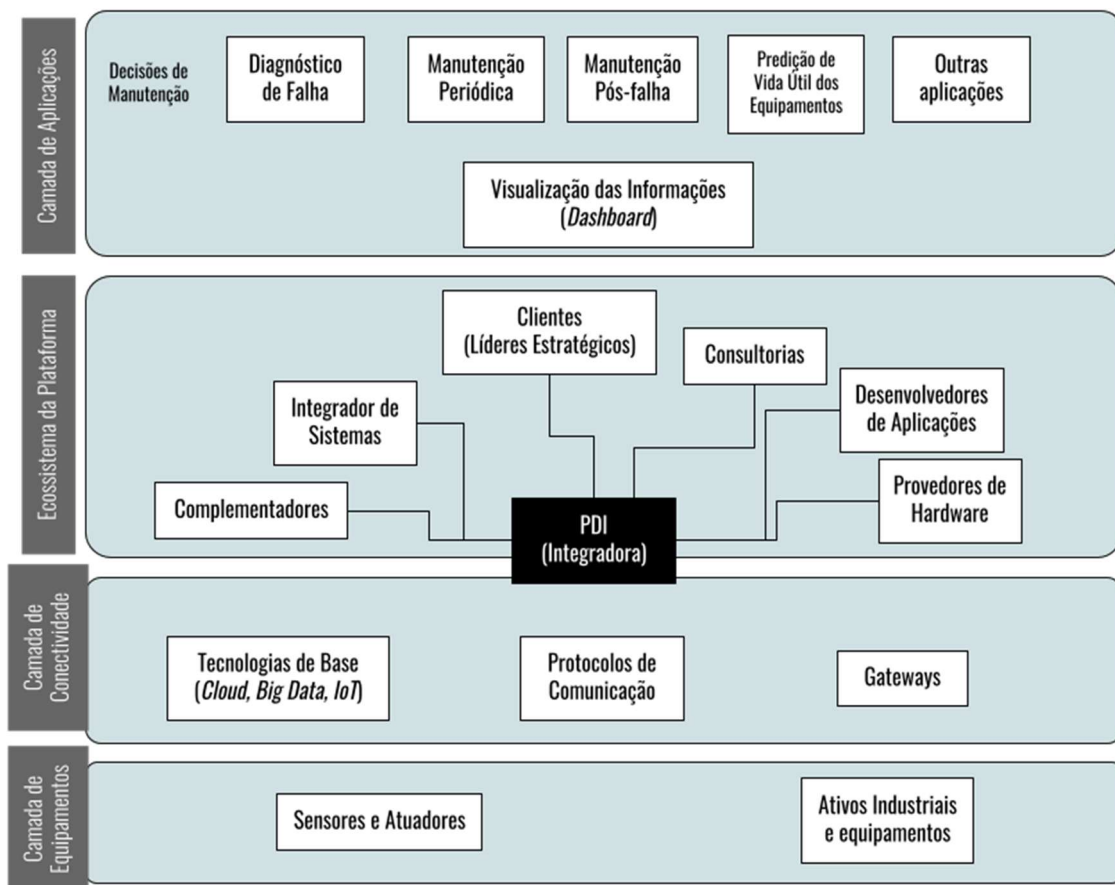


Figura 17 - Estrutura da PDI e Stakeholders.

Fonte: elaborado pelo autor, baseado em Sisinni *et al.* (2018)

A PDI leva em consideração soluções destinadas a melhorar o funcionamento de complexas linhas de manutenção industrial, onde cada cliente terá máquinas conectadas a sistemas de informação diferentes, operando sob configurações diferentes, em conjunto com outros ativos, muitos dos quais podem jamais virem a ser integrados à rede. Como resultado, não há dois cenários de implantação iguais, levando a um foco em soluções individuais em vez de genéricas. No entanto o que se busca com a seleção dos atributos desejáveis, como será demonstrado na Etapa 6 (definição das configurações da PDI) é determinar um conjunto de

atributos que possa atender ao maior número possível de potenciais usuários, considerando suas manifestas preferências em resposta às entrevistas.

Esta tarefa inicialmente programada para 2h, foi acrescida de mais 1h e 20 minutos para a inclusão das barreiras e impulsionadores e os processos relacionados à manutenção. Por fim, esta atividade foi revisada e consolidada na reunião seguinte, cujo objetivo era a construção do Diagrama de Enlace Causal, etapa que será exposta na próxima seção.

4.2.2 Etapa 4 – Desenvolvimento do Diagrama de Enlace Causal

O processo de construção do CLD iniciou-se com a revisão e consolidação das informações desenvolvidas na etapa anterior. Em seguida, foi realizada uma breve explicação sobre os resultados esperados da tarefa, a linguagem sistêmica e foram apresentados alguns exemplos de CLD visando auxiliar a equipe de trabalho. Tal processo foi resultado da segunda reunião com a equipe de trabalho com aproximadamente 2 horas de duração.

Tomando os Diagramas de Estrutura Sistêmica desenvolvidos e a lista de barreiras e impulsionadores, um CLD abrangente foi desenvolvido integrando todos esses fatores identificados, podendo ser visualizado na Figura 18. Somado ao trabalho da equipe nesta etapa, as relações que mais suscitaram dúvidas foram também submetidas à avaliação dos *stakeholders* participantes, cada qual em sua respectiva reunião.

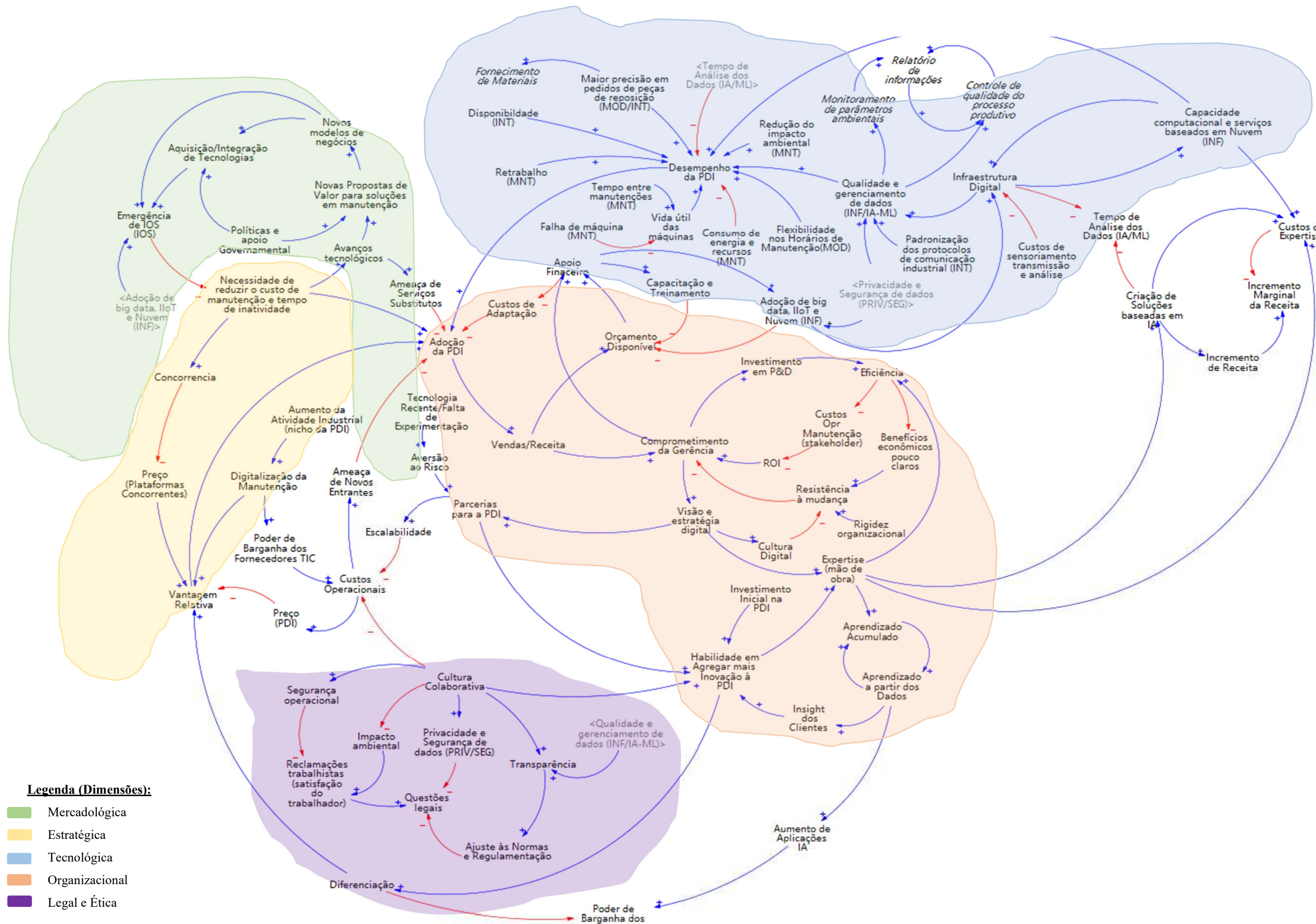


Figura 18 - CLD preliminar do Sistema de adoção da PDI.
 Fonte: elaborado pelo autor

Os impulsionadores e barreiras à implementação da PDI são representados sob cinco laços causais: mercadológico, estratégico, legal e ético, tecnológico e organizacional. Além disso, os impulsionadores são representados com setas azuis e as barreiras ou outras relações são representadas com setas vermelhas.

Para a dimensão estratégica de negócios, o aumento da competitividade desencadeia o surgimento e novos modelos de negócios, que é outro impulsionador para que mais negócios semelhantes à PDI desponhem no escopo de adoção tecnológica das empresas. Somado a isso, a falta de políticas governamentais, geralmente voltadas à financiamento, acarreta em dificuldades para que empresas nascentes desenvolvam ‘novas propostas de valor para soluções em manutenção’, enquanto que para os potenciais clientes essa falta de apoio se reflete na falta de recursos para a ‘aquisição ou integração de tecnologias’. Os efeitos repercutem em menor ‘emergência de *Internet Oriented Services (IOS)*’ o que por sua vez aumenta a já percebida ‘necessidade de reduzir o custo de manutenção e tempo de inatividade das máquinas’. Tal necessidade resume o elo impulsionador que une todo este ciclo à adoção da PDI.

Como já mencionado, a ‘necessidade de redução de custos com manutenção’ é uma forte motivação para que as empresas adotem tecnologias como a PDI. Acontece que tal necessidade evidencia-se como impulsionadora de outros dois fatores impactantes à adoção da tecnologia: Primeiramente, ela fomenta o ‘avanço tecnológico’ que é impelido pela procura por soluções satisfatórias aos problemas de manutenção, o que potencialmente, cedo ou tarde, resulta na ‘ameaça de serviços ou produtos substitutos’ à adoção da PDI. Em segundo lugar, tal necessidade (demanda) também é captada pelos concorrentes, que por sua parte, atuam tão prontamente sua estrutura de custos lhes permita, de forma a deprimir o preço de suas plataformas, impactando na ‘vantagem competitiva’ pertencente à PDI. Assim, a vantagem competitiva se apresenta como um elo de ligação da dimensão de mercado com a adoção da PDI.

A aumento da ‘atividade industrial’, identificado como um impulsionador para a plataforma, revelou-se como um elemento com carácter contraintuitivo. Com a aumento da industrialização, assume-se que haverá um aumento na digitalização dos processos ligado ao gerenciamento da manutenção. Contudo, a maior digitalização ocasionará o aumento do ‘poder de barganha dos fornecedores’ de serviços ou produtos ligados às tecnologias da informação e comunicação (TIC). Esse maior poder potencialmente levará ao aumento dos ‘custos operacionais’ do provedor da PDI ou do cliente contratante, que por seu lado, fará com que a adoção da PDI seja porventura comparada a serviços mais vantajosos supridos por ‘novos entrantes’.

Outro fator com impacto negativo sobre a adoção da PDI diz respeito aos ‘custos de mudança ou adaptação’ que as organizações deverão incorrer caso queiram implementar em suas plantas tecnológicas da I4.0. Pode-se rastrear que tais custos tenham como fundamento a falta de ‘apoio financeiro’, e este, é efeito tanto da falta de ‘comprometimento da gerência’ quanto do baixo ‘orçamento disponível’ para projetos de implementação. Este último, pode ser derivado das ‘vendas de mais serviços da PDI’, quando algumas das organizações contratantes atuam como parceiras revendendo ou provendo a outros clientes finais as soluções da PDI.

Por último, a adoção de tecnologias emergentes, como já exposto no capítulo dois deste estudo, se dá pelas características que uma determinada tecnologia pode assumir. Tais características, aqui também denominadas como atributos, quando consideradas em conjunto, formam variadas combinações que, ao final, darão forma às possíveis configurações da tecnologia ofertada. Posto isto, estas configurações vão se traduzir no desempenho que a tecnologia entregará à organização adquirente. No caso aplicado deste estudo, atributos como ‘tempo de análise de dados’, ‘precisão em pedidos de peças de reposição’ e ‘flexibilidade nos horários de manutenção’ são alguns exemplos identificados como influenciadores no ‘desempenho da PDI’. Assim sendo, o desempenho da plataforma determinará diretamente seu potencial de adoção pelo mercado.

Nesta etapa, buscou-se garantir que a variável ‘adoção da PDI’ fosse suficientemente explicada por sua relação com as outras variáveis do sistema. Em contraste, procurou-se evitar que possíveis relações fossem desenvolvidas de modo extremamente detalhado, inserindo exageradamente complexidade ao sistema.

Como benefícios do emprego do CLD pode-se destacar que os *insights* obtidos auxiliaram no planejamento e no entendimento das variáveis presentes no sistema, fornecendo percepções mais profundas sobre como a estrutura sistêmica pode ser aproveitada para comparações das variáveis antes e depois de possíveis intervenções. Do contrário, a principal desvantagem observada é que os CLDs não permitem a análise do comportamento das variáveis ao longo do tempo, sendo carente ao fornecimento da visão ‘dinâmica’ ao sistema estudado. De modo geral, pode-se dizer que estrutura apresentada pode fornecer meios para obter percepções sobre causas, efeitos e enlaces causais, não apenas para o caso específico desta aplicação, mas para demais problemas complexos ou lançamentos de serviços em outros contextos envolvendo tecnologias emergentes.

Concluindo esta etapa, foi possível identificar de modo mais aprofundado os elementos presentes no sistema de adoção da PDI - é a partir desta tarefa que as demais etapas se desenvolvem. As seções seguintes descrevem a aplicação da Análise de Impacto Cruzado por

meio das matrizes de impacto e de tempo e, em seguida, é descrita a avaliação dos atributos e definição das configurações da PDI.

4.2.3 Etapa 5 - Análise de Impacto Cruzado

A partir das variáveis identificadas no CLD, foram estabelecidas duas matrizes, uma para avaliação dos impactos e outra para a avaliação da dimensão tempo. Primeiramente, como já mencionado, os valores atribuídos pela equipe de trabalho representam o impacto direto de um fator em outro. Aqui, o objetivo é determinar o papel de cada uma das variáveis no sistema em estudo.

Baseando-se nas 77 variáveis identificadas até esta etapa, com auxílio do CLD, foram detectadas 110 relações diretas, as quais foram submetidas à avaliação por parte da equipe de trabalho. Tanto a matriz de impacto quanto a matriz de tempo foram avaliadas em reunião com duração aproximada de 2h e os extratos das planilhas desenvolvidas para coletar as avaliações são apresentadas nos Apêndices G e H (Extrato da Matriz de Impacto e Extrato da Matriz de Tempo, respectivamente). Nessa ocasião, foi solicitado à equipe que atribuisse avaliações para cada uma das matrizes, respeitando, respectivamente, as escalas de valor (ver seção 3.2.5.3) estabelecidas.

Por meio dos resultados obtidos foi possível determinar: *(i)* as variáveis que possuem mais influência no sistema (Figura 19), e, portanto, são potenciais variáveis de intervenção; *(ii)* as variáveis que demonstram maior dependência (Figura 20), se comportando como potenciais variáveis de monitoramento e, *(iii)* variáveis-chave que conjugassem ambas características de dependência e influência, sendo consideradas pertinentes ao papel de incertezas-críticas.

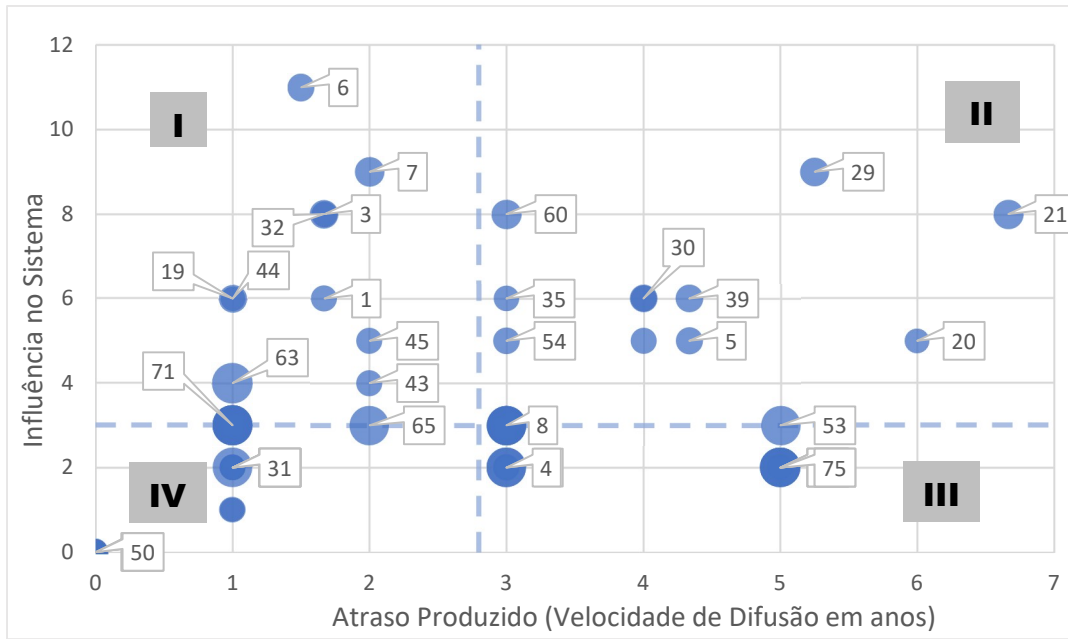


Figura 19 - Influência das Variáveis no Sistema.

Fonte: elaborado pelo autor

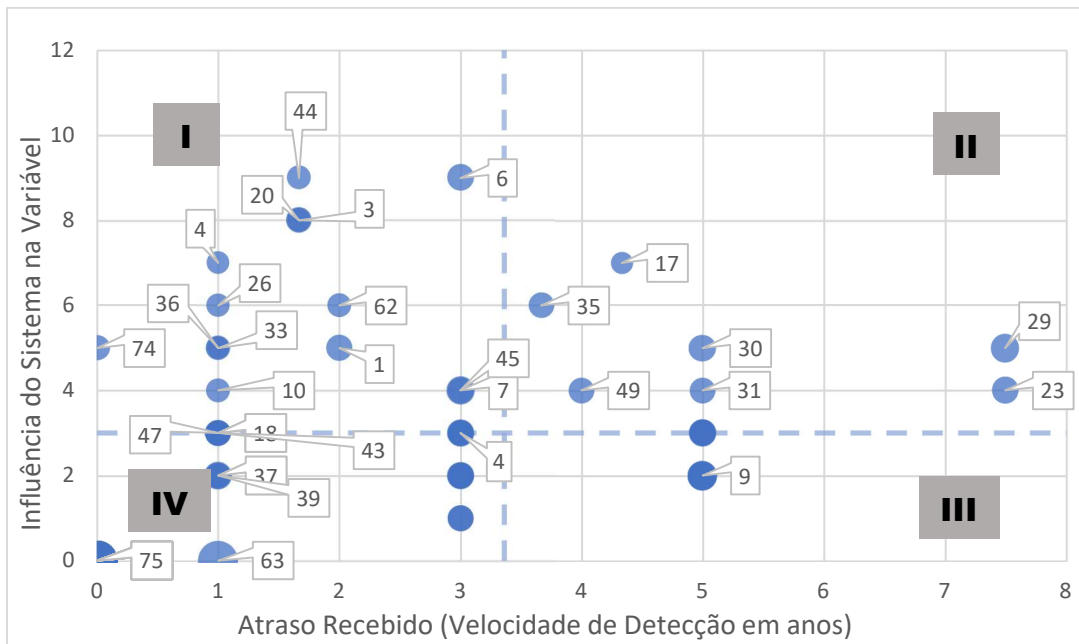


Figura 20 - Influência do Sistema nas Variáveis.

Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 4 reúne as variáveis em seus respectivos papéis no sistema e as classifica por ordem decrescente a partir de seus índices de prioridade (IP), dentro da categoria correspondente. Variáveis que não puderam ser classificadas em algumas das três categorias foram deixadas fora da remodelagem do sistema.

Tabela 4 - Identificação e Classificação das Variáveis

Variáveis-Chave	IL	RI	IP
7_Apoio Financeiro	5,00	0,69	0,48
44_Vantagem Relativa	-1,54	-0,54	0,46
1_Adoção de Big Data, IIoT e Nuvem	1	0,55	0,43
6_Qualidade e Gerenciamento dos Dados (INF/IA-ML)	2	0,55	0,42
45_Custos Operacionais	1,00	0,56	0,42
3_Infraestrutura Digital	0,00	0,50	0,40
Variáveis Influentes			
63_Capacidade computacional e Nuvem (INF)	4,00	0,62	0,97
32_Criação de Soluções IA/ML	5,00	0,73	0,48
19_Vendas/Receita	3,00	0,67	0,45
43_Diferenciação	1,00	0,57	0,42
Variáveis Dependentes			
11_Desempenho da PDI	-23	0,10	0,41
33_Custos c/ Expertise	-2,00	0,38	0,36
74_Vida Útil das Máquinas	-2,00	0,38	0,36
20_Comprometimento da Gerencia	-3,00	0,38	0,35
62_Reclamações trabalhistas (Satisfação do trabalhador)	-3,00	0,33	0,35
10_Controle de Qualidade do Processo Produtivo	-3,00	0,20	0,35
26_Resistência à Mudança	-4,00	0,25	0,33
4_Orçamento Disponível	-5,00	0,22	0,31
36_Incremento Marginal da Receita	-5,00	0,00	0,31

Obs.: O critério de classificação utilizado foi a partir dos índices de prioridade em ordem decrescente dentro de uma das três categorias de variáveis.

Fonte: elaborado pelo autor

Como já apresentado no capítulo 3, a avaliação da matriz de impacto permite a obtenção dos três índices apresentados na seção 3.2.5.3 e demonstrados na Tabela 4. A partir da utilização dos índices conjuntamente, pode-se ajudar os decisores a identificar a melhor alternativa em uma dada situação. Em suma, considerando potenciais variáveis de intervenção (variáveis influentes) para a adoção da PDI, a empresa, em estágio nascente, pode optar por se concentrar na razão de influência (RI), uma vez que seus recursos são geralmente escassos, buscando aplicá-los como maior eficiência; mas sob a perspectiva de empresas de grande porte e com mercados bem definidos, pode-se desejar a concentração de recursos em uma Influência Líquida (IL) mais alta para observar uma maior magnitude nas mudanças provocadas por suas intervenções.

Do outro lado do espectro, estão as variáveis dependentes (variáveis para monitoramento). Elas são fortes indicadores da ‘saúde’ do sistema e, portanto, são sensíveis a mudanças nas demais variáveis. Com os resultados obtidos, ‘desempenho da PDI (11)’, ‘orçamento disponível (04)’ e ‘incremento marginal da receita (36)’ são variáveis fortemente dependentes, sendo indicadores do estado geral do sistema de adoção da tecnologia. Variáveis dependentes como ‘vantagem relativa (44)’, por exemplo, além de boas referências da saúde do sistema, também exercem alta influência sobre outros fatores e, portanto, podem ser reputadas por variáveis-chave, logo, uma ótima candidata a ser tratada como incerteza-crítica do sistema.

De posse da classificação das variáveis mais importantes, o passo seguinte foi a elaboração de um CLD revisado (Figura 21), contendo pequenas adaptações e apto a ser transportado para o formato de um modelo computadorizado.

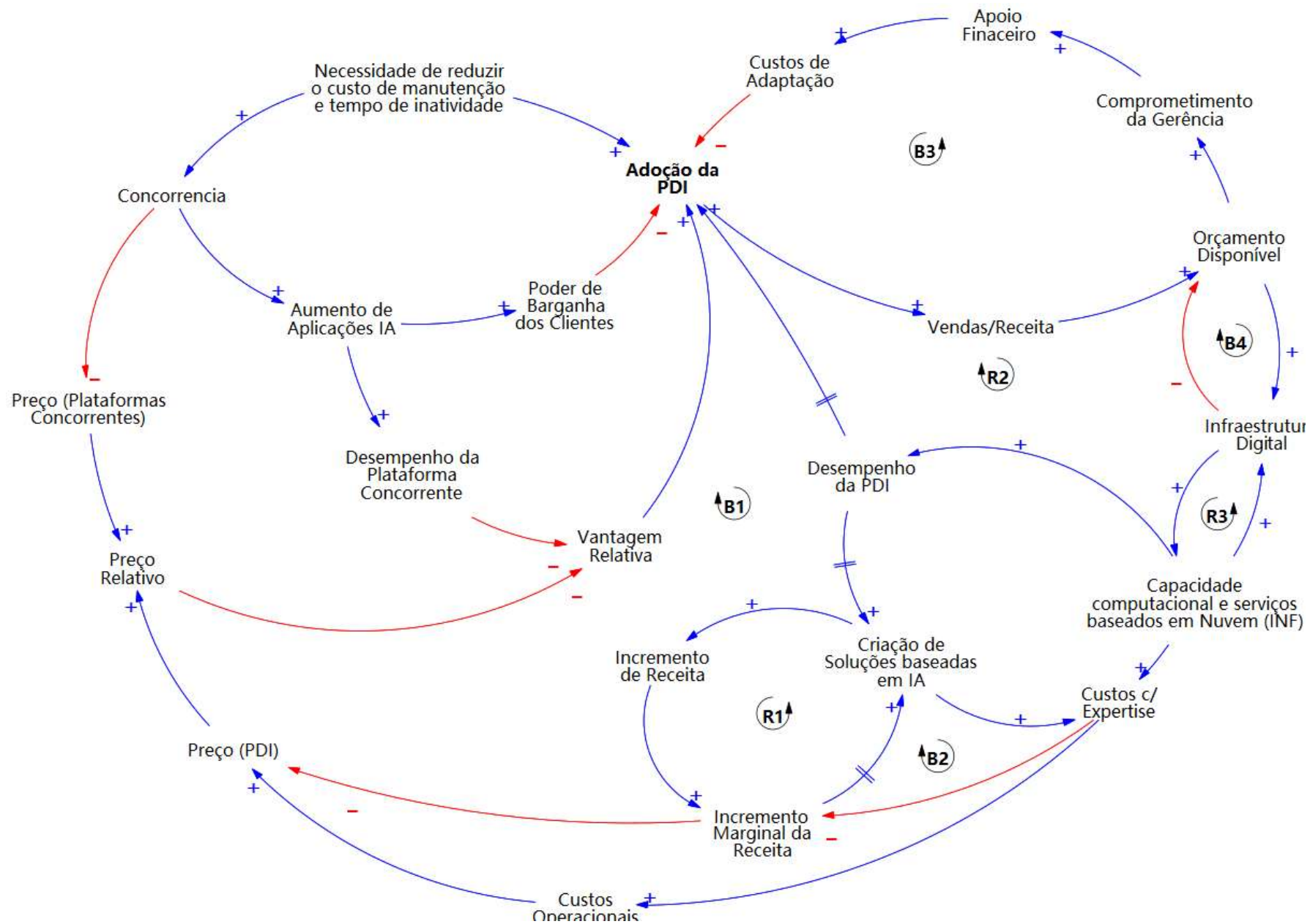


Figura 21 - Diagrama de Enlace Causal Revisado.
 Fonte: elaborado pelo autor

A estrutura revisada do CLD demonstra a capacidade de síntese promovida pela Análise de Impacto Cruzado. De posse dos resultados obtidos nas etapas desenvolvidas é possível efetuar uma análise aprofundada a respeito do sistema estudado. Ao todo, foi possível definir com alguma confiança sete loops de *feedback* que capturam a essência da estrutura da PDI e a base de sua complexidade dinâmica.

Partindo das variáveis-chave **Vantagem Relativa** (aqui representada pelo preço relativo) e **Adoção de Big Data, IIoT e Nuvem** (tecnologias de base) foram identificados múltiplos ciclos de *feedback*, alguns caracterizados como reforçadores e outros como balanceadores.

O primeiro enlace inicia-se com a ‘vantagem relativa’ que, potencializada pelo ‘preço relativo’, propicia uma maior ‘Adoção da PDI’, que por sua vez, incrementa o potencial de ‘receita’ do provedor da plataforma ou da empresa adotante que emprega a PDI como parceiro do serviço. Com o aumento da receita, o ‘orçamento disponível’ também é incrementado, possibilitando novos investimentos em ‘infraestrutura digital’, mais especificamente em ‘capacidade computacional e serviços baseados em Nuvem’. À medida que investimentos na infraestrutura vão avançando, a demanda por especialistas se mostra necessária, a depender dos propósitos e complexidade dos sistemas implementados, elevando os ‘custos com expertise’ que por sua vez, afetam na mesma direção os ‘custos operacionais’. Assumindo que o provedor da PDI desejará manter suas margens de lucro, tal elevação nos custos operacionais deverá ser compensada com aumento no ‘preço da PDI’ que, por fim, se reflete na forma de diminuição da vantagem relativa da PDI sobre a oferta dos demais concorrentes. Com isso, se completa o primeiro ciclo de balanceamento (B1).

O segundo ciclo balanceador (B2) se apresenta numa relação mais curta que a primeira. Nele, a ‘criação de soluções baseadas em IA’ acarretam em maiores ‘custos com expertise’, e tais custos impactam direta e negativamente o ‘incremento marginal da receita’, que fecham o ciclo de equilíbrio ao impactarem a capacidade ou motivação para direcionar recursos para a criação de novas soluções.

Considerando que com o aumento da capacidade computacional o ‘desempenho da PDI’ também será potencializado, se mostrando como um fator importante para a decisão dos potenciais adotantes. Esse melhor desempenho, diretamente obtido da melhoria de processamento, permite a ‘criação de soluções baseadas em IA’ por parte de complementadores ou dos próprios provedores da PDI. Soluções geradas a partir dos dados coletados são, e continuarão sendo potencialmente a maior fonte de receita para a empresa estudada. Com o ‘aumento da receita’, assumindo que as soluções digitais geralmente por estarem ligadas à

escalabilidade não serão muito impactadas por custos fixos, se obterá um maior “incremento marginal da receita” que, por sua vez, permite que o provedor da plataforma (assumindo que manterá suas margens) pratique um menor preço, aumentando sua ‘vantagem relativa’ em comparação aos competidores. Desta vez, um enlace reforçador é formado (R1).

Considerando que o ‘Desempenho da PDI’ levará a um aumento da ‘adoção da PDI’, que por sua vez levará a maiores vendas, assumindo que provedor atuará em parceria com alguns de seus clientes, o incremento das vendas acarretará em um maior ‘orçamento disponível’ o que permitirá melhorias na ‘infraestrutura digital’. Parte dessa infraestrutura digital se traduz em ‘capacidade computacional’ e, um maior poder de processamento, principalmente advindo de serviços baseados em nuvem, ampliará o desempenho da PDI, ao capacitar a criação de novas soluções e análise dos dados. Dessa forma, um segundo ciclo reforçador (R2) é identificado.

Já a ‘adoção da PDI’ está ligada ao seu potencial de incremento na ‘receita’. Esse incremento é um fator determinante para que haja um maior ‘comprometimento da gerência’, o que garante o ‘apoio financeiro’, tanto para a implementação quanto para a operação da plataforma digital. Com maior apoio financeiro, os decisores provavelmente se inclinarão para a implementação da PDI. Contudo, assumindo que muitos dos potenciais adotantes deverão se comprometer com mudanças organizacionais e operacionais para efetivar a implementação, certamente se levará em conta os ‘custos de adaptação’ requeridos no processo de mudança. Um enlace balanceador (B3) é constituído partindo da concepção de que maiores ‘custos de adaptação’ sejam um fator decisivo para que se diminua o potencial de adoção da PDI.

Por fim, um ciclo de reforço (R3) e outro de equilíbrio (B4) relacionam as variáveis ‘capacidade computacional’, ‘infraestrutura digital’ e ‘orçamento disponível’, encerrando assim, a atividade de identificação dos enlaces causais dentro do CLD.

Algumas observações podem ser realizadas quanto ao emprego da Análise de Impacto Cruzado neste estudo. Uma das principais motivações para a utilização da CIA é não necessitar de dados externos além da expertise de quem a preenche, o que a torna uma abordagem relativamente simples e direta em comparação com outras. Um método semiquantitativo (como usado neste artigo) é geralmente eficaz o suficiente para a maioria das análises de sistemas complexos, pois requer poucos dados primários do sistema. Um importante benefício adicional é que muitas vezes os especialistas participantes são movidos a dar razões a seus julgamentos, principalmente quando as diferenças entre os julgamentos se tornam divergentes. Como afirma Pahl *et al.* (2014), estas inflexões podem ser discutidas e um novo ponto de vista pode ser criado, ampliando e consolidando a compreensão do sistema.

Por outro lado, uma limitação percebida é que, assim como no CLD, a CIA representa um momento instantâneo do sistema não podendo lidar com questões dinâmicas. Existem muitas situações, no entanto, em que se percebe que será suficiente, por exemplo, quando um sistema muda muito lentamente com o tempo em relação à escala utilizada ou quando a duração durante a qual o sistema opera é curta. Algumas desvantagens específicas também foram constatadas: (i) apenas os sistemas com um número moderado de variáveis são acessíveis para a análise e (ii) os julgamentos se sujeitam à compreensão personalíssima que os avaliadores têm sobre o sistema, significando que os resultados devem ser interpretados tendo em mente a incerteza de tais avaliações. De modo geral, a CIA foi capaz de dar uma valiosa contribuição a este estudo, oferecendo um ambiente preparatório para as abordagens *hard* e promovendo a compreensão do sistema pelos avaliadores por meio de um processo reflexivo.

Finalizando esta etapa, é importante ressaltar que o processo de triagem realizado não é permanente, sendo que novas variáveis podem ser agregadas ou outras agora presentes podem ser excluídas. Por fim, buscou-se com esta etapa selecionar as variáveis diretamente ligadas àquelas variáveis úteis ao estudo do potencial de adoção da tecnologia pesquisada, e isso foi realizado de acordo com a experiência e compreensão dos participantes. A seção seguinte expõe a etapa de definição das configurações da tecnologia estudada.

4.2.4 Etapa 6 - Definição das Configurações da Plataforma Digital Industrial

A fim de definir das configurações da PDI, em um primeiro momento foram identificados e categorizados, pela equipe de trabalho, os atributos para a tecnologia. Em seguida, estes atributos foram levados à avaliação dos *stakeholders*. Para tanto, foram realizadas entrevistas semiestruturadas com os *stakeholders* identificados quando na construção da estrutura sistêmica (Etapa 2). Por fim, estas avaliações foram sucedidas dos testes estatísticos pertinentes.

Para a identificação dos atributos da PDI, tendo como base as informações levantadas na etapa de CLD, foi solicitado à equipe de trabalho que estabelecesse categorias que contemplassem aspectos importantes de sua tecnologia. Foi definido que esta tarefa deveria tomar como base as variáveis identificadas no CLD que estivessem devidamente ligadas (mas não limitadas) ao ‘desempenho da PDI’. Assim, foram definidas oito categorias e uma codificação foi adicionada para facilitar a análise: Modularidade (MOD), interoperabilidade (INT), infraestrutura (INF), *Internet Oriented Services* (IOS), privacidade (PRIV), segurança (SEG), Inteligência Artificial / *Machine Learning* (AI/ML) e Manutenção (MNT). Logo após, foram definidas três opções de atributos, distintos entre si, para cada uma das oito categorias.

Além disso, foi acrescentada a cada categoria uma quarta opção, desta vez descrevendo os atributos atuais da PDI.

Com isto, foi possível criar um catálogo de atributos, categorizá-los de acordo com elementos identificados no CLD e, por fim, definir as possíveis configurações que a PDI poderá assumir. Os resultados deste passo encontram-se no Apêndice C.

Uma vez definidas as configurações, o passo seguinte foi reunir-se com os *stakeholders* para que realizassem suas avaliações e fornecessem percepções adicionais sobre a proposta tecnológica. Para tanto, foram realizadas entrevistas auxiliadas pelo questionário desenvolvido (Apêndice A), participando apenas o pesquisador e o *stakeholder*. Ao total foram realizadas cinco entrevistas, uma para cada *stakeholder*, com duração média de 1h e 10 minutos.

O questionário foi dividido em duas partes. Na primeira parte, aos participantes foi solicitado fornecer informações básicas, como sua função na organização. Algumas das perguntas abertas questionavam sobre quais fatores consideram essenciais para a implementação de tecnologias em suas organizações, sendo que alguns comentários foram replicados na seção 4.4.1. Na segunda parte da entrevista, o foco foi avaliar cada um dos atributos com base na importância que teriam para o *stakeholder*, utilizando-se de uma escala Likert, variando de 1 (nenhuma importância) à 5 (extremamente importante). Para garantir que os participantes compartilhassem o mesmo entendimento, uma explicação foi fornecida antes do início da tarefa.

Para a avaliação dos resultados foi realizado o teste de Friedman, comumente utilizado para dados não paramétricos (os dados são ordinais e não atendem à pressupostos de normalidade e homogeneidade) e relacionados (pois a todos entrevistados foi solicitado que avaliassem as mesmas configurações tecnológicas). Tal processo foi suportado pela versão 28.0.1.1 do software SPSS. Após tabular os dados, foi verificado se todas as suposições do teste de Friedman foram atendidas.

A primeira análise permitiu verificar a existência de diferenças significativas entre as oito categorias a fim de identificar quais delas se mostravam relevantes como diferenciadoras das configurações. A Tabela 5 apresenta as categorias em que pelo menos um dos atributos mostrou-se significativamente (baseando-se nos parâmetros *Chi*-quadrado e $p < 0,05$) diferente dos demais.

Tabela 5 - Categorias em que pelo menos um atributo apresentou diferenças significativas

	MOD	INT	INF	PRIV	SEG	IA-ML
N	5	5	5	5	5	5
Qui-quadrado	12,196	12,196	9,209	11,214	12,385	14,302
df	3	3	3	3	3	3
Sig.	0,007	0,007	0,027	0,011	0,006	0,003

Fonte: elaborado pelo autor

O teste de Friedman mostrou que pelo menos um atributo difere dos demais em todas as categorias, com exceção das categorias IOS e MNT onde não foi possível rejeitar a hipótese nula, não permitindo detectar diferenças entre os atributos. Partindo dessa análise preliminar, as comparações múltiplas possibilitadas pelo teste de Friedman permitiram também identificar entre quais atributos, cada qual em sua categoria, havia diferenças significativas ($p < 0,05$). Os resultados são compilados e apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Comparações múltiplas entre categorias de atributos⁹

<u>Atributo 1-Atributo 2</u>	Estatística de Teste	Erro Padrão	Estatística de teste Padrão	Signif.
MOD3-MOD2	2600	0,816	3184	0,001
INT3-INT2	2600	0,816	3184	0,001
INF1-INF2	-2200	0,816	-2694	0,007
PRIV_PDI-PRIV2	-2200	0,816	-2694	0,007
SEG_PDI-SEG2	2400	0,816	2939	0,003
IAML1-IAML2	-2300	0,816	-2817	0,005

Fonte: elaborado pelo autor

Feito isso, ainda outras duas análises foram realizadas: a primeira visando averiguar a existência de diferenças significativas entre os entrevistados (Tabela 7) e a segunda procurando analisar a distinção entre as configurações da PDI (Tabela 8).

⁹ Cada linha testa a hipótese nula em que as distribuições Atributo 1 e Atributo 2 são iguais. O nível de significância é 0,05 e os valores de significância foram ajustados pela correção Bonferroni para vários testes.

Tabela 7 - Diferenças Significativas entre pares de *Stakeholders*.

Stakeholder 1-Stakeholder 2	Estatística de teste	Erro Padrão	Estatística de Teste Padrão	Sig.	Adj. Sig.
DESNV-FORN_HW	-0,75	1,118	-0,671	0,502	1
DESNV-FORN_APS	-1,25	1,118	-1,118	0,264	1
DESNV-LE	-2,25	1,118	-2,012	0,044	0,442
DESNV-CNSLT	3,25	1,118	2,907	0,004	0,037
FORN_HW-FORN_APS	-0,5	1,118	-0,447	0,655	1
FORN_HW-LE	-1,5	1,118	-1,342	0,18	1
FORN_HW-CNSLT	2,5	1,118	2,236	0,025	0,253
FORN_APS-LE	-1	1,118	-0,894	0,371	1
FORN_APS-CNSLT	2	1,118	1,789	0,074	0,736
LE-CNSLT	1	1,118	0,894	0,371	1

Fonte: elaborado pelo autor

Por meio das respostas obtidas foi possível verificar que, sob o aspecto de distinção entre os entrevistados, não foi possível rejeitar a hipótese nula (H_0 , para nível de significância $p < 0,05$) para a maioria dos participantes com exceção do par ‘Desenvolvedor – Consultor’, onde suas respostas apresentaram diferenças significativas (para $p < 0,05$). Dessa forma, pode-se observar que os entrevistados apresentaram uma preferência comparativamente homogênea quanto a suas avaliações dos atributos.

Tabela 8 - Diferenças Significativas entre pares de Configurações.

Config 1-Config 2	Estatística de teste	Erro Padrão	Estatística de Teste Padrão	Sig.	Adj. Sig.
CONFIG_3-CONFIG_PDI	-,200	,816	-,245	,806	1,000
CONFIG_3-CONFIG_1	1,300	,816	1,592	,111	,668
CONFIG_3-CONFIG_2	2,500	,816	3,062	,002	,013
CONFIG_PDI-CONFIG_1	1,100	,816	1,347	,178	1,000
CONFIG_PDI-CONFIG_2	2,300	,816	2,817	,005	,029
CONFIG_1-CONFIG_2	-1,200	,816	-1,470	,142	,850

Fonte: elaborado pelo autor

Com os resultados obtidos nos testes estatísticos, não foi possível rejeitar a hipótese alternativa (H_1 , para nível de significância $p < 0,05$), de modo que se pode concluir existir diferenças significativas entre as diferentes configurações da PDI. Através das comparações múltiplas possibilitadas pelo teste de Friedman, observou-se que tais diferenças se davam entre as configurações 3 e 2 bem como entre as configurações 2 e a configuração atual da PDI.

Por fim, utilizando-se do processo de normalização dos dados apresentado na seção 3.2.4.4, foram obtidos os índices de desempenho para cada uma das configurações tecnológicas. Os resultados obtidos são: Configuração atual da PDI (0,40), configuração 1 (0,44), configuração 2 (0,67) e configuração 3 (0,41).

Assim, através das entrevistas semiestruturadas, foi possível obter avaliações e delas extrair resultados para a compreensão mais aprofundada sobre as possíveis configurações que a PDI poderia assumir. Além disso, foi possível estabelecer índices de forma a quantificar as configurações para fins de emprego no modelo de simulação. Nas etapas seguintes são descritos os resultados da elaboração dos cenários e construção do modelo de simulação.

4.3 Fase 3 - Cenários e Construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas

Com os resultados gerados na Fase 2, foram obtidos os subsídios e conhecimentos necessários para que a Fase 3 – Exploração dos Cenários – pudesse atingir seus propósitos dentro do estudo, a saber: definir os cenários e estabelecer os experimentos necessários bem como os procedimentos empregados para as análises dos resultados. Para isso, é utilizado um modelo de Dinâmica de Sistemas que, devidamente testado, permite a execução das simulações necessárias para a geração e avaliação dos resultados. As etapas aplicadas nesta fase são descritas a seguir.

4.3.1 Etapa 7 - Elaboração dos Cenários

Esta etapa inicia-se com a seleção das variáveis-chave aptas a servirem como incertezas-críticas. Seguidamente a este passo, é realizada a caracterização dos cenários e explicitados os procedimentos para as devidas análises.

A partir das variáveis-chave listadas na Tabela 5, tomando como base o índice de prioridade (IP), foram selecionadas duas variáveis para servir à construção dos cenários: *i*) **Vantagem Relativa** (44), representada pelo preço relativo entre o preço da PDI e o preço médio praticado pelos concorrentes e *ii*) **Adoção de Big Data, IIoT e Nuvem** (1), representada pela quantidade de empresas prospectadas que já possuem tais tecnologias previamente implementadas. Para tal seleção, além do Índice de Prioridade, levou-se em conta interesses estratégicos da própria empresa pesquisada e a facilidade de integração destas variáveis ao modelo de Dinâmica de Sistemas. A combinação dessas duas incertezas gerou quatro cenários plausíveis sobre os quais será avaliada a adoção da PDI em relação as configurações tecnológicas desenvolvidas na etapa anterior.

Determinadas as duas incertezas-críticas, quatro cenários (Quadro 10) foram elaborados de modo a combinar as possibilidades do futuro se desenvolver com: (i) as empresas adotando tecnologias como IIoT, *Big Data* e/ou Nuvem em uma taxa de crescimento alta ou baixa em relação à taxa de crescimento prospectada e, (ii) o preço praticado pelos concorrentes será aplicado abaixo ou acima do preço aplicado pelo provedor da PDI. Em suma, tais combinações evidenciarão uma vantagem relativa favorável ou desfavorável para o provedor da PDI.

A fim de determinar os níveis altos e baixos para as variáveis, a empresa participante contribuiu com informações previamente levantadas: considerou-se que 82 empresas na região-alvo já haviam implementado tecnologias como IIoT, *Big Data* e/ou Nuvem e outras 66 em processo de implementação. Portanto, 148 empresas como potenciais adotantes para a PDI ao longo do período de 10 anos. Além disso, o preço médio praticado pelos concorrentes foi estabelecido entre R\$ 6.970 e R\$ 11.800 anualmente através da modalidade de assinatura.

Quadro 10 - Cenários para a oferta da Tecnologia.

Tamanho do Mercado (Adoção de <i>Big Data</i> , IIoT e Nuvem)	<u>Cenário 1</u>	<u>Cenário 2</u>
	<ul style="list-style-type: none"> • Empresas adotantes de <i>Big Data</i>, IIoT e Nuvem: 148 • Preço praticado pelos concorrentes: R\$6970 	<ul style="list-style-type: none"> • Empresas adotantes de <i>Big Data</i>, IIoT e Nuvem: 148 • Preço praticado pelos concorrentes: R\$11800
	<u>Cenário 3</u>	<u>Cenário 4</u>
	<ul style="list-style-type: none"> • Empresas adotantes de <i>Big Data</i>, IIoT e Nuvem: 82 • Preço praticado pelos concorrentes: R\$6970 	<ul style="list-style-type: none"> • Empresas adotantes de <i>Big Data</i>, IIoT e Nuvem: 82 • Preço praticado pelos concorrentes: R\$11800
	Preço praticado pelos concorrentes	

Fonte: elaborado pelo autor

O cenário 1 expressa a possibilidade de que o crescimento da base de potenciais clientes seja superior àquela estimada pela empresa. Neste cenário, um aumento pela procura por implementar tecnologias da I4.0 provocada pela necessidade das empresas se manterem

eficientes levaria a tal aumento na taxa de crescimento. Além disso, os concorrentes percebendo esse aumento mais expressivo procuram ganhar mercado mais rapidamente praticando um preço inferior (R\$ 6.970) em relação ao praticado pelo provedor da PDI (R\$ 7.960), desfavorecendo a estratégia de crescimento da empresa. Quanto ao cenário 2, o crescimento da implementação de tecnologias também se dá na taxa maior que a esperada, contudo, o posicionamento dos concorrentes é o de praticar preços superiores (R\$ 11.800) ao do provedor da PDI, ainda que isso venha à custa de menor adoção de suas plataformas.

Os cenários 3 e 4 consideram apenas as empresas que já tenham implementado as tecnologias de base, entendendo que o provedor da PDI se esforçará para captar tantos clientes quanto possível, dentro de seus limites de capacidade. Isso leva em conta o fato de que a implementação de tecnologias de armazenamento de dados em nuvem sofre a relutância por muitas organizações devido a questões de segurança e privacidade de seus dados. O que diferencia ambos cenários é a estratégia de preços adotada pelos concorrentes. Se por um lado no cenário 3 o preço praticado evidencia uma estratégia de captura de clientes de forma mais agressiva, por outro lado, o cenário 4 é aquele em que os concorrentes praticam preços a um nível mais alto provavelmente esperando que esse seja um preço aceitável pelos clientes, desde que não prejudique sua expectativa de captação e, conseqüentemente suas expectativas de receita.

Ao finalizar estas etapas, tem-se até este momento o entendimento sistêmico e os cenários futuros nos quais a oferta da PDI poderá se dar. A partir dessas atividades foram obtidos os fundamentos necessários à definição dos cenários a serem explorados, os experimentos a serem executados e condições para a construção do modelo computadorizado.

4.3.2 Etapa 8 - Construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas

A etapa de modelagem inicia-se com a seleção do modelo adequado ao propósito em estudo. Tal passo é seguido da aplicação de testes e dos ajustes necessários para verificar seu adequado funcionamento. A etapa é finalizada com a realização das simulações, observando os experimentos estipulados no Apêndice D, de forma a coletar os dados necessários à análise da adoção da tecnologia nos cenários estabelecidos.

Tomando por base o modelo proposto por Morecroft (2008), algumas alterações foram empregadas de modo a refletir a realidade do sistema de adoção previsto para o caso específico deste estudo, porém sem alteração da formulação matemática ou estrutural da proposta original. O modelo (Figura 22) construído tem como principal objetivo o cálculo da quantidade de adotantes e com ele é possível alterar os seguintes parâmetros: (i) preço dos concorrentes (ii)

preço da PDI, (iii) índice de desempenho da PDI, (iv) tempo para conversão dos clientes, (v) tempo para abandono da PDI, (vi) tempo para ajustes de preço do concorrente, (vii) tamanho do mercado, além de funções gráficas como: (viii) efeito do preço relativo na taxa de conversão, (ix) efeito da reputação em adotantes potenciais, (x) efeito da reputação em adotantes e (xi) fração de adoção.

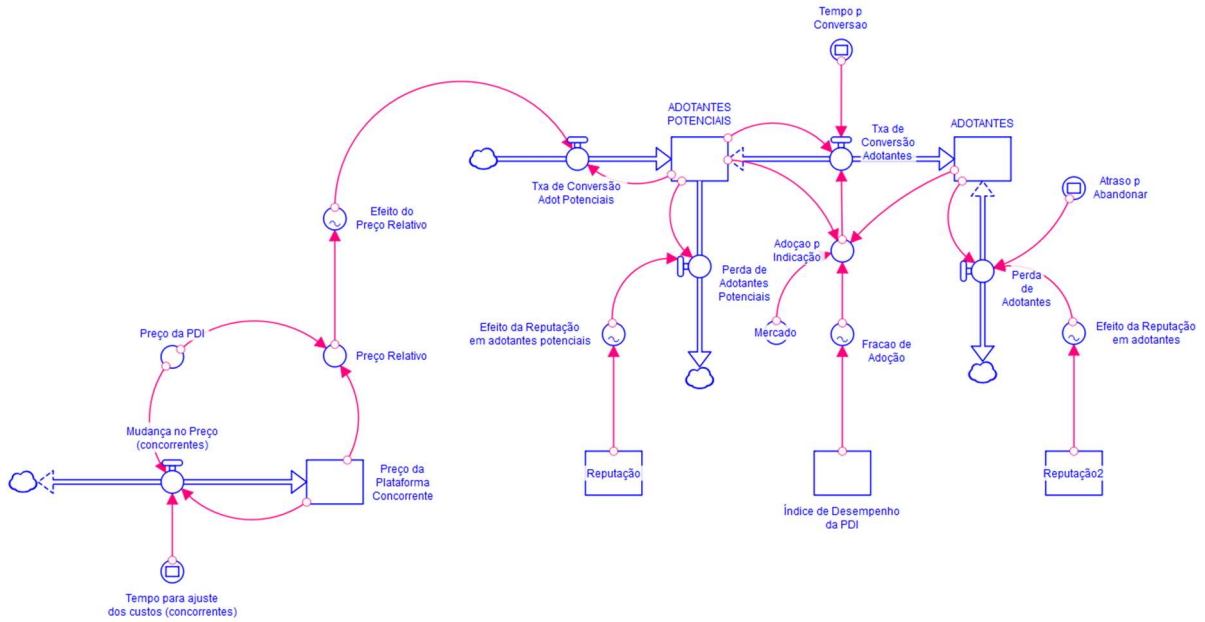


Figura 22 - Modelo de Simulação (Diagrama de Estoque e Fluxo).

Fonte: elaborado pelo autor

Foi estabelecido no modelo a presença de variáveis com comportamento estocástico, basicamente ligadas aos atrasos; variáveis as quais não foi possível estabelecer consenso da equipe de trabalho sobre os limites a serem adotados. A fim de gerar a aleatoriedade necessária, foi empregada a função RANDOM e foram aplicadas replicações para as simulações. Para este caso, o cálculo amostral foi realizado para a ANOVA (Tabela 9) por comparação entre mais de duas médias com grupos independentes com um nível de significância 0,05 e erro *Beta* (tipo II) 0,20. O tamanho da amostra foi estimado em 24, portanto foram determinadas 25 repetições como satisfatórias para obtenção da amostra requerida. As demais equações do modelo são apresentadas no Apêndice E.

Tabela 9 - Cálculo amostral para ANOVA

F tests – ANOVA: Fixed effects, omnibus, one-way		
Analysis:	A priori: Compute required sample size	
Input:		
	α err prob	= 0.05
	Power (1- β err prob)	= 0.8
	Number of groups	= 4
Output:	Noncentrality parameter λ	= 13.5000000
	Critical F	= 3.0983912
	Numerator df	= 3
	Denominator df	= 20
	Total sample size	= 24
	Actual power	= 0.8072152

Fonte: elaborado pelo autor

O modelo é sensível às configurações da tecnologia representadas no modelo pela variável ‘índice de desempenho da PDI’. Dessa maneira, o modelo foi construído para que possa ser simulado de forma a considerar as configurações estabelecidas neste estudo. Para comparar os diversos experimentos, os dados gerados no modelo foram exportados para o SPSS de forma a possibilitar a análise estatística. No entanto, se reconhece que uma interface para manipulação do STELLA auxiliaria na automação da rodada de experimentos. Considerando esta ausência, foi necessário que cada um dos experimentos fosse configurado manualmente, tarefa que seria bastante dificultada caso o número de experimentos e parâmetros fosse maior.

A fim de verificar o comportamento do modelo foram realizados dois testes, os quais evidenciaram e permitiram detectar erros, sendo corrigidos até que o modelo fosse considerado apto aos propósitos do estudo. O primeiro tipo de teste realizado foi o **teste de condição extrema**. Neste teste, valores extremos foram atribuídos a dois parâmetros selecionados: o ‘preço relativo’ e ‘tempo para abandonar’. No primeiro, o preço relativo, que se dá pela razão entre ‘preço da PDI’ e ‘preço do concorrente’ foi ajustado de forma a refletir um preço relativo nos extremos (0,10 e 2) sugerindo que o preço da PDI estaria extremamente abaixo ou acima, respectivamente, em relação ao preço praticado pelos concorrentes. O propósito principal foi o de observar se a quantidade de adotantes apresentaria o comportamento esperado mesmo sob estas condições.

Em seguida, foi utilizada a variável ‘tempo para abandonar’ sendo selecionada por apresentar grande dificuldade para a equipe em estabelecer um valor estimado adequado. Neste teste, os parâmetros foram ajustados de modo que dois extremos se apresentassem: clientes abandonarão a PDI em um curto espaço de tempo (1 ano) e na outra extremidade, clientes que permanecerão no longo prazo com a PDI (10 anos), ocupando inteiramente o escopo temporal do modelo. Igualmente como no primeiro caso, o teste foi aplicado nos quatro cenários e

novamente a variável observada foi a quantidade de adotantes. Destaca-se aqui, que neste segundo teste o parâmetro anterior avaliado (preço relativo) manteve-se em seus níveis originalmente estipulados para cada um dos cenários.

O segundo tipo de teste aplicado ao modelo foi o **teste de ajuste visual ou comparação gráfica**. Para isso, foi utilizado o próprio modelo para calcular e comparar com o que seria estimado a partir da variável ‘tamanho do mercado’. Neste caso, o escopo de tempo utilizado foi reduzido para 3 anos, esperando que as curvas e comportamento da quantidade de adotantes acompanhasse graficamente o estimado pela função.

O objetivo foi constatar se o modelo era adequado em todo seu horizonte temporal ao compará-lo com o comportamento esperado. Neste caso, apesar da ausência de dados históricos impossibilitar a comparação quantitativa, saber-se-ia que ao menos estruturalmente o modelo estaria aderente ao comportamento preconizado na teoria de difusão de inovação (DOI) apresentada no capítulo 2. As características utilizadas para a comparação seguiram o critério de que os formatos de ambas curvas deveriam ser semelhantes em seus aspectos de inclinação ao longo do tempo, de forma a apresentar magnitudes semelhantes. Com base nos testes (apresentados no Apêndice I – Testes do Modelo de Simulação), o modelo foi considerado adequado para seu propósito dentro do estudo.

Para a exploração do modelo foi realizada uma reunião que durou em torno de duas horas onde foram lembradas as funções e propósitos do modelo bem como a caracterização dos cenários elaborados. Neste exercício ficou determinado que os participantes poderiam alterar os parâmetros que desejassem desde que isso ocorresse dentro dos quatro cenários estabelecidos no estudo, considerando os valores limites definidores de cada um deles. Em seguida foi solicitado que o modelo fosse rodado e os resultados analisados.

Concluída a definição dos experimentos, os parâmetros foram ajustados no STELLA a cada experimento. Após todos experimentos rodados, os dados foram transferidos para o SPSS para análise posterior. Ao total, foram realizadas 400 simulações (sendo 16 experimentos com 25 simulações cada, com duração média de 6 segundos) totalizando 42 minutos.

Modelos de Dinâmica de Sistemas promovem benefícios que complementam as análises anteriores. A modelagem de Dinâmica de Sistemas por sua própria natureza olha para a mudança ao longo do tempo, o que não é possível com a CIA ou CLD. O modelo de Dinâmica de Sistemas aqui apresentado está limitado a 23 das 77 variáveis inicialmente identificadas. Sua estrutura é genérica o suficiente para que possa ser estendido a demais contextos tecnológicos e a interface proposta é útil o suficiente para que profissionais de desenvolvimento e tomadores de decisão para explorem cenários, variáveis e suas interações.

A limitação fundamental da abordagem, no entanto, é que a construção de modelos de Dinâmica de Sistemas é demorada, pois, exige que análises detalhadas sejam realizadas *a priori* sobre os problemas que estão sendo abordados. A Análise de Impacto Cruzado é exemplo dessas análises. Por isso, tais abordagens devem ser considerados como duas etapas complementares (*soft e hard*) na modelagem da complexidade de adoção de tecnologias.

Além destas limitações, ao desenvolver o modelo foram percebidas: a (i) necessidade de se estabelecer corretamente as relações entre as variáveis e em que grau estas relações se dão e a (ii) possibilidade de utilizar técnicas adequadas de Projetos de Experimentos. Dito isto, uma vez que tanto a análise qualitativa quanto a quantitativa podem ter importantes contribuições para o sucesso de estudos de Dinâmica de Sistemas, considerou-se importante sequenciar o processo de aplicação do método para capturar ambas as abordagens. Na prática, o processo aqui apresentado é iterativo e interdependente em cada uma das etapas.

Realizados os testes do modelo, a atividade seguinte consistiu na simulação dos experimentos gerando dados de saída para posterior análise. Assim, concluiu-se a construção do modelo de Dinâmica de Sistemas, a última etapa do método proposto. A próxima seção apresenta as análises geradas através da aplicação do modelo.

4.4 Análise dos Resultados

As seções seguintes apresentam as discussões desenvolvidas a partir da análise dos resultados, especificando as perspectivas de mercado para a plataforma estudada e considerações sobre o modelo empregado.

Considerando cada um dos cenários, os quatro primeiros experimentos simularam a realidade futura da adoção da tecnologia baseando-se na configuração atual da PDI. Os experimentos de 5 a 8 simularam o exercício da primeira configuração da tecnologia, enquanto os experimentos de 9 a 12 simularam o exercício da segunda configuração. Por fim, os experimentos de 13 a 16 simularam a terceira configuração.

De acordo com o entendimento de Morandi (2017), se as incertezas-críticas forem significativas no sentido de gerar futuros alternativos diferentes entre si, os resultados do modelo nos diferentes cenários devem ser significativamente distintos. Neste estudo foram selecionadas duas incertezas-críticas (preço relativo e tamanho do mercado) de forma que, mantendo-se a primeira incerteza constante e variando-se a segunda, espera-se que o experimento apresente resultados diferentes entre si, caso contrário, a incerteza variada não é capaz de produzir cenários distintos entre si.

A fim de analisar a diferença entre os cenários, foram definidos 2 grupos de cenários a serem comparados pareadamente, essa definição segue a lógica descrita anteriormente. Por exemplo, os cenários 1 e 3 se diferenciam pelo tamanho do mercado enquanto o preço dos concorrentes, em ambos cenários, está no nível baixo. Para a realização da análise, optou-se por utilizar os experimentos de 1 a 4, utilizando a configuração atual da PDI. A fim de confirmar se as diferenças entre os resultados dos cenários são estatisticamente significativas, foi realizada a análise de variância. O resumo dos resultados é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Análise Comparativa entre os Cenários

Grupo	Incerteza Crítica Avaliada	Cenários Comparados / Quantidade de Adotantes (média)		Diferença Média	Sig.	Intervalo de Confiança 95%	
						IC Inferior	IC Superior
1	Preço Relativo	Cenário 1 x Cenário 2		-5,730	0,009	-7,93	-3,53
		5,35	11,08				
		Cenário 3 x Cenário 4		-1,216	,021	-2,04	-,39
		2,41	3,62				
2	Crescimento do mercado	Cenário 1 x Cenário 3		2,946	,003	1,90	3,99
		5,35	2,41				
		Cenário 2 x Cenário 4		7,459	<,001	5,34	9,57
		11,08	3,62				

*testes *post hoc* de comparações múltiplas Games-Howell

** A diferença média é significativa no nível 0,05.

Fonte: elaborado pelo autor

Cabe ressaltar que ao se executar a ANOVA, o pressuposto de normalidade foi atendido como demonstrado nos testes de Shapiro-Wilk na Tabela 11 (H_0 , os dados são normais se $p > 0,05$). Não sendo possível rejeitar a hipótese nula, assume-se que os dados seguem uma distribuição normal.

Tabela 11 - Testes de Normalidade dos Dados

Config_PDI	Kolmogorov-Smirnov ^a				Shapiro-Wilk		
	Cenário	F	gl	Sig.	Estatística	gl	Sig.
1	,103	37	,200*	,947	37	,076	
2	,088	37	,200*	,953	37	,123	
3	,118	37	,200*	,926	37	,067	
4	,098	37	,200*	,948	37	,082	

*. Este é um limite inferior da significância verdadeira.

Fonte: elaborado pelo autor

Contudo, através do teste de Levene (Tabela 12) se reconhece não ser possível rejeitar a hipótese alternativa (H_1 , as variâncias dos grupos não são homogêneas se $p \leq 0,05$), assumindo, portanto, que os dados não atendem ao pressuposto de homogeneidade.

Tabela 12 - Testes de homogeneidade de variâncias

		Estadística de Levene	df1	df2	Sig.
Config_PDI	Com base na média	41,981	3	144	,002
	Com base na mediana	38,824	3	144	,001

Fonte: elaborado pelo autor

Observando os resultados, pode-se concluir que as incertezas críticas e seus parâmetros selecionados constituem cenários significativamente diferentes entre si. A ANOVA de uma via de Welch mostrou que há pelo menos uma diferença significativa entre os cenários [$F(3, 75,567) = 53,852; p < 0,001$] como demonstrado na Tabela 13. Sabendo que há diferenças significativas entre os cenários, é realizado o teste para comparações múltiplas de Games-Howell para saber entre quais cenários essas diferenças efetivamente se dão.

Tabela 13 - ANOVA de uma via (Teste de Welch)

Estadística ¹⁰		df1	df2	Sig.
Welch	53,852	3	75,567	< ,001

Fonte: elaborado pelo autor

Observando novamente os dados da Tabela 10, os resultados demonstraram que o cenário 2 apresenta diferença média superior na quantidade de adotantes em relação aos cenários 1 (5,730) e 4 (7,459). Já o cenário 3 apresenta resultados inferiores quando comparado aos cenários 4 (-1,216) e 1 (-2,946). Assim, com os resultados obtidos, conclui-se que os níveis selecionados para representar o preço relativo e a taxa de crescimento do mercado efetivamente conduzem a cenários distintos. Além disso, os resultados permitem evidenciar que o cenário 2 é aquele que fornece uma maior vantagem estratégica para a empresa enquanto que o cenário 3

¹⁰ F distribuído assintoticamente

é aquele que se mostra desvantajoso. Como as incertezas selecionadas de fato geram cenários diferentes entre si, pode-se prosseguir às análises fazendo uso de todos os quatro cenários elaborados para este estudo.

Em continuidade, aplicando o conceito de robustez (MORANDI, 2017) à análise das configurações, é avaliada a capacidade de uma determinada configuração gerar adotantes ser superior aos resultados calculados na configuração atual da PDI (base) para o maior número de cenários possível. Para isso, estimou-se a quantidade base de adotantes utilizando o próprio modelo, uma vez que estes valores eram desconhecidos da empresa, nem havia uma metodologia estabelecida para tal cálculo. A Tabela 14 apresenta os resultados descritivos de cada uma das configurações (descontando os resultados da configuração atual da PDI) dentro dos cenários, permitindo demonstrar e discutir a robustez das configurações tecnológicas.

Tabela 14 - Diferenças em relação à configuração atual da PDI

Configuração da tecnologia	Cenário	Média	Desvio Padrão	Intervalo de Confiança de 95%	
				IC Superior	IC Inferior
Configuração 1	Cenário 1	2,22	0,976	1,89	2,54
	Cenário 2	4,95	2,333	4,17	5,72
	Cenário 3	0,49	0,507	0,32	0,66
	Cenário 4	1,19	0,616	0,98	1,39
Configuração 2	Cenário 1	33,19	12,458	29,04	37,34
	Cenário 2	52,05	20,229	45,31	58,80
	Cenário 3	11,16	4,113	9,79	12,53
	Cenário 4	20,24	7,868	17,62	22,87
Configuração 3	Cenário 1	0,46	0,505	0,29	0,63
	Cenário 2	1,27	0,652	1,05	1,49
	Cenário 3	0,08	0,277	-0,01	0,17
	Cenário 4	0,30	0,463	0,14	0,45

Fonte: elaborado pelo autor

Analisando os dados é possível verificar que a configuração 2 é mais robusta do que as configurações 1 e 3, uma vez que a quantidade de adotantes (média) é superior em todos os cenários. Quando comparadas apenas as configurações 1 e 3, nota-se que, considerando um mesmo cenário, a configuração 1 é sempre superior. No entanto, existem casos onde a configuração 3, caso ocorra no cenário 2, é superior à configuração 1 ocorrendo nos cenários 3 ou 4. Tal conclusão pode ser facilitada pela análise gráfica (Figura 23), onde se compara os valores obtidos da configuração atual da PDI com os valores das demais configurações, permitindo observar quais intervalos de confiança se mostram superiores.

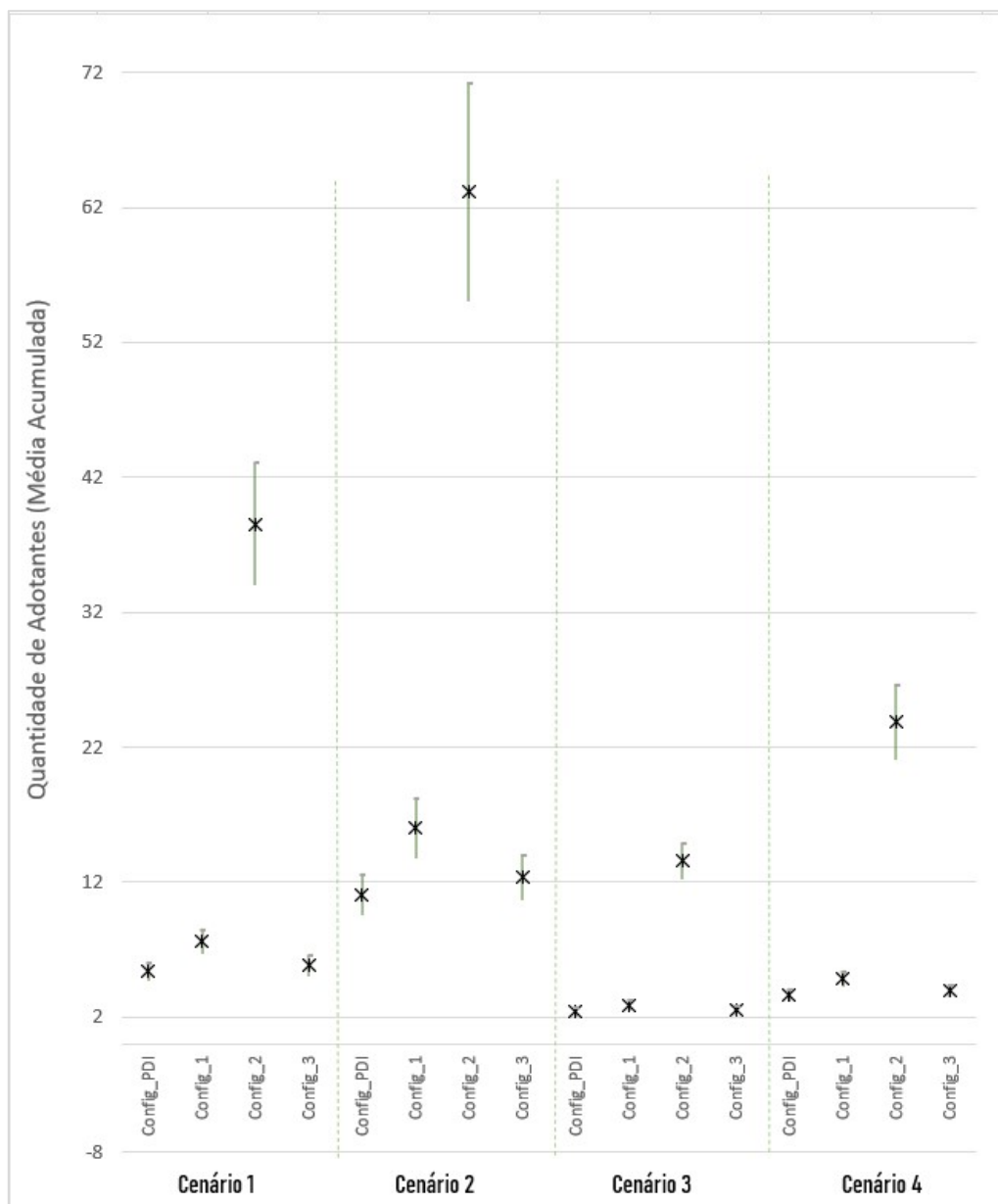


Figura 23 - Intervalos de confiança das Configurações Tecnológicas.

Fonte: elaborado pelo autor

Percebe-se que os valores da configuração atual se encontram entre os intervalos de confiança da quantidade de adotantes da configuração 3 para todos os cenários.

O fato de a configuração 2 ser mais robusta e de apresentar a quantidade de adotantes superior ao da configuração atual da PDI em todos os cenários, a torna a alternativa incontestável para a empresa. Nesta configuração, o maior resultado encontrado é quando for empregada na ocasião de ocorrer o cenário 2. Quanto à configuração 1, mesmo não apresentando a mesma robustez, ela também apresenta resultados superiores à configuração atual em todos os cenários, com exceção ao cenário 3. Alinhado com a análise anterior, percebe-se que a configuração 1 é superior à configuração 3, no entanto, seus intervalos de

confiança se sobrepõem em todos os cenários. Com isso, sugere-se aos decisores que utilizem outros critérios para diferenciá-las caso optem por implementar alguns de seus atributos no desenvolvimento da plataforma.

Por fim, com os resultados obtidos também é possível comparar o número de adotantes de uma dada configuração nos diferentes cenários, permitindo avaliar se há diferenças entre o valor adicional gerado em relação à configuração atual. O objetivo é identificar a configuração da tecnologia que traz maior retorno em cada um dos cenários.

Novamente, inicia-se a análise pela comparação dos valores médios verificando se há diferenças estatisticamente significativas empregando a ANOVA de Welch. O resumo dos resultados desta análise é apresentado na Tabela 15. Neste caso, a análise foi feita somente sobre a quantidade de adotantes sem descontar a quantidade de adotantes da configuração atual.

Tabela 15 - Análise Comparativa das Configurações da Tecnologia

Cenário	Config 1	Config 2	Config 3	F	p-valor	F crítico
Cenário 1	7,567	38,540	5,810811	84,598	0,012	2,0587
Cenário 2	16,02	63,135	12,35135	78,773	<0,001	2,0587
Cenário 3	2,891	13,567	2,486486	80,040	0,042	2,0587
Cenário 4	4,810	23,864	3,918919	82,297	0,018	2,0587

Fonte: elaborado pelo autor

Pela análise dos valores médios, é possível verificar em qual cenário a configuração da tecnologia adiciona mais valor. Por exemplo, a configuração 3 adiciona mais valor no cenário 1 do que no cenário 3. Por meio da análise comparativa pode-se afirmar, por exemplo, que a configuração 2 é a melhor dentre todas. Tal premissa se apoia no fato de a análise ter apontado que a configuração 2 apresenta resultados superiores às demais em todos os cenários, além dela ser também a mais robusta.

Sob o ponto de vista dos cenários, o cenário 2 é aquele em que todas as configurações têm o melhor desempenho em termos de adoção. Ela é seguida pelo cenário 1, onde são obtidos resultados intermediários. Já os cenários 3 e 4 apresentam resultados considerados próximos entre si e inferiores aos demais, encontrando-se neles as menores quantidade de adotantes para a tecnologia.

Tomando como base apenas a configuração 2, a ANOVA de uma via de Welch mostrou que há efeito das configurações sobre a quantidade de adotantes [$F(3, 69,547) = 89,225; p < 0,001$] nos quatro cenários considerados. O teste para comparações múltiplas de Games-Howell mostrou que as maiores diferenças médias entre a quantidade de adotantes se dão na

comparação do cenário 2 para com os cenários 3 e 4, enquanto que as menores diferenças se dão entre o cenário 4 e os cenários 3 e 1, nesta ordem. Tais resultados (Tabela 16) confirmam que efetivamente há diferença entre os quantidade de adotantes gerados nos diferentes cenários. Nesse caso, o valor-*p* é inferior a 0,05 para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 16 - Comparação entre Diferenças médias da Configuração 2

(I) Cenário	Cenário (J)	Diferença média (I-J)	Erro Padrão	Sig.	Intervalo de Confiança 95%	
					IC inferior	IC superior
1	2	-24,595	4,599	0,017	-36,77	-12,42
	3	24,973	2,354	0,014	18,68	31,27
	4	14,676	2,645	0,023	7,68	21,67
2	1	24,595	4,599	0,017	12,42	36,77
	3	49,568	4,060	<001	38,66	60,48
	4	39,270	4,236	<001	27,96	50,58
3	1	-24,973	2,354	0,014	-31,27	-18,68
	2	-49,568	4,060	<001	-60,48	-38,66
	4	-10,297	1,526	0,042	-14,35	-6,25
4	1	-14,676	2,645	0,023	-21,67	-7,68
	2	-39,270	4,236	<001	-50,58	-27,96
	3	10,297	1,526	0,042	6,25	14,35

Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 24 apresenta o desempenho da configuração 2 nos diferentes cenários, confirmando os resultados obtidos na ANOVA e facilitando a interpretação.

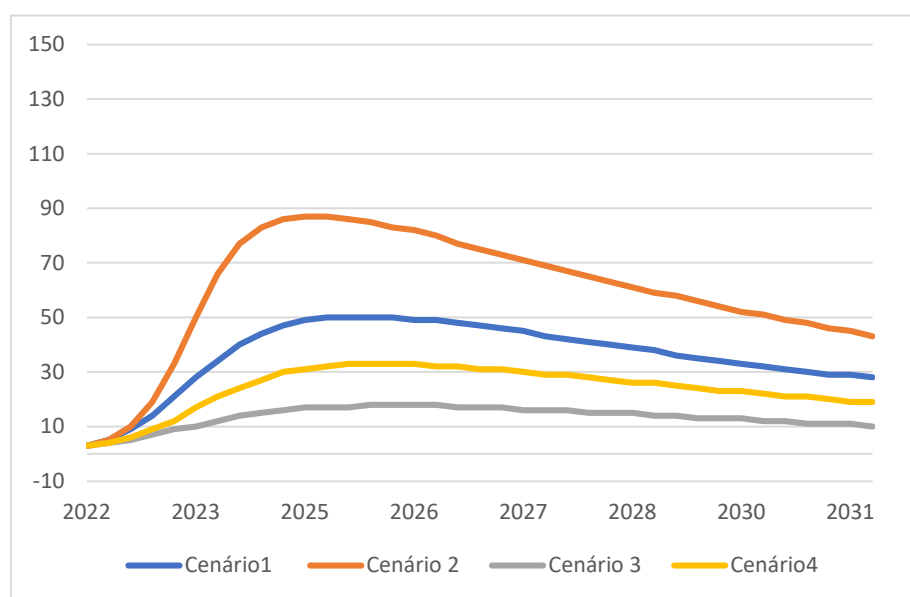


Figura 24 - Quantidade de Adotantes acumulados (Configuração 2).

Fonte: elaborado pelo autor

Dos resultados obtidos pode-se concluir que as diferenças se dão tanto pela influência dos cenários quanto pela configuração que está sendo considerada. Cabendo à empresa selecionar a melhor configuração para sua tecnologia, a configuração 2 se mostrou efetivamente como a melhor opção. Se não for possível agregar todos os atributos presentes nesta configuração, a empresa deve focar seus esforços em ao menos agregar aqueles atributos que se mostraram mais relevantes a partir das informações obtidas com os *stakeholders*.

Para finalizar a aplicação, uma reunião final de 1h e 30 minutos foi realizada com a equipe de trabalho visando reportar os resultados finais e capacitar alterações e aplicações futuras do modelo. Nesta ocasião, as análises foram apresentadas e foram abordados tópicos sobre funcionalidade do modelo.

Esta seção procurou apresentar as atividades realizadas para aplicação proposta nesta pesquisa. É possível observar que poucas foram as divergências entre o método proposto e o que foi efetivamente aplicado. As perspectivas de mercado e considerações sobre a aplicação do modelo desenvolvido são discutidas nas seções seguintes.

4.4.1 Perspectivas de Mercado para a PDI

Por meio das discussões realizadas com a empresa e com os *stakeholders*, fundamentadas por uma vasta literatura, diversos aprendizados valem ser registrados. Uma das lições aprendidas é que, a integração das soluções de terceiros fornecidas por complementadores nas operações e processos dos clientes cria um conjunto diversificado de atores no entorno da plataforma digital. Essa foi uma visão comum entre os entrevistados. A interoperabilidade dos sistemas desempenha um papel importante na implementação de tecnologias semelhantes a PDI, conforme o seguinte comentário: “Os mesmos problemas podem ser encontrados em quase todos os sistemas e infraestruturas de TI: que língua fala e como podemos integrá-la aos demais sistemas da fábrica?” (E3)

Ser atraente para diferentes atores é uma questão central a ser considerada, pois os ecossistemas de plataforma são caracterizados por relacionamentos horizontais, sem controle hierárquico, onde os *stakeholders* possuem a liberdade de escolha entre diferentes plataformas ou soluções. Assim, os proprietários da plataforma precisam garantir que as necessidades desses atores sejam consideradas em termos de distribuição de valor em todo o ecossistema. Em um ecossistema heterogêneo, como no caso da PDI deste estudo, isso é ainda mais crítico pois diferentes tipos de complementadores podem variar consideravelmente em suas contribuições e necessidades de criação e captura de valor.

Nesta proposta, procurou-se integrar aos processos de negócios da empresa, procedimentos estruturados e iterativos para combinar as expectativas do cliente com a proposta de valor tecnológica fornecido pela PDI para criação de valor no ecossistema de atuação. Esses procedimentos visam evitar que a empresa enfatize demais as capacidades técnicas de sua oferta digital, em vez de obter um entendimento profundo das necessidades do cliente. Como um *stakeholder* relacionado à implementação de sensores explicou: “...durante o processo de inovação de nossos sensores, reconhecemos que nossos clientes desejavam ter em mãos a visualização de dados, nem que fosse de apenas um dos parâmetros. Assim, com apenas um computador portátil e uma pequena parceria com desenvolvedores de interface de usuário gerou valor suficiente para aquele cliente...era importante para nós obtermos percepções sobre as necessidades do cliente e sobre os recursos digitais importantes para ele”.

O aumento da complexidade nos processos produtivos é outro aspecto que deve ser levado em consideração ao projetar soluções digitais industriais. Segundo um entrevistado envolvido (E1) com consultoria: “Os clientes poderão intervir e personalizar seus produtos durante o projeto, fabricação e montagem incorporando também mudanças de última hora, essas mudanças podem representar problemas para a produção”.

Algumas percepções específicas sobre necessidade das equipes de manutenção também puderam ser obtidas. No que diz respeito a carga de trabalho da manutenção para um dos entrevistados (E4), “os departamentos de manutenção geralmente estão ocupados consertando máquinas...eles não têm tempo para melhorar o desempenho do processo de manutenção dentro do sistema de produção...a implementação um de processo ‘inteligente’ de manutenção implica várias alterações, em geral positivas, à manutenção. Para outro participante (E2) ... “a principal consequência é que o departamento de manutenção não fica sobrecarregado com tarefas repetitivas, podendo realizar a manutenção de modo mais eficaz. Em segundo lugar, no longo prazo, a manutenção inteligente reduzirá o custo do ciclo de vida das máquinas”.

Por fim, o aspecto mais preocupante para a maioria dos entrevistados diz respeito a segurança e privacidade dos dados. Segundo um entrevistado (E1) ... “por conta disso (cibersegurança) ainda tem existido obstáculos na implementação de muitas tecnologias criadas na indústria, pelo fato de os sistemas industriais serem a essência dentro da fábrica e, se ocorrer um ataque cibernético, serão o ponto de maior impacto” ... “diversos ativos espalhados pela fábrica estão interligados e se comunicando com uma central, responsável por analisar e coletar dados gerados a cada segundo”.

Como outro participante atuante no desenvolvimento de aplicações industriais (E3) pontua: “Assim, por estar lidando com uma enorme circulação de dados, irá requerer da

indústria uma infraestrutura que suporte ainda mais os efeitos que tecnologias como essa (PDI) trarão, para que não haja uma vulnerabilidade das informações sigilosas daquele negócio. O problema da segurança de TI não está apenas no roubo das informações, mas também no abalo decorrente das invasões cibernéticas, que não se limitarão a um único dispositivo, mas a toda a cadeia de produção”. Por fim, outro participante (E5) resume ... “a segurança dos dados envolve, ainda, processos e conscientização dos profissionais. Entre os pilares de proteção, o elo mais fraco é a falta de conscientização das pessoas”.

Um fator bastante discutido com a empresa é que a heterogeneidade técnica exigida para uma solução como a PDI leva a um foco em soluções baseadas em projetos específicos de cada cliente, ao invés de ofertas genéricas e recorrentes. Como o objetivo da PDI é tornar sua proposta de valor mais homogênea através dos atributos identificados, ainda que opere em um ambiente onde as soluções tendem a ser altamente particulares, a inovação por complementadores estará sujeita a mais controle por parte do provedor da plataforma e a requisitos específicos do cliente. Equilibrar esses interesses é um desafio importante para os provedores de tecnologias semelhantes a plataforma digital abordada nesta pesquisa.

4.4.2 Considerações sobre a aplicação do Modelo

A partir do modelo implementado na empresa em estudo é possível realizar algumas discussões sobre o modelo de trabalho empregado. De maneira geral, percebe-se que a aplicação conseguiu atingir o seu propósito inicial de **analisar uma plataforma digital industrial a partir da identificação das incertezas relacionadas à sua adoção**. Com o processo utilizado, foi possível avaliar as incertezas as quais a empresa está exposta, sendo possível quantificá-las e avaliá-las dentro de cenários para seu mercado de atuação.

Além disso, também foi possível gerar um indicador para analisar as diferenças entre a configuração tecnológica atual e futuras configurações desejadas pelo provedor da plataforma, possibilitando orientações para a tomada de decisão em acordo com atributos da tecnologia.

Faz-se necessário destacar alguns apontamentos relevantes percebidos em cada fase da aplicação. Na Fase 1, a proposta do modelo se desenvolveu em duas etapas: definição do problema de estudo e levantamento de informações a partir da literatura para estruturar as relações dentro do sistema estudado. As duas etapas foram desenvolvidas sem maiores dificuldades destacando-se, contudo, que no caso da bibliografia, houve restrição a apenas uma base de dados como já mencionado. Optou-se também por repassar os tópicos e artigos julgados como mais relevantes para os demais membros da equipe de trabalho a fim de dar um suporte maior às fases seguintes.

Na Fase 2, chamada de Construção do Modelo de Estudo de Caso, as quatro etapas previstas foram efetivamente concluídas. A etapa 3, Emprego do Pensamento Sistêmico foi realizada conforme o planejado. Destaca-se que foram identificadas ao todo 77 variáveis divididas em 5 dimensões, sendo que destas, 23 foram classificadas de acordo com suas funções no sistema. Isto mostra que esta etapa foi essencial para a consolidação das incertezas importantes para o sistema, ampliando o aprendizado organizacional a respeito do mercado da tecnologia.

A Etapa 4 decorreu conforme o previsto de modo que o conhecimento sobre a linguagem sistêmica foi assimilado pelos participantes e devidamente empregado para a construção do CLD. Neste caso, foi definido que a caracterização dos ciclos de *feedback*, deveria ser postergada para quando fosse desenvolvido o modelo revisado do CLD, na última etapa desta fase. O CLD foi considerado de vital importância para a compreensão do relacionamento entre as variáveis listadas na etapa anterior. Ao longo do processo, outras poucas variáveis ainda foram agregadas ao CLD, evidenciando o caráter iterativo da ferramenta.

A etapa seguinte consistiu na execução da Análise de Impacto. Apesar de os resultados obtidos nesta etapa serem considerados como satisfatórios, notou-se certa dificuldade por conta dos participantes na atribuição de valores para as relações: na dimensão temporal, percebeu-se que os valores mais altos, considerando a escala utilizada, se configuravam em certa dificuldade em traduzir a concepção dos intervalos de tempo (curto, médio e longo prazo). Ficou então definido que, em futuras atualizações, a escala deveria ser reduzida de 10 para 7 anos e ocorreria a redefinição dos intervalos de tempo. Já no quesito impacto, os participantes sugeriam a ampliação de 3 para 5 o valor máximo possível, tal modificação pretende ampliar a diferenciação entre os graus de impacto de forma a facilitar a avaliação das relações. A redução dos valores de tempo e aumento dos valores de impacto também trariam o benefício de reduzir a distorção decorrente quando escalas de valores estão muito distantes entre si.

Durante a aplicação da sexta etapa, nenhuma dificuldade foi reportada pelos *stakeholders* quanto à avaliação das configurações. Tal processo provavelmente foi facilitado pelas explicações despendidas ao início de cada entrevista, pormenorizando os objetivos da avaliação. Relata-se que um entrevistado fez sugestões para substituição de dois atributos: um na categoria interoperabilidade e outro na categoria privacidade, não sendo modificado nesta presente ocasião a fim de não prejudicar as avaliações já realizadas, contudo sendo listada para atualizações futuras. Ainda, o processo de atribuição do índice de desempenho a cada configuração foi considerado como uma maneira eficiente de se traduzir os atributos componentes de cada configuração, transformando a avaliação dos *stakeholders* em um índice

incorporável ao modelo computadorizado. Sugere-se aqui, experimentar em atualizações futuras outras formas de normalização dos dados, a fim de observar o comportamento das simulações.

Na Fase 3, Exploração dos Cenários, o objetivo foi gerar futuros alternativos no qual a oferta da tecnologia se daria. Para isto, duas etapas foram propostas e aplicadas. Na primeira foram elaborados os cenários por meio de suas caracterizações e experimentos estipulados para as simulações. Na segunda, foi realizada a construção do modelo de simulação por meio da seleção, testagem e avaliação dos resultados.

Quanto à definição dos cenários, a tarefa foi parcialmente atingida, pois, para a seleção das incertezas-críticas, fez-se necessário que a ordem apresentada pelo Índice de Prioridade (IP) fosse em parte desconsiderada. Caso fosse mantida a ordem, o processo de incorporação de tais variáveis ao modelo geraria um enorme esforço de modificações, tanto estrutural como de modelagem matemática. Ademais, as variáveis selecionadas para incertezas-críticas foram selecionadas devido sua relevância para a estratégia da empresa pesquisada. A definição dos experimentos transcorreu conforme mencionado no capítulo 3 desta pesquisa.

Quanto à etapa de Construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas, houvesse o modelo sido construído originalmente para o sistema em estudo, seria possível a integração com maior facilidade, por exemplo, de variáveis de intervenção e de monitoramento de forma a expandir as possibilidades de exploração do modelo. Portanto, reconhece-se que a utilização de um modelo previamente projetado para outra finalidade limita a flexibilidade para exploração de muitas das variáveis identificadas nas etapas anteriores do método. Além disso, percebe-se que o fato de não haver uma prévia coleta de dados históricos limita muitos dos testes e validações do modelo, contudo, recomenda-se que à medida que o modelo for sendo utilizado uma série temporal poderá ser agregada a um banco de dados para posterior ajuste ao modelo. Por fim, no quesito análise dos dados, foi possível realizar todas as análises conforme o previsto.

Quanto à questão de facilidade de uso, o aspecto mais relevante destacado pelos sócios-gestores da empresa é a necessidade de uma interface que facilite a execução das simulações bem como a transposição dos dados entre um *software* e outro. O modelo nesse aspecto ficou carente de uma maior automação para facilitar a geração e visualização dos resultados, ficando neste estágio, dependente de processamento manual.

Após a aplicação completa, foi possível concluir que o modelo gerado permite efetivamente identificar as incertezas-críticas ao mercado da empresa que, sob a perspectiva de cenários, geram subsídios adequados para apoiar a tomada de decisão. Ressalta-se que, por ter sido aplicado somente em um ator do ecossistema, o método utilizado deverá ser novamente

aplicado em outras empresas e outros contextos tecnológicos. Segundo os participantes envolvidos na aplicação prática, o modelo satisfaz as expectativas da empresa participante, afirmando que o mesmo possui alta capacidade de alterar e aprofundar as percepções iniciais sobre o mercado, ciclos de *feedback* e cenários de maior impacto para o negócio.

A aplicação se deu em pouco mais de 3 meses de trabalho, sendo fundamental a participação dos sócios-gestores da empresa. Ao longo desse período, muitas informações foram necessárias, indicando que há uma dependência consideravelmente grande do modelo à qualidade das informações levantadas em cada etapa. Pode-se concluir que o modelo é adequado para empresas que não possuam uma base de dados estruturada de modo a fornecer com fidelidade os dados necessários para a análises demonstradas nesta pesquisa. Entretanto, destaca-se que apesar de a empresa pesquisada não empregar nenhum método para identificação de incertezas ou gestão de riscos, ainda assim, foi possível iniciar este processo através do Pensamento Sistêmico e do CLD, alcançando um resultado satisfatório. Destaca-se que a empresa em estudo estava na fase de atualização do seu modelo de negócios, e isto acabou favorecendo as discussões geradas a partir da aplicação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo final apresenta as conclusões desta pesquisa, avaliando o atendimento aos objetivos propostos e apresentando sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros. Este trabalho teve como objetivo principal analisar uma plataforma digital industrial a partir da identificação das incertezas relacionadas à sua adoção, permitindo vincular diferentes configurações tecnológicas ao sucesso de aceitação. Para isso foram aplicadas diversas ferramentas e métodos relacionados à abordagem de Dinâmica de Sistemas a fim de prover recursos para aprimoramento da tomada de decisões.

A estruturação formal de todas as etapas necessárias para a avaliação da quantidade de adotantes de uma tecnologia passou pelas fases de identificação do problema, construção de um modelo para o estudo de caso e, em seguida, a exploração dos resultados por meio de um modelo de Dinâmica de Sistemas para subsidio da análise dos cenários elaborados para o estudo. Pode-se atestar que a pesquisa atendeu devidamente ao problema de estudo a que se propôs resolver: **identificar fatores que influenciam o potencial de adoção de uma tecnologia emergente na forma de uma Plataforma Digital Industrial.**

A proposta elaborada foi aplicada no contexto de uma empresa emergente do segmento de análise preditiva para manutenção industrial. Entende-se que os resultados qualitativos e quantitativos em conjunto e as análises possibilitadas pela aplicação foram satisfatórios, permitindo concluir que se obteve a resposta ao problema desta pesquisa e atendimento ao objetivo geral, sendo capaz de gerar entendimento sobre a quantidade de adotantes da Plataforma.

Relativamente ao objetivo principal do trabalho, a proposta ocorreu com sucesso na empresa, sendo possível validá-la enquanto metodologia de avaliação de incertezas em contexto de tecnologias emergentes. Ademais, três objetivos específicos haviam sido propostos. O primeiro tinha o intuito de identificar os fatores relevantes para os clientes-alvo e, com isso, examinar eventuais diferenças existentes entre o serviço por eles desejado e o posicionamento projetado pelo provedor da plataforma, sendo este atendido tanto pelo CLD elaborado quanto pelas avaliações e comparações entre as diferentes configurações tecnológicas. Neste sentido, as entrevistas semiestruturadas forneceram elementos importantes, permitindo que o objetivo tenha sido alcançado de forma plena.

O segundo objetivo específico consistia em desenvolver um modelo computacional utilizando a abordagem de Dinâmica de Sistemas de forma a avaliar o impacto de diferentes cenários sobre a aceitação da plataforma. Aqui, pode-se constatar que a utilização em

conjunto das ferramentas selecionadas possibilitou a construção do modelo para simulação, e este, apesar de suas limitações de adaptação e formulação matemática, permitiu combinar as incertezas-críticas (explicitadas na forma de cenários) com diferentes configurações tecnológicas, fornecendo resultados capazes de apoiar os tomadores de decisão.

Por fim, o último objetivo específico foi a aplicação integral do Método de Trabalho a fim de verificar sua contribuição para o processo decisório sobre tecnologias emergentes. Aqui, ficou bastante clara a interdependência entre as diversas etapas empregadas, de modo que uma pequena divergência ou omissão nas etapas iniciais influenciará grandemente nos pressupostos para as etapas subsequentes. Em outras palavras, isoladamente cada uma das ferramentas utilizadas se mostrou prática, porém quando utilizadas em conjunto suas aplicações devem ser realizadas com cautela sob a pena de se induzir à direcionamentos equivocados. Contudo, o aprendizado gerado das revisões literárias, CLD, CIA e entrevistas realizadas com os participantes, forneceram subsídios para afirmar que o conhecimento sistêmico sobre o mercado de aplicação da tecnologia de plataformas digitais foi efetivamente ampliado para a empresa pesquisada. Com essas considerações, define-se que o último objetivo específico ocorreu de forma parcial.

Posto isto, conclui-se que o trabalho foi validado de forma efetiva, destacando algumas contribuições do mesmo, entre elas: *(i)* estruturação das variáveis presentes no sistema, discutindo suas ligações com a variável observada, neste caso a quantidade de adotantes da PDI; *(ii)* capacitação dos participantes, estruturando o Pensamento Sistêmico como suporte ao processo de análise sistêmica e outras análises que porventura sejam incorporadas à gestão da empresa; *(iii)* estruturação do processo de análise do desempenho da tecnologia integrando-o a um modelo de Dinâmica de Sistemas e; *(iv)* melhoria contínua do processo através da possibilidade de retroalimentação proporcionada pelas ferramentas e métodos e utilizados.

Este estudo permitiu percorrer uma trajetória que se iniciou com o Pensamento Sistêmico, desenvolvimento de Diagramas de Enlace Causal seguidos da avaliação por meio da Análise de Impacto terminando na avaliação por meio do modelo computadorizado para subsidiar a análise de cenários, de modo que ele não só materializa o aprendizado como permite sua constante evolução. Assim, acredita-se que uma das grandes contribuições desta pesquisa foi a de fornecer uma abordagem capaz de, sistemicamente, propor uma orientação sobre o comportamento da adoção do mercado dado o desempenho da tecnologia. Dessa forma, o resultado deste estudo reflete a visão compartilhada dos participantes, permitindo a aprendizagem coletiva sobre a dinâmica de obtenção de clientes no mercado estipulado.

A aplicação permitiu que fossem conhecidos os impactos dos principais condicionantes ao sucesso de aceitação da tecnologia proposta pela empresa pesquisada. Além disso, procurou-se contornar a ausência de conhecimentos e experiência quanto aos métodos empregados de forma que sua aplicação se tornasse o mais amigável e prática possível. Quanto a seu uso e capacidade de interpretação dos resultados, percebe-se que a aplicação se organizou em etapas necessárias e suficientes para as análises desejadas, sendo possível executá-la com êxito, trazendo benefícios concretos à tomada de decisão a respeito de tecnologias emergentes em contextos de incertezas.

Ao longo da produção deste estudo algumas oportunidades para melhorias e pesquisas futuras foram identificadas. Primeiramente, recomenda-se que a aplicação se dê em outras tecnologias emergentes em diversos segmentos como: saúde, educação, entre outros. Isso visa atestar a aplicabilidade e eficiência do modelo proposto. Neste caso, recomenda-se buscar áreas com características diferentes como: modelos de negócios e propostas de valor, concorrência fragmentada, avaliação de ativos, mercados com diferentes ciclos de crescimento, entre outras.

Em relação às ferramentas de análise, sugere-se a utilização de outros métodos para averiguar e comparar a adequabilidade e eficácia de cada método frente ao contexto da Indústria 4.0. Uma dessas possibilidades é a utilização de métodos de análise multicriterial, por exemplo, AHP, MAUT, TOPSIS, entre outros. Isto se daria principalmente na etapa de definição e avaliação das configurações da tecnologia. Uma variação desta proposta diz respeito ao modo como comunicar e obter os atributos tecnológicos entre os atores principais do ecossistema, por exemplo, linguagens formais e ferramentas para expressar e verificar tais atributos.

Ao longo da aplicação, notou-se que, de modo geral a etapa mais vulnerável é a coleta ou obtenção dos dados históricos para o desenvolvimento do modelo de simulação. Deste modo, aconselha-se a organização de uma base de dados que seja ajustada às necessidades do modelo, permitindo a correta quantificação das variáveis envolvidas no sistema.

Realizou-se a busca em uma única base de dados, a Scopus. A próxima sugestão refere-se ao fato que o universo pesquisado e os parâmetros de busca utilizados sejam ampliados e que se utilize mais de uma base de dados para a revisão da literatura. Além disso, sugere-se que outros estudos de caso visem comparar tecnologias fornecidas ou adotadas por organizações de diferentes segmentos industriais ou regiões, evidenciando o carácter empírico da pesquisa.

A conversão de CLDs para modelos de Estoque e Fluxo depende de pressupostos e desenvolvimento de equações matemáticas para os elementos do modelo. Trabalhos futuros podem considerar outros métodos para obtenção da modelagem matemática necessários aos

modelos de Dinâmica de Sistemas. Por exemplo, através do emprego de análise de redes ou algoritmos específicos para tal quantificação. Uma vez que o CLD e os resultados advindo das demais ferramentas empregadas neste estudo não devem jamais ser tomados como uma ‘versão final’, um método que permita a coleta em tempo real de dados do sistema e o monitoramento das mudanças de estado do sistema pode fornecer um meio para atualizar as informações em tempo oportuno e assim implantar estratégias de intervenção adequadas.

Ainda, é bastante sugestivo o emprego da análise sensibilidade associada ao modelo de simulação para avaliação dos parâmetros, aprimorando a análise da influência das variáveis do modelo. Soma-se a isso, por exemplo, o uso da Simulação de Monte Carlo para parâmetros que sejam de difícil determinação por parte dos avaliadores.

Por fim, cabe sugerir estudos futuros sobre a temática de plataformas digitais industriais. É amplamente reconhecido que as plataformas digitais de aplicação industrial não podem ser tratadas de forma homogênea. No entanto, pode-se aproveitar a grande quantidade de *insights* sobre plataformas em outros domínios, ainda que estes não sejam facilmente transferíveis para as plataformas industriais.

Dado que as plataformas industriais se apresentam na forma de ecossistemas, é interessante explorar a coopetição (BENGTSSON; KOCK, 2000). Tópico especialmente interessante no que diz respeito à integração vertical. Dada a arquitetura das plataformas digitais industriais, podem explorados os diferentes tipos de coopetição nas suas várias camadas.

Estudos que ressaltem os meios para atrair complementadores e garantir que eles se envolvam continuamente com a plataforma industriais são recomendados. Dado o mercado nascente e bastante fragmentado, o sucesso das plataformas industriais dependerá em grande medida de sua capacidade de criar um ecossistema ativo de atores. Somado a isso, abordar os efeitos de rede como mecanismos para a atração de atores é outro caminho promissor para a pesquisa em ecossistemas de plataformas digitais.

Adicionalmente, a captura e distribuição de valor dos diferentes atores é um desafio-chave para provedores de plataformas digitais no aspecto de seus modelos de negócios (SCHREIECK *et al.*, 2016). Assim, a pesquisa em plataformas industriais precisa fornecer *insights* sobre como os provedores de plataformas podem criar mecanismos adequados para distribuição de valor entre os diferentes tipos de atores. Sobre os modelos de negócios, imagine-se que os complementadores desenvolverão principalmente soluções individuais e específicas para o cliente, em vez de soluções genéricas disponíveis para todo o ecossistema. Portanto, avaliar quais modalidades de receita os proprietários da plataforma podem utilizar e quais seus

impactos em termos de riscos de adoção ou demais indicadores é uma interessante extensão do estudo aqui apresentado.

Por fim, para estabelecer com sucesso as plataformas industriais digitais, os decisores devem avaliar cuidadosamente quais estratégias já consolidadas eles podem construir e quais estratégias completamente novas são necessárias. Nesse domínio nascente, as limitações e implicações apresentadas em cada etapa do modelo de avaliação proposto neste estudo podem ser um bom ponto de partida para a identificação de casos que requeiram um exame mais aprofundado no contexto de tecnologias emergentes aplicadas à Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

- ABDELBARI, Hassan; SHAFI, Kamran. A computational Intelligence-based Method to 'Learn' Causal Loop Diagram-like Structures from Observed Data. **System Dynamics Review**, v. 33, n. 1, p. 3-33, 2017.
- ABRAHAMSON, Eric; ROSENKOPF, Lori. Social network effects on the extent of innovation diffusion: A computer simulation. **Organization science**, v. 8, n. 3, p. 289-309, 1997.
- ACATECH, National Academy of Science and Engineering. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. 2013. Disponível em: . Acesso em: 28 de maio 2021.
- ADNER, Ron; KAPOOR, Rahul. Value creation in innovation ecosystems: How the structure of technological interdependence affects firm performance in new technology generations. **Strategic management journal**, v. 31, n. 3, p. 306-333, 2010.
- ÅKESSON, Maria. Value proposition in m-commerce: exploring service provider and user perceptions. In: **The 6th Annual Global Mobility Roundtable 2007, June 1-2, 2007, Marriott Hotel, Marina del Rey, Los Angeles, CA**. 2007. p. 19.
- AKKERMANS, Henk. Renga: a systems approach to facilitating inter-organizational network development. **System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society**, v. 17, n. 3, p. 179-193, 2001.
- ALGIERI, Bernardina. An econometric estimation of the demand for tourism: the case of Russia. **Tourism Economics**, v. 12, n. 1, p. 5-20, 2006.
- AMER, Muhammad; DAIM, Tugrul U.; JETTER, Antonie. A review of scenario planning. **Futures**, v. 46, p. 23-40, 2013.
- AMSHOFF, Benjamin *et al.* Business model patterns for disruptive technologies. **International Journal of Innovation Management**, v. 19, n. 03, p. 1540002, 2015.
- ANDRADE, A. L. *et al.* **Pensamento Sistêmico - Caderno de Campo**. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- ARBIX, Glauco *et al.* O Brasil e a nova onda de manufatura avançada: o que aprender com Alemanha, China e Estados Unidos. **Novos estudos CEBRAP**, v. 36, p. 29-49, 2017.
- ARONSON, Daniel. Introduction to systems thinking. **Intro to ST**, 1996.
- ASAN, Seyda Serdar; ASAN, Umut. Qualitative cross-impact analysis with time consideration. **Technological forecasting and social change**, v. 74, n. 5, p. 627-644, 2007.
- ASAN, Umut; KADAIFCI, Cigdem; BOZDAG, Erhan. Qualitative cross impact analysis using hesitant fuzzy sets. In: **Uncertainty Modelling in Knowledge Engineering and Decision Making: Proceedings of the 12th International FLINS Conference**. p. 132-138. 2016.
- AVEN, Terje. The risk concept—historical and recent development trends. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 99, p. 33-44, 2012.
- AXELSSON, Jakob *et al.* On the conceptual design of a dynamic component model for reconfigurable AUTOSAR systems. **ACM SIGBED Review**, v. 10, n. 4, p. 45-48, 2013.
- AXELSSON, Jakob; SKOGLUND, Mats. Quality assurance in software ecosystems: A systematic literature mapping and research agenda. **Journal of Systems and Software**, v. 114, p. 69-81, 2016.
- AZADEH, Ali *et al.* An integrated artificial neural network and system dynamics approach in support of the viable system model to enhance industrial intelligence: The case of a large broiler industry. **Systems Research and Behavioral Science**, v. 31, n. 2, p. 236-257, 2014.

- BALA, Bilash Kanti; ARSHAD, Fatimah Mohamed; NOH, Kusairi Mohd. Causal loop diagrams. In: **System dynamics**. Springer, Singapore, p. 37-51. 2017.
- BASL, Josef. Pilot study of readiness of Czech companies to implement the principles of Industry 4.0. **Management and Production Engineering Review**, 2017.
- BASTOS, Alexandre Antunes Parreiras. **A Dinâmica de Sistemas e a compreensão de estruturas de negócios**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- BECK, Mathias; SCHOENENBERGER, Lukas Klaus; SCHENKER-WICKI, Andrea. How managers can deal with complex issues: A semi-quantitative analysis method of causal loop diagrams based on matrices. 2012.
- BENGTSSON, Maria; KOCK, Sören. “Coopetition” in business Networks—to cooperate and compete simultaneously. **Industrial marketing management**, v. 29, n. 5, p. 411-426, 2000.
- BENITEZ, Guilherme Brittes; AYALA, Néstor Fabián; FRANK, Alejandro G. Industry 4.0 innovation ecosystems: An evolutionary perspective on value cocreation. **International Journal of Production Economics**, v. 228, p. 107735, 2020.
- BENNER, Mary J.; TRIPSAS, Mary. The influence of prior industry affiliation on framing in nascent industries: The evolution of digital cameras. **Strategic Management Journal**, v. 33, n. 3, p. 277-302, 2012.
- BENSON, Tracy; MARLIN, Sheri. **The habit-forming guide to becoming a systems thinker**. Systems Thinking Group, Inc., 2017.
- BERGERSON, Joule A. *et al.* Life cycle assessment of emerging technologies: Evaluation techniques at different stages of market and technical maturity. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 11-25, 2020.
- BEVERUNGEN, Daniel *et al.* Conceptualizing smart service systems. **Electronic Markets**, v. 29, n. 1, p. 7-18, 2019.
- BOSCH, Jan. From software product lines to software ecosystems. In: **SPLC. Software Product Line Conference**, pp. 111-119. 2009.
- BOUWMAN, Harry; FIELT, Erwin. Service innovation and business models. In: **Mobile service innovation and business models**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 9-30. 2008.
- BOWMAN, G., MACKAY, R. B., MASRANI, S., & MCKIERNAN, P. Storytelling and the scenario process: Understanding success and failure. **Technological Forecasting and Social Change**, 80(4), 735-748. 2013.
- BREM, Alexander; VOIGT, Kai-Ingo. Integration of market pull and technology push in the corporate front end and innovation management—Insights from the German software industry. **Technovation**, v. 29, n. 5, p. 351-367, 2009.
- BRENNAN, Linda *et al.* (Ed.). **Social marketing and behaviour change: Models, theory and applications**. Edward Elgar Publishing, 2014.
- BRETTEL, Malte *et al.* How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. **FormaMente**, v. 12, 2017.
- BUENO, Bruna; BALESTRIN, Alsones. Inovação colaborativa: uma abordagem aberta no desenvolvimento de novos produtos. **Revista de Administração de Empresas**, v. 52, p. 517-530, 2012.
- BURGER, C. J. S. C., DOHNAL, M., KATHRADA, M., & LAW, R.. A practitioners guide to time-series methods for tourism demand forecasting — a case study of Durban, South Africa. **Tourism Management**, 22(4), 403–409.2001.

- CHECKLAND P, SCHOLES J. *Soft Systems Methodology in Action*. New York: John Wiley & Sons, Inc; 1990.
- CHEN, Baotong *et al.* Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges. **Ieee Access**, v. 6, p. 6505-6519, 2017.
- CHENG, Chih-Hong *et al.* Semantic degrees for industrie 4.0 engineering: deciding on the degree of semantic formalization to select appropriate technologies. In: **Proceedings of the 2015 10th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering**. 2015. p. 1010-1013.
- CHRISTENSEN, Clayton M.; RAYNOR, Michael E.; MCDONALD, Rory. What is disruptive innovation? *Harvard Business Review*. <https://hbr.org/2015/12/what-is-disruptive-innovation> Retrieved on, v. 5, n. 5, p. 2017, 2015.
- COATES, Joseph F. Scenario planning. **Technological forecasting and social change**, v. 65, n. 1, p. 115-123, 2000.
- COLLINGRIDGE, David. *The social control of technology*. 1982.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA - CNI. **Oportunidades para Indústria 4.0 no Brasil: Aspectos da Demanda e Oferta no Brasil**. Dezembro de 2017.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Desafios para a indústria 4.0 no Brasil / Confederação Nacional da Indústria**. – Brasília: CNI, 2016.
- COOPER, Daniel R.; GUTOWSKI, Timothy G. Prospective environmental analyses of emerging technology: A critique, a proposed methodology, and a case study on incremental sheet forming. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 38-51, 2020.
- COSTANTINI, Valeria; CRESPI, Francesco; PALMA, Alessandro. Characterizing the policy mix and its impact on eco-innovation: A patent analysis of energy-efficient technologies. **Research policy**, v. 46, n. 4, p. 799-819, 2017.
- COYLE, Geoff. Qualitative and Quantitative Modelling in System Dynamics. **Journals of System**, 2001.
- COZZENS, Susan *et al.* Emerging technologies: quantitative identification and measurement. **Technology Analysis & Strategic Management**, v. 22, n. 3, p. 361-376, 2010.
- CUSUMANO, Michael A.; KAHL, Steven J.; SUAREZ, Fernando F. Services, industry evolution, and the competitive strategies of product firms. **Strategic management journal**, v. 36, n. 4, p. 559-575, 2015.
- CY. BALDWIN; CJ WOODARD. **The architecture of platforms: A unified view**. In **Annabelle Gawer**, editor, *Platforms, Markets and Innovation*, pages 19–44. Edward Elgar Publishing, Cheltenham, UK, 2009.
- DA SILVA, Mateus Hanauer; WEBBER, Carine Geltrudes. Análise Comparativa entre Plataformas para o Desenvolvimento da Indústria 4.0. **Scientia cum Industria**, v. 8, n. 2, p. 115-122, 2020.
- DAIM, Tugrul U. *et al.* Forecasting emerging technologies: Use of bibliometrics and patent analysis. **Technological forecasting and social change**, v. 73, n. 8, p. 981-1012, 2006.
- DALENOGARE, Lucas Santos *et al.* The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics**, v. 204, p. 383-394, 2018.
- DAY, George S.; SCHOEMAKER, Paul JH; GUNTHER, Robert E. **Gestão de Tecnologias Emergentes: A visão de Wharton School**. Bookman Editora, 2009.
- DAY, George S.; WENSLEY, Robin. Assessing advantage: a framework for diagnosing competitive superiority. **Journal of marketing**, v. 52, n. 2, p. 1-20, 1988.

DE REUVER, Mark; SØRENSEN, Carsten; BASOLE, Rahul C. The digital platform: a research agenda. **Journal of Information Technology**, v. 33, n. 2, p. 124-135, 2018.

DEDE, Chris. The evolution of distance education: Emerging technologies and distributed learning. **American Journal of Distance Education**, v. 10, n. 2, p. 4-36, 1996.

DIAS, J. C. Q. Logística Global e Macrologística. **Silabo**, v. 1, 2005.

DOMINICI, Gandolfo; LEVANTI, Gabriella. The complex system theory for the analysis of inter-firm networks: a literature overview and theoretic framework. **International Business Research**, v. 4, n. 2, p. 31-37, 2011.

DOS SANTOS, L. L. C.; CANHA, L. N.; BERNARDON, D. P. Projection of the diffusion of photovoltaic systems in residential low voltage consumers. **Renewable Energy**, v. 116, p. 384-401, 2018.

DRESCH, Aline *et al.* Desenvolvimento científico em design science para a engenharia de produção: formulações conceituais e análise empírica. 2018.

EKLUND, Ulrik; BOSCH, Jan. Architecture for embedded open software ecosystems. **Journal of Systems and Software**, v. 92, p. 128-142, 2014.

ELORANTA, Ville *et al.* Using platforms to pursue strategic opportunities in service-driven manufacturing. **Service Science**, v. 8, n. 3, p. 344-357, 2016.

EVANS, David; EYERS, David M. Efficient data tagging for managing privacy in the internet of things. In: **2012 IEEE International Conference on Green Computing and Communications**. IEEE, p. 244-248. 2012.

FABER, Albert; HOPPE, Thomas. Co-constructing a sustainable built environment in the Netherlands—Dynamics and opportunities in an environmental sectoral innovation system. **Energy policy**, v. 52, p. 628-638, 2013.

FARAHZADI, Amirhossein *et al.* Middleware technologies for cloud of things: a survey. **Digital Communications and Networks**, v. 4, n. 3, p. 176-188, 2018

FONSECA, Luis Miguel. Industry 4.0 and the digital society: concepts, dimensions and envisioned benefits. In: **Proceedings of the international conference on business excellence**. 2018. p. 386-397.

FORD, David N.; STERMAN, John D. Expert knowledge elicitation to improve formal and mental models. **System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society**, v. 14, n. 4, p. 309-340, 1998.

FORRESTER, J. W. **Industrial dynamics**. Cambridge: MIT press, 1961.

FORRESTER, Jay W. System dynamics and the lessons of 35 years. In: **A systems-based approach to policymaking**. Springer, Boston, MA, p. 199-240. 1993.

FRANK, Alejandro Germán; DALENOGARE, Lucas Santos; AYALA, Néstor Fabián. Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. **International Journal of Production Economics**, v. 210, p. 15-26, 2019.

GAERTNER Hype Cycle, 2020. Platform as a Service. Disponível em: <https://www.gartner.com/en/documents/3989064/hype-cycle-for-platform-as-a-service-2020>. Acessado em: 20 de agosto de 2021.

GALLI, B., KAVIANI, A. A., BOTTANI, A., & MURINO, T. An investigation of shared leadership & key performance indicators in Six Sigma projects. **International Journal of Strategic Decision Sciences**, 8(4), 1–45. 2017.

GAWER, Annabelle. Bridging differing perspectives on technological platforms: Toward an integrative framework. **Research policy**, v. 43, n. 7, p. 1239-1249, 2014.

- GAWER, Annabelle; CUSUMANO, Michael A. Industry platforms and ecosystem innovation. **Journal of product innovation management**, v. 31, n. 3, p. 417-433, 2014.
- GEBAUER, Heiko; PAIOLA, Marco; SACCANI, Nicola. Characterizing service networks for moving from products to solutions. **Industrial Marketing Management**, v. 42, n. 1, p. 31-46, 2013.
- GHOBAKHLOO, Morteza. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 2018.
- GIFFI, Craig A.; GANGULA, Bharath; ILLINDA, Pandarinath. 3D opportunity in the automotive industry. **Additive manufacturing hits the road: Deloitte University Press**, p. 24, 2014.
- GLOBAL INDUSTRY ANALYTICS – GIA. Industry 4.0 - Global Market Trajectory & Analytics. 2021. Disponível em: <https://www.strategyr.com/market-report-industry-4.0-forecasts-global-industry-analysts-inc.asp>. Acessado em: 10 de setembro de 2021.
- GOMEZ, Peter; PROBST, Gilbert. The practice of holistic problem solving: think in a network, act entrepreneurially, convince personally **Verlag Paul Haupt**, 1999.
- GORDON, Theodore J. Methods of NIC's Global Trends 2030: A Review. **World Future Review**, v. 5, n. 4, p. 377-382, 2013.
- GORDON, Theodore J.; HAYWARD, Howard. Initial experiments with the cross impact matrix method of forecasting. **Futures**, v. 1, n. 2, p. 100-116, 1968.
- GORDON, Theodore J.; STOVER, John. Cross-impact analysis. **Futures research methodology, Version**, v. 2, 2003.
- GTAI, German Trade & Invest, **INDUSTRIE 4.0: Smart manufacturing for the future**. 2014. Disponível em: https://www.gtai.de/GTAI/Content/EN/Invest/_SharedDocs/Downloads/GTAI/Brochures/Industries/industrie4.0-smart-manufacturing-for-the-future-en.pdf>. Acessado em: 04 agosto de 2021.
- GUNASEKARAN, Vinoth; HARMANTZIS, Fotios C. Emerging wireless technologies for developing countries. **Technology in Society**, v. 29, n. 1, p. 23-42, 2007.
- HALAWEH, Mohanad. Emerging technology: What is it. **Journal of technology management & innovation**, v. 8, n. 3, p. 108-115, 2013.
- HELMER, Olaf. Reassessment of cross-impact analysis. **Futures**, v. 13, n. 5, p. 389-400, 1981.
- HENG, Stefan. Industry 4.0: upgrading of Germany's industrial capabilities on the horizon. **Available at SSRN 2656608**, 2014.
- HERMANN, Mario; PENTEK, Tobias; OTTO, Boris. Design principles for Industrie 4.0 scenarios: a literature review. **Technische Universität Dortmund, Dortmund**, p. 45, 2015.
- HODAPP, Daniel; HAWLITSCHKE, Florian; KRAMER, Denis. Value Co-Creation in Nascent Platform Ecosystems: A Delphi Study in the Context of the Internet of Things. In: **ICIS**. 2019.
- HOHWIELER, E.; BERGER, R.; GEISERT, C. Condition monitoring services for e-Maintenance. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 37, n. 5, p. 239-244, 2004.
- HOMER, Jack; OLIVA, Rogelio. Maps and models in system dynamics: a response to Coyle. **System dynamics review**, v. 17, n. 4, p. 347-355, 2001.
- HOPPMANN, Joern *et al.* The two faces of market support—How deployment policies affect technological exploration and exploitation in the solar photovoltaic industry. **Research policy**, v. 42, n. 4, p. 989-1003, 2013.
- HUBBARD, Douglas W.; SEIERSEN, Richard. **How to measure anything in cybersecurity risk**. John Wiley & Sons, 2016.

- HUTH, Alexa; CEBULA, James. The basics of cloud computing. **United States Computer**, p. 1-4, 2011.
- ISO. International Standardization Organization. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 31000: Gestão de Riscos Princípios e diretrizes. Rio de Janeiro, RJ. 2018.
- KAGERMANN, H. „How Industrie 4.0 will coin the economy of the future? “. The results of the german High-tech strategies and Strategic initiative Industrie, v. 4, 2014.**Royal Academy of engineering, London**. 2019.
- KAGERMANN, Henning; WAHLSTER, Wolfgang; HELBIG, Johannes. Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. **Final report of the Industrie**, v. 4, n. 0, 2013.
- KAPOOR, Rahul. Ecosystems: broadening the locus of value creation. **Journal of Organization Design**, v. 7, n. 1, p. 1-16, 2018.
- KEMP, René; VOLPI, Massimiliano. The diffusion of clean technologies: a review with suggestions for future diffusion analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 1, p. S14-S21, 2008.
- KIEL, Daniel; ARNOLD, Christian; VOIGT, Kai-Ingo. The influence of the Industrial Internet of Things on business models of established manufacturing companies—A business level perspective. **Technovation**, v. 68, p. 4-19, 2017.
- KIM, Daniel H. Systems Thinking Tools: A User’s Reference Guide. Waltham: **Pegasus Communications**. Inc, pp. 13–20. 1994.
- KIM, Ilhyung; SPRINGER, Mark. Measuring endogenous supply chain volatility: Beyond the bullwhip effect. **European journal of operational research**, v. 189, n. 1, p. 172-193, 2008.
- KOTIR, Julius H. *et al*. Systemic feedback modelling for sustainable water resources management and agricultural development: an application of participatory modelling approach in the Volta River Basin. **Environmental Modelling & Software**, v. 88, p. 106-118, 2017.
- LANE, David C. What we talk about when we talk about ‘systems thinking’. **Journal of the Operational Research Society**, v. 67, n. 3, p. 527-528, 2016.
- LARSON, R. Sam; DEARING, James W.; BACKER, Thomas E. Strategies to scale up social programs. 2017.
- LEEDY, Paul D.; ORMROD, Jeanne Ellis. **Practical research**. Saddle River, NJ, USA: Pearson Custom, 2005.
- LEITÃO, Paulo; COLOMBO, Armando Walter; KARNOUSKOS, Stamatis. Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges. **Computers in industry**, v. 81, p. 11-25, 2016.
- LIEBOVITCH, Larry S.; COLEMAN, Peter T.; FISHER, Joshua. Approaches to understanding sustainable peace: qualitative causal loop diagrams and quantitative mathematical models. **American behavioral scientist**, v. 64, n. 2, p. 123-144, 2020.
- LIN, Chad; HUANG, Yu-An; CHENG, Man-Shin. The adoption of IS/IT investment evaluation and benefits realization methodologies in service organizations: IT maturity paths and framework. **Contemporary Management Research**, v. 3, n. 2, 2007.
- LOPES, Rita; VIDEIRA, Nuno. Conceptualizing Stakeholders' Perceptions of Ecosystem Services: A Participatory Systems Mapping Approach. **Environmental & Climate Technologies**, v. 16, n. 1, 2015.
- MAANI, Kambiz E.; CAVANA, Robert Y. **Systems thinking, system dynamics: Managing change and complexity**. Pearson Prentice Hall, 2007.

MANYIKA, James *et al.* Unlocking the Potential of the Internet of Things. **McKinsey Global Institute**, v. 1, 2015.

MARINHO, Clésio Aparecido. **Modelo de avaliação do nível de maturidade das tecnologias da indústria 4.0 aplicados ao setor sucroenergético**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. 2020.

MARKMAN, Gideon D.; WALDRON, Theodore L. Small entrants and large incumbents: A framework of micro entry. **Academy of Management Perspectives**, v. 28, n. 2, p. 179-197, 2014.

MARODIN, Giuliano Almeida *et al.* The moderating effect of Lean supply chain management on the impact of Lean shop floor practices on quality and inventory. **Supply Chain Management: An International Journal**, 2017.

MARTINEZ-MOYANO, Ignacio J.; RICHARDSON, George P. Best practices in system dynamics modeling. **System Dynamics Review**, v. 29, n. 2, p. 102-123, 2013.

MATT, Christian; HESS, Thomas; BENLIAN, Alexander. Digital transformation strategies. **Business & information systems engineering**, v. 57, n. 5, p. 339-343, 2015.

MCCARTHY, Ian P.; RAKOTOBÉ-JOEL, Thierry; FRIZELLE, Gerry. Complex systems theory: implications and promises for manufacturing organisations. **International journal of Manufacturing technology and management**, v. 2, n. 1-7, p. 559-579, 2000.

MCGRATH, Rita Gunther; MACMILLAN, Ian C. Assessing technology projects using real options reasoning. **Research-Technology Management**, v. 43, n. 4, p. 35-49, 2000.

MDIC, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. 2019. Disponível em <<http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/index.html>>. Acessado em 28 julho. 2019.

MEADOWS, Donella H. **Thinking in systems: A primer**. White River Junction. VT: Chelsea Green Publishing Co; 2008.

MELL, Peter *et al.* **The NIST definition of cloud computing**. 2011.

MIKUSZ, Martin. Towards a conceptual framework for cyber-physical systems from the service-dominant logic perspective. 2015. *Procedia CIRP* 16, pp. 385-389 (2014)

MILLER, J.; GREEN, I.; PUTLAND, G. Emerging Technologies: A Framework for Thinking. Australian Capital Territory Department of Education and Training. **Retrieved November**, v. 13, p. 2008, 2005.

MILLER, Kent D.; WALLER, H. Gregory. Scenarios, real options and integrated risk management. **Long range planning**, v. 36, n. 1, p. 93-107, 2003.

MITCHELL, R. B.; TYDEMAN, J. Subjective conditional probability modelling. **Technological forecasting and social change**, v. 11, n. 2, p. 133-152, 1978.

MITLETON-KELLY, Eve. **Complex systems and evolutionary perspectives on organisations: the application of complexity theory to organisations**. Elsevier Science Ltd, 2003.

MONI, Sheikh Moniruzzaman *et al.* Life cycle assessment of emerging technologies: A review. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 1, p. 52-63, 2020.

MORANDI, M. I. W. M.; CAMARGO, L. F. R. Revisão sistemática da literatura. In: DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JÚNIOR, José Antonio Valle. **Design Science Research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, p. 141-172. 2015.

MORANDI, Maria Isabel Wolf Motta. **Elaboração de um método para o entendimento da dinâmica da precificação de commodities através do pensamento sistêmico e do planejamento por cenários: uma aplicação no mercado de minérios de ferro**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 2008.

MORANDI, Maria Isabel Wolf Motta. **Tomada de decisão em opções estratégicas: proposta de um método de avaliação sistêmico e dinâmico**. Tese de Doutorado. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. 2017.

MORECROFT, J. System dynamics, RBV, and behavioural theories of firm performance: lessons from People Express. In: **The International Conference of the System Dynamics Society**. 2008.

MORECROFT, John DW. Strategy support models. **Strategic management journal**, v. 5, n. 3, p. 215-229, 1984.

MORECROFT, John DW. **Strategic modelling and business dynamics: A feedback systems approach**. John Wiley & Sons, 2015.

MÜLLER, Julian Marius; BULIGA, Oana; VOIGT, Kai-Ingo. Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 132, p. 2-17, 2018.

MUSKAT, Matthias; BLACKMAN, Deborah Ann; MUSKAT, Birgit. Mixed methods: Combining expert interviews, cross-impact analysis and scenario development. **The Electronic Journal of Business Research Methods**, v. 10, n. 1, p. 09-21, 2012.

NETO, Anis Assad *et al.* A busca de uma identidade para a indústria 4.0. **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 4, p. 1379-1395, 2018.

O'DONOVAN, Peter *et al.* Big data in manufacturing: a systematic mapping study. **Journal of Big Data**, v. 2, n. 1, p. 1-22, 2015.

OKAZAKI, Shintaro. New perspectives on m-commerce research. **Journal of Electronic Commerce Research**, v. 6, n. 3, p. 160, 2005.

OLIVER, John J.; PARRETT, Emma. Managing future uncertainty: Reevaluating the role of scenario planning. **Business Horizons**, v. 61, n. 2, p. 339-352, 2018.

OSTERRIEDER, Philipp; BUDDE, Lukas; FRIEDLI, Thomas. The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review. **International Journal of Production Economics**, v. 221, p. 107476, 2020.

PAHL, Sabine *et al.* Perceptions of time in relation to climate change. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 5, n. 3, p. 375-388, 2014.

PALMER, Alfonso; MONTANO, Juan Jose; SESÉ, Albert. Designing an artificial neural network for forecasting tourism time series. **Tourism management**, v. 27, n. 5, p. 781-790, 2006.

PETRIK, Dimitri; HERZWURM, Georg. Towards the IIoT ecosystem development-understanding the stakeholder perspective. 2020.

PARKER, Geoffrey; VAN ALSTYNE, Marshall W.; JIANG, Xiaoyue. Platform ecosystems: How developers invert the firm. **Boston University Questrom School of Business Research Paper**, n. 2861574, 2016.

PAULI, Tobias; FIELT, Erwin; MATZNER, Martin. Digital industrial platforms. **Business & Information Systems Engineering**, v. 63, n. 2, p. 181-190, 2021.

PFOHL, Hans-Christian; YAHSI, Burak; KURNAZ, Tamer. Concept and diffusion-factors of industry 4.0 in the supply chain. In: **Dynamics in Logistics**. Springer, Cham, 2017. p. 381-390.

PIDD, Michael. **Computer Simulation in Management Science**. 1998.

PORTAL, DA INDÚSTRIA. Indústria 4.0: Entenda seus conceitos e fundamentos. [sd]. 2021. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/industria-4-0/>. Acessado em: 25 de maio de 2021.

PRODANOV, Cleber Cristiano; DE FREITAS, Ernani Cesar. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição**. Editora Feevale, 2013.

PROVAZZI, Pedro Marcelo. **Proposta para uso de Fatores de Risco para Priorização de Projetos**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. 2019

RAUBITSCHKEK, Ruth S. Multiple scenario analysis and business planning. **Advances in strategic management**, v. 5, p. 181-205, 1988.

REINSTALLER, Andreas. The technological transition to chlorine free pulp bleaching technologies: lessons for transition policies. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 1, p. S133-S147, 2008.

RICHMOND, Barry. System dynamics/systems thinking: Let's just get on with it. **System Dynamics Review**, v. 10, n. 2-3, p. 135-157, 1994.

RICHMOND, Barry. The "thinking" in systems thinking: how can we make it easier to master. **The Systems Thinker**, v. 8, n. 2, p. 1-5, 1997.

RICKLES, Dean; HAWE, Penelope; SHIELL, Alan. A simple guide to chaos and complexity. **Journal of Epidemiology & Community Health**, v. 61, n. 11, p. 933-937, 2007.

ROBLEK, Vasja; MEŠKO, Maja; KRAPEŽ, Alojz. A complex view of industry 4.0. **Sage Open**, v. 6, n. 2, p. 2158244016653987, 2016.

ROGERS, Everett M. **Diffusion of innovations**. Simon and Schuster, 2010.

RÜßMANN, Michael *et al.* Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. **Boston consulting group**, v. 9, n. 1, p. 54-89, 2015.

SACCANI, Nicola; VISINTIN, Filippo; RAPACCINI, Mario. Investigating the linkages between service types and supplier relationships in servitized environments. **International Journal of Production Economics**, v. 149, p. 226-238, 2014.

SAINIO, Liisa-Maija. A framework for analysing the effects of new, potentially disruptive technology on a business model case–Bluetooth. **International journal of electronic business**, v. 2, n. 3, p. 255-273, 2004.

SANTOS, Beatrice Paiva *et al.* Indústria 4.0: desafios e oportunidades. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 4, n. 1, p. 111-124, 2018.

SCHERMULY, Louisa *et al.* Developing an industrial IoT platform–Trade-off between horizontal and vertical approaches. 2019.

SCHLAEPFER, Ralf C.; KOCH, Markus; MERKOFER, Philipp. Industry 4.0 challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies. **Deloitte, Zurich**, 2015.

SCHMIDT, Rainer *et al.* Industry 4.0-potentials for creating smart products: empirical research results. In: **International Conference on Business Information Systems**. Springer, Cham, p. 16-27. 2015.

SCHNEIDER, Paul. Managerial challenges of Industry 4.0: an empirically backed research agenda for a nascent field. **Review of Managerial Science**, v. 12, n. 3, p. 803-848, 2018.

SCHREIECK, Maximilian; WIESCHE, Manuel; KRCCMAR, Helmut. Design and governance of platform ecosystems–key concepts and issues for future research. 2016.

SCHWAB, Klaus. **The fourth industrial revolution**. Currency, 2017.

SENGE, P. M. **The fifth discipline: the art and practice of the learning organization**. 1st ed.ed. New York: Currency Doubleday, 1997.

SENGE, Peter M. *et al.* Awakening faith in an alternative future. **Reflections**, v. 5, n. 7, p. 1-11, 2004.

- SHARP, Benjamin E.; MILLER, Shelie A. Potential for integrating diffusion of innovation principles into life cycle assessment of emerging technologies. **Environmental science & technology**, v. 50, n. 6, p. 2771-2781, 2016.
- SILA, Ismail. The state of empirical research on the adoption and diffusion of business-to-business e-commerce. **International Journal of Electronic Business**, v. 12, n. 3, p. 258-301, 2015.
- SINGH, Karamveer. Lean production in the era of Industry 4.0. **Logistics Engineering and Technologies Group-Working Paper Series**, v. 5, 2017.
- SOLTOVSKI, Ramon *et al.* Um Estudo Quantitativo Sobre os Riscos da Indústria 4.0 no Contexto Industrial: Uma Revisão Sistemática da Literatura. **Revista Gestão e Desenvolvimento**, v. 17, n. 3, p. 165-191, 2020.
- SOMMER, Lutz. Industrial revolution-industry 4.0: Are German manufacturing SMEs the first victims of this revolution? **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 8, n. 5, p. 1512-1532, 2015.
- SOUZA, Joana Siqueira de. **Modelo para identificação e gerenciamento do grau de risco de empresas-MIGGRI**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SRINIVASAN, Raji. Sources, characteristics and effects of emerging technologies: Research opportunities in innovation. **Industrial Marketing Management**, v. 37, n. 6, p. 633-640, 2008.
- STAHL, Bernd Carsten. What does the future hold? A critical view of emerging information and communication technologies and their social consequences. In: **Researching the future in information systems**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. p. 59-76.
- STERMAN JD. **Business Dynamics. Systems Thinking and Modelling for a Complex World**. New York: McGraw-Hill. 2000.
- STERMAN, John D. Learning from evidence in a complex world. **American journal of public health**, v. 96, n. 3, p. 505-514, 2006.
- STERMAN, John D. System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. **MIT Library**, 2002.
- STRANGE, Roger; ZUCHELLA, Antonella. Industry 4.0, global value chains and international business. **Multinational Business Review**, 2017.
- TAHERDOOST, Hamed. A review of technology acceptance and adoption models and theories. **Procedia manufacturing**, v. 22, p. 960-967, 2018.
- TANTIK, Erdal; ANDERL, Reiner. Integrated data model and structure for the asset administration shell in industrie 4.0. **Procedia Cirp**, v. 60, p. 86-91, 2017.
- TAO, Fei *et al.* Digital twin in industry: State-of-the-art. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 4, p. 2405-2415, 2018.
- TASSEY, Gregory. Competing in advanced manufacturing: The need for improved growth models and policies. **Journal of Economic Perspectives**, v. 28, n. 1, p. 27-48, 2014.
- TEECE, David J. Business models, business strategy and innovation. **Long range planning**, v. 43, n. 2-3, p. 172-194, 2010.
- THAMES, Lane; SCHAEFER, Dirk. Software-defined cloud manufacturing for industry 4.0. **Procedia cirp**, v. 52, p. 12-17, 2016.
- TORTORELLA, Guilherme Luz *et al.* Organizational learning paths based upon industry 4.0 adoption: An empirical study with Brazilian manufacturers. **International Journal of Production Economics**, v. 219, p. 284-294, 2020.

TORTORELLA, Guilherme Luz; SILVA, E.; VARGAS, D. An empirical analysis of total quality management and total productive maintenance in industry 4.0. In: **Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM)**. 2018. p. 742-753.

TRIPSAS, Mary. Unraveling the process of creative destruction: Complementary assets and incumbent survival in the typesetter industry. **Strategic management journal**, v. 18, n. S1, p. 119-142, 1997.

TUPA, Jiri; SIMOTA, Jan; STEINER, Frantisek. Aspects of risk management implementation for Industry 4.0. **Procedia manufacturing**, v. 11, p. 1223-1230, 2017.

VELETSIANOS, George (Ed.). **Emerging technologies in distance education**. Athabasca University Press, 2010.

VENKATESH, Viswanath; BROWN, Susan A.; BALA, Hillol. Bridging the qualitative-quantitative divide: Guidelines for conducting mixed methods research in information systems. **MIS quarterly**, p. 21-54, 2013.

VENNIX JAM. **Group Model Building Facilitating Team Learning Using System Dynamics**. Chichester: Wiley.1996.

VIDEIRA, Nuno *et al.* Improving understanding on degrowth pathways: An exploratory study using collaborative causal models. **Futures**, v. 55, p. 58-77, 2014.

VILLARES, Marco *et al.* Does ex ante application enhance the usefulness of LCA? A case study on an emerging technology for metal recovery from e-waste. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 10, p. 1618-1633, 2017.

VON THIELE SCHWARZ, Ulrica *et al.* Using kaizen to improve employee well-being: Results from two organizational intervention studies. **Human relations**, v. 70, n. 8, p. 966-993, 2017.

WANG, Shiyong *et al.* Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. **International journal of distributed sensor networks**, v. 12, n. 1, p. 3159805, 2016.

WEIMER-JEHLE W.: Cross-Impact Balances: A System-Theoretical Approach to Cross-Impact Analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, 73:4, 334-361. 2006.

WENDER, Ben A. *et al.* Illustrating anticipatory life cycle assessment for emerging photovoltaic technologies. 2014.

WOLSTENHOLME, Eric F. A systematic approach to model creation. **Modeling for learning organizations**, p. 175-194, 1994.

WOLSTENHOLME, Eric F. Qualitative vs quantitative modelling: the evolving balance. **Journal of the Operational Research Society**, v. 50, n. 4, p. 422-428, 1999.

WORTMANN, Felix; FLÜCHTER, Kristina. Internet of things. **Business & Information Systems Engineering**, v. 57, n. 3, p. 221-224, 2015.

XU, Li Da; XU, Eric L.; LI, Ling. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International journal of production research**, v. 56, n. 8, p. 2941-2962, 2018.

YEARWORTH, Mike; WHITE, Leroy. The uses of qualitative data in multimethodology: Developing causal loop diagrams during the coding process. **European Journal of Operational Research**, v. 231, n. 1, p. 151-161, 2013.

YUDINA, Nataliya; PIDLISNA, Olena. Marketing Perception Of Technological Uncertainty By Decision-Makers. **Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»**, n. 18, 2021.

ZELINKA, David; AMADEI, Bernard. Systems approach for modeling interactions among the sustainable development goals part 1: Cross-impact network analysis. **International Journal of System Dynamics Applications (IJSDA)**, v. 8, n. 1, p. 23-40, 2019.

ZHANG, Xianyu; MING, Xinguo; YIN, Dao. Application of industrial big data for smart manufacturing in product service system based on system engineering using fuzzy DEMATEL. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, p. 121863, 2020.

ZINI, Daniel Writzl. **Método para a análise de riscos em cadeias de suprimentos utilizando a simulação de dinâmica de sistemas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2015.

ZOTT, Christoph *et al.* The business model: Theoretical roots, recent developments, and future research. **IESE Research Papers**, v. 3, n. 4, p. 1-43, 2010.

APÊNDICE A – QUESTIONÁRIO PARA ENTREVISTAS

Este Apêndice apresenta um questionário que faz parte de metodologia de desenvolvimento de uma dissertação de mestrado. Seu objetivo principal é identificar fatores que influenciam a adoção de tecnologias no contexto da Indústria 4.0. A tecnologia em estudo é uma plataforma digital de aplicação industrial, sendo que sua atividade principal está ligada à manutenção preditiva. Para tanto, utiliza-se de processos de análise de dados e aprendizado de máquina.

Este questionário está dividido em duas partes. Na primeira são solicitadas informações gerais e apresentadas algumas questões do tipo aberta e outras de múltipla escolha. Na segunda etapa são apresentadas características que a tecnologia poderá assumir, solicitando que o participante avalie, através de uma escala, a importância que cada característica tem para sua organização.

Tempo estimado para a tarefa: 45 minutos.

PARTE I. INFORMAÇÕES GERAIS

1. Descreva brevemente os processos de negócios afetados pelo uso de uma plataforma digital em sua organização, e explique a importância da estratégia da plataforma de manutenção para a organização.

2. Tipo de ator

- (1) Associações de negócio
- (2) Universidade
- (3) Centro de Pesquisa
- (4) Empresas
- (5) Clientes
- (6) Outro:

3. Atividade da Empresa

4. Segmento Industrial

- (1) Agricultura
- (2) Biotecnologia
- (3) Construção
- (4) Produtos alimentícios
- (5) Couro e produtos relacionados
- (6) Mineração
- (7) Móveis
- (8) Farmacêutica
- (9) Celulose e papel
- (10) Software e tecnologia
- (11) Siderurgia
- (12) Transporte
- (13) Produtos de metal
- (14) Manufatura
- (15) Outro:

5. Número aprox. de colaboradores

- 6. Sede (local)**
- 7. Oferta Digital**
- 8. Papel do entrevistado na Organização**
- 9. Em qual estágio do ciclo de vida do ecossistema digital se encontra sua organização?**
 - (1) Nascimento
 - (2) Expansão
 - (3) Liderança
- 10. Qual tecnologia sua empresa oferece/recebe no ecossistema digital? (múltipla-resposta).**
 - (1) Aquisição de dados
 - (2) Detecção, medição e transdução
 - (3) Software de apresentação de dados
 - (4) Análise de big data em máquinas (incluindo IA)
 - (5) Protocolos industriais padrão em equipamentos
 - (6) Atualização digital de equipamentos (retrofit)
 - (7) Infraestrutura de TI
 - (8) Gateways de protocolos de comunicação industrial
 - (9) Monitoramento da eficiência energética elétrica
 - (10) Serviços digitais em produtos
 - (11) Comunicação máquina a máquina (M2M)
 - (12) Rastreabilidade do processo
 - (13) Melhoria da eficiência de energia elétrica Identificação de produtos (por exemplo, RFID)
 - (14) Visão de máquina Manufatura digital Comissionamento virtual
 - (15) Sistemas robóticos para automação industrial
 - (16) Colaboração humano-robô
 - (17) Realidade virtual ou aumentada Manufatura aditiva
 - (18) Outros:
- 11. Quais motivações em associar-se/investir em uma plataforma de manutenção industrial para criação de valor para sua organização? (múltipla-resposta)**
 - (1) Crescimento da receita
 - (2) Inovação de produto atuação
 - (3) Relacionamento com o consumidor eficácia
 - (4) Agilidade de marketing
 - (5) Satisfação do cliente
 - (6) Prevenção de resíduos e minimização
 - (7) Outros:
- 12. Quais dentre os suportes listados abaixo sua organização atualmente possui ou deseja possuir em relação à plataforma digital de manutenção? (atribua valores de 1 – menor interesse a 5- extremo interesse)**
 - (1) Sistemas de apoio para supervisão e monitoramento
 - (2) Componentes sensoriais para manutenção preventiva
 - (3) sistemas de assistência por meio de realidade aumentada
 - (4) Interface do componente visual (Modelo de simulação 3D)
 - (5) Sistemas de apoio à decisão para manutenção preditiva
 - (6) Outros:
 - (7) Não possui

13. Quais são as barreiras que mais impedem sua organização de avançar em projetos ou processos relacionados à manutenção no contexto da Indústria 4.0? ((atribua valores de 1 – menor interesse a 5- extremo interesse

- (1) Barreiras de adoção: tecnologias industriais antigas criam desalinhamentos com a implementação de novos equipamentos inteligentes; vários clientes seguem uma estratégia de custo que não é aderente a inovações, soluções inteligentes; falta de infraestrutura adequada, incluindo internet em algumas regiões do país. As preocupações com a segurança de dados limitam a adoção de produtos inteligentes pela indústria clientes.
- (2) Barreiras de cooperação: desafios contratuais e de compartilhamento de receitas para PMEs que desenvolvem soluções conjuntas; Comportamento cultural individualista de PMEs familiares.
- (3) Barreiras financeiras: Altos custos e investimentos para desenvolver *Smart Products*.
- (4) Outros:

14. De quais atores o ecossistema de manutenção oferecido pelo provedor da plataforma sua organização mais precisa? (múltipla-resposta)

- (1) Empresas Líderes
- (2) Desenvolvedores
- (3) Base de clientes finais
- (4) Provedores de Hardware
- (5) Outros:

15. Qual o melhor papel de uma plataforma digital para manutenção em relação a sua organização?

- (1) Promover cooperação entre os atores do ecossistema através da resolução de problemas sistemáticos
- (2) Alavancar a confiança em atores focais a fim de criar pontes entre cliente finais e fornecedores e facilitar a criação de propostas de valor por terceiros
- (3) Compartilhar conhecimento entre cooptadores de forma a proporcionar meios para a criação de valor e/ou melhorar o relacionamento com clientes
- (4) Proporcionar serviços de manutenção para os equipamentos e promove melhor relacionamento entre stakeholders relacionados com a utilização do maquinário de produção

16. Qual sua opinião sobre uma metodologia/ferramenta para mensurar o número de adotantes de uma proposta de valor da sua organização?

17. Sua organização implementa alguma metodologia para esta finalidade?

- Sim
- Não

18. Sua organização utiliza indicadores de desempenho no emprego de tecnologias para manutenção? Quais?

PARTE II - CATÁLOGO DE CRITÉRIOS

Avalie as características listadas abaixo, sob o ponto de vista da utilização de uma Plataforma Digital ideal para sua organização. Para isso, utilize a seguinte escala para atribuir a pontuação a cada uma das características listadas abaixo: **1 – Nenhuma Importância, 2 – Baixa importância, 3 – Importância Moderada, 4 – Muito Importante e 5 – Extremamente Importante.**

Legenda: MOD – Modularidade; SOB – *Service Oriented Business*; MNT – Manutenção; IA/ML – Inteligência Artificial / Aprendizado de Máquina; INT – Interoperabilidade; SEG – Segurança dos Dados; PRIV – Privacidade; e INF – Infraestrutura.

Código	Critério	Pontuação	Fonte
MOD1	Permite o uso de diferentes capacidades dos atores envolvidos, como desenvolvedores de software terceirizados ou fabricantes de sensores, de forma a reduzir os riscos.		Eloranta <i>et. al</i> (2016)
MOD2	Oferece flexibilidade para alterar as tarefas manutenções conforme a demanda pela utilização do equipamento, através do acoplamento e desacoplamento de módulos na produção. Com o aumento da flexibilidade aumenta-se a customização em massa.		Axelsson (2016) Eloranta (2016) Hermann (2015)
MOD3	Permite o uso e compartilhamento de micro serviços para fornecer modularidade para as aplicações.		Axelsson (2016), Hermann (2015)
MOD_PDI	Permite decidir quais módulos devem ser desenvolvidos por conta própria e quais devem ser desenvolvidos por empresas terceirizadas.		Farahzadi At. Al (2018),
INT1	Fornecer protocolos de comunicação adequados. Se concentra no estabelecimento de <i>gateways</i> que permitam a harmonização entre diferentes protocolos e sistemas operacionais.		Eloranta <i>et. al</i> (2016) Eklund (2014)
INT2	A plataforma adota/permite desenvolvimento de protocolos (como IPv6, TLS e HTTPS) e de arquiteturas seguras, minimização da superfície de ataque, adoção de padrões seguros (como o uso de prazos de expiração para senhas e de senhas complexas) e o uso de mecanismos de segurança “em camadas”.		Eklund (2014) Hermann (2015)
INT3	A plataforma permite a integração de micro serviços, oferecendo o (re)uso dos serviços, flexibilizando a implantação de novas malhas de controle e padronizando o acesso às informações dos equipamentos.		Eklund (2014) Hermann (2015)
INT_PDI	A plataforma permite o uso de diferentes capacidades dos atores envolvidos, como desenvolvedores de software terceirizados ou fabricantes de sensores, de forma a reduzir a complexidade. permitem sinergias entre todas as empresas envolvidas.		Eloranta <i>et. al</i> (2016) Eklund (2014)

(continua)

SEG1	Realiza exercícios, treinamentos de segurança cibernética com participação de múltiplos atores (internos e/ou externos ao ecossistema);		Gawer (2014) Mikusz (2014)
SEG2	A plataforma fornece/aplica soluções para os problemas de segurança da IoT que se aplicam a dispositivos desconectados, pois nem todos os objetos requerem conexão com a Internet para se comunicarem.		Gawer (2014)
SEG3	Permite que extensões de software sejam executadas em um ambiente <i>sandbox</i> com controle centralizado sobre o comportamento externo do software.		Axelsson <i>et al.</i> (2013) Eklund; Bosch (2014)
SEG_PDI	Opera em um nível avançado sobre direitos de acesso aos dados. Incluindo tópicos como responsabilidade, proteção de dados, segredos comerciais e distribuição adequada de lucros em projetos conjuntos entre diferentes empresas.		Gawer (2014) Mikusz (2014)
SOB1	Os serviços da plataforma e a interface devem ser compreensíveis e fáceis de usar para o usuário e por exemplo, a análise dos dados está disponível diretamente para o contratante tornando-os acessíveis em dispositivos móveis, a fim de melhorar a IU.		Axelsson;Skoglund (2016) Hohwieler <i>et. al</i> (2004) Tantik; Anderl (2017)
SOB2	Fornecer funcionalidades dos sistemas ERP, na forma de funções internas (<i>back-office</i>), tais como os recursos humanos, produção e finanças, e funções externas (<i>front-office</i>), tais como as vendas e serviços, além da tecnologia e gestão da cadeia de suprimento.		Hohwieler <i>et. al</i> (2004) Tantik; Anderl (2017)
SOB3	A plataforma assume um compromisso por um prestador de serviços perante um cliente serviço de TI a serem prestados, os níveis de qualidade a serem garantidos, as responsabilidades das partes e eventuais compensações quando os níveis de qualidade não forem atingidos.		Hohwieler <i>et. al</i> (2004) Tantik; Anderl (2017) Huth; Cebula (2011).
SOB_PDI	A plataforma emprega decisões automatizadas, através da incorporação de tecnologias de aprendizado de máquina e inteligência artificial, potencializando o surgimento de novas funções e mercados para a IIoT.		Brettel <i>et al.</i> (2017)
INF1	A plataforma emprega padrões técnicos compartilhados entre indústria, agências regulatórias, desenvolvedores e provedores, fornecendo interoperabilidade entre dispositivos. já que grande parte dos objetos, softwares e soluções baseiam-se em tecnologias com diferentes padrões técnicos.		Axelsson (2016) Hermann (2015)
INF2	A plataforma oferece soluções de teste como serviço, por exemplo, permitindo que um participante teste sua extensão em uma plataforma sem ter acesso direto à plataforma ou é projetada como um sistema de sistemas que conecta os próprios sistemas de teste dos diferentes atores.		Axelsson (2016) Bosch (2014)
INF3	Permite realizar um teste A / B de hipóteses de negócios antes de lançar o software publicamente. Outras colaborações entre participantes são possíveis para melhorar a penetração no mercado e experiência do usuário.		Bosch (2009) Eklund; Bosch (2014)

(continuação)

INF_PDI	As máquinas que fornecem informações sobre seu ciclo de trabalho. Os módulos da fábrica inteligente trabalharão de forma descentralizada a fim de aprimorar os processos de produção.		Brettel, <i>et al.</i> (2017)
PRIV1	A plataforma proporciona controles que protegem a confidencialidade da informação (ou seja, que o usuário acesse apenas informações para as quais está autorizado), sua integridade (assegurar que os dados ou informações não sejam indevidamente utilizadas ou modificadas) e disponibilidade para os usuários adequados, quando o acesso é solicitado.		Eloranta (2016) Axelsson (2016)
PRIV2	A plataforma utiliza padrões de criptografia de dados no estado da arte, medidas de proteção do hardware onde os dados são armazenados, além do uso de cópias de segurança dos dados, ou backup, e firewalls, que assegurem que estes diminuam as possibilidades de perda.		Huth; Cebula (2011)
PRIV3	Implementa regulações e princípios na coleta de dados, notificação, acesso, escolha e segurança, além de técnicas para minimizar (<i>data minimization</i>) a coleta de dados pessoais.		Tantik; Anderl (2017)
PRIV_PDI	Possui mecanismos de responsabilização para a coleta e tratamento de dados, facilitando o acesso de usuários às informações que os demais <i>stakeholders</i> acumulam a seu respeito. Por exemplo, um “direito à explicação” sobre como determinado algoritmo alcançou um resultado específico		Tantik; Anderl (2017)
IA/ML1	A plataforma suporta variabilidade na configuração de hardware de sensores e atuadores, uma vez que produtos/serviços individuais podem variar entre diferentes atores do ecossistema.		Thames
IA/ML2	A plataforma foca na Análise e inteligência de dados, possibilitada por avanços na inteligência artificial e aprendizado de máquina (machine learning). Isto favorece processos de digitalização e automação, assim como o desenvolvimento de métodos sofisticados de análise e estatística.		Huth; Cebula, (2011)
IA/ML3	A plataforma foca na Interação entre humanos e máquinas (<i>human to machine</i>), caracterizada principalmente pelo uso de dispositivos pessoais com interfaces sensíveis ao toque, reconhecimento de gestos e realidade aumentada; Conversão digital-para-o-físico, representada pela robótica avançada, promovendo uma combinação de custos mais baixos, disponibilidade de materiais diversos e avanços na precisão e qualidade.		Huth; Cebula (2011)
IA/ML_PDI	Capacidade de operação em tempo real. Refere-se a aquisição e tratamento de dados praticamente instantânea, com tomada de decisões em tempo real.		Huth; Cebula (2011)
MNT1	Fornecer a possibilidade de interagir enviando ordens de manutenção a partir de uma resposta aos dispositivos IOT.		Farahzadi <i>et. al</i> (2018) Tantik; Anderl (2017)

(continua)

(continuação)

MNT2	Fornecer funções de diagnóstico de falha e previsão de ciclo de vida e cobrir uma variedade de modelos de previsão. Ele pode selecionar um ou mais modelos com rapidez e precisão para o tipo de equipamento e mecanismo de falha. Com o suporte de aprendizado de máquina e inteligência artificial, a plataforma pode realizar a auto-otimização do modelo e melhorar constantemente a confiança na previsão.		Brettel, <i>et al.</i> (2017). Tantik; Anderl (2017)
MNT3	Possui modelo de otimização conjunta de manutenção preditiva e gerenciamento de peças de reposição. Exemplos, intervalo de manutenção, limite de manutenção e limite de pedido de peças de reposição, metas de otimização, fornecendo recomendações de decisão de manutenção preditiva.		Tantik; Anderl (2017)
MNT_PDI	Permite a cópia virtual das fábricas inteligentes, com possibilidade de rastreabilidade e monitoramento remoto dos processos.		Brettel <i>et al.</i> (2017).

Obrigado por sua participação!

Após o preenchimento, envie este formulário para *****@gmail.com

ANEXO A – HÁBITOS DO PENSADOR SISTÊMICO

Prática	Descrição
Big Picture	Um pensador sistêmico “recua” para examinar a dinâmica de um sistema e as inter-relações entre suas partes. Olha-se a floresta, em vez dos detalhes de qualquer árvore. Para entender a estrutura do sistema, é necessário analisar todos os elementos, não apenas um.
Mude com o tempo	Os sistemas dinâmicos são compostos de elementos interdependentes, cujos valores mudam ao longo do tempo. O status e o desenvolvimento são regidos por elementos que mudam ao longo do tempo, como riscos, infraestrutura e governança.
Estrutura do sistema	Concentrar-se na estrutura do sistema facilita a compreensão dos resultados do sistema (ou seja, a estrutura determina o comportamento).
Interdependências	Um pensador sistêmico sabe que as relações causa-efeito dentro de sistemas dinâmicos são circulares e não lineares. Relações complexas de causa e efeito incluem <i>feedbacks</i> de equilíbrio, no qual o sistema está tentando alcançar e manter uma meta, por exemplo.
Conexões	Um pensador de sistemas intencionalmente faz conexões para entender melhor as relações nos sistemas. Um pensador sistêmico cria significado considerando como as novas informações se conectam ao conhecimento anterior, adicionando, modificando, transferindo e sintetizando as informações em uma compreensão mais profunda.
Mude as perspectivas	Para entender como um sistema dinâmico realmente funciona, um pensador de sistemas analisa o sistema de vários ângulos e perspectivas diferentes, talvez em colaboração com outros. Uma estratégia pode não funcionar para todas as situações, países ou culturas, portanto, várias perspectivas são necessárias.
Suposições	É crucial entender como e por que suposições são feitas, crenças são desenvolvidas e ações são tomadas com base em dados percebidos para evitar suposições incorretas. Uma estratégia de implementação baseada em suposições incorretas pode ultrapassar orçamentos, não obter resultados desejados, criar riscos ou falhar completamente.
Considera totalmente os problemas	Um pensador sistêmico é paciente e entende que levará tempo para entender a estrutura do sistema e seus comportamentos antes de recomendar e implementar um curso de ação. Um pensador sistêmico também entende que sucumbir ao desejo de uma solução rápida pode criar mais problemas a longo prazo.
Modelos mentais	Em qualquer situação, um indivíduo percebe e interpreta o que está acontecendo, criando assim uma imagem, ou modelos mentais, que são compostos de suposições, crenças e valores que as pessoas mantêm, às vezes por toda a vida. Um pensador

(continua)

	sistêmico está ciente de como esses modelos mentais influenciam as perspectivas e, em última análise, quaisquer ações tomadas.
Alavancas	Com base no entendimento da estrutura, interdependências e <i>feedback</i> dentro de um sistema, um pensador sistêmico buscar interferir nas alavancas que parecem mais prováveis de produzir resultados desejáveis. A identificação de pontos de alavancagem são os locais em que as políticas devem ser focalizadas.
Consequências	Antes de agir para mudar um sistema dinâmico, um pensador sistêmico pesa os possíveis resultados de curto, longo prazo e não intencionais das estratégias a serem adotadas.
Acumulações	Os sistemas são compostos de muitos elementos, incluindo acumulações, ou seja, quantidades que podem aumentar e diminuir ao longo do tempo e suas taxas de variação (população, dinheiro, infraestrutura, etc.).
Atrasos	Um pensador sistêmico reconhece que quando uma ação é realizada dentro de um sistema complexo e dinâmico, o resultado da ação pode não ser visto por algum tempo. Por exemplo, uma política que envolve a construção de infraestrutura de TI leva muito tempo e investimento antes que possa ser utilizada.
Aproximações sucessivas	Ao tentar uma solução e depois avaliar (monitorar e avaliar) os resultados, a compreensão do problema aumentará. Com o tempo, cada ciclo ou aproximação sucessiva, de verificação de resultados e mudança de ações, se necessário, aproximará o sistema de um objetivo desejado. Os efeitos desejados e reais normalmente não são os mesmos quando uma política ou estratégia é implementada, portanto, os resultados precisam ser monitorados. Às vezes, correções de curso devem ser feitas para aproximar os efeitos desejados dos reais.

Fonte: Benson e Marlin (2017)

APÊNDICE B - FONTES DE DADOS UTILIZADAS

Fonte	Categoria	Nome do Estudo e Conteúdo
Markets and Markets (2021)	Expectativas de Mercado	<p>INDUSTRY 4.0 MARKET BY TECHNOLOGY</p> <p>Apresenta os principais fatores que impulsionam o crescimento do mercado da indústria 4.0 incluem a rápida adoção de Inteligência Artificial (AI) e Internet das Coisas (IoT) no setor de manufatura, aumento da demanda por robôs industriais no setor de fabricação de dispositivos médicos e farmacêuticos, aumento dos investimentos governamentais em adoção da tecnologia <i>blockchain</i> na indústria de manufatura. Além disso, espera-se que o aumento da aplicação de IA e IoT em <i>wearables</i> médicos crie uma oportunidade de crescimento para o mercado da indústria 4.0.</p>
Fortune Business Insights (2020)	Relatório Prospectivo	<p>FACTORY AUTOMATION – INDUSTRY 4.0</p> <p>A plataforma apresenta o desenvolvimento das tecnologias I4.0 por segmento e por aplicação vertical e ainda apresenta previsões regionais para o mercado de tecnologias industriais.</p>
Mordor Intelligence (2021)	Relatório Prospectivo	<p>INDUSTRY 4.0 MARKET - GROWTH, TRENDS, COVID-19 IMPACT, AND FORECASTS (2022 - 2027)</p> <p>Apresenta O mercado da Indústria 4.0 é segmentado por Tipo de e Geografia. O Sumário executivo apresenta indicadores da evolução da IA no ambiente industrial. O sumário apresenta gráficos com séries históricas mercado.</p>
Market Data Forecast (2021)	Relatório Prospectivo	<p>INDUSTRY 4.0 MARKET SIZE SHARE DEMAND ANALYSIS 2021 – 2026</p> <p>APRESENTA O Mercado segmentado por Tecnologia, por Conectividade, por usuário final (e por região, , além disso, o crescimento, tamanho, participação, tendências, impacto do COVID-19 e previsão (2021-2026).</p>
PriceWaterhouseCoopers (2016)	Survey	<p>INDUSTRY 4.0: BUILDING THE DIGITAL ENTERPRISE</p> <p>Relatório com mais de 2.000 participantes de empresas em nove grandes indústrias setores e 26 países. Os resultados apresentam oito tendências para a I4.0. Apresenta também, estratégia para assumir a implementação de ecossistemas digitais.</p>
Deloitte Industry4.0 and manufacturing ecosystems (2017)	Relatório Prospectivo	<p>INDUSTRY 4.0 AND MANUFACTURING ECOSYSTEMS</p> <p>O Relatório Identifica duas áreas estratégicas para aumentar a negócios e operar os negócios – e seis áreas-chave que abrangem as principais oportunidades para os provedores de tecnologias da Indústria 4.0. Além disto, apresenta desafios na implementação da indústria 4.0.</p>

Fonte: elaborado pelo autor

ANEXO B - ALGORITMO PARA CÁLCULO DA RAZÃO DE INFLUÊNCIA

	$I > 0$	$I = 0$	$I < 0$
$D < 0$	$IR = \frac{I_x}{D_x}$	$IR = 0$	
$D = 0$	$IR = n$		
$D > 0$	$IR = \frac{I_x}{I_x + D_x }$	$IR = \frac{1}{n}$	$IR = \frac{D_x}{I_x}$

Fonte: adaptado de Zelinka e Amadei (2019)

Onde:

D , Índice de Dependência

I , Índice de Influência

IR , Razão de Influência

n , número de variáveis no sistema

APÊNDICE C – CONFIGURAÇÕES DA PDI

<i>Stakeholder</i>	CONFIG1*	CONFIG2	CONFIG3	CONFIG_PDI	NORMALIZAÇÃO**	CONFIG1***	CONFIG2	CONFIG3	CONFIG_PDI
1	27	38	25	21	56,912	0,474	0,668	0,439	0,369
2	19	30	19	19	44,531	0,427	0,674	0,427	0,427
3	21	35	19	19	48,867	0,430	0,716	0,389	0,389
4	22	36	18	20	50,040	0,440	0,719	0,360	0,400
5	25	32	21	23	51,176	0,489	0,625	0,410	0,449
MEDIANA						0,44	0,67	0,41	0,40

Fonte: elaborado pelo autor

*(1) soma das pontuações referentes aos atributos de cada configuração

** (2) resultado obtido do processo de normalização (Equação 2)

*** razão entre (1) e (2)

APÊNDICE D - PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Experimento	Configuração da PDI			Cenários			
	Config1	Config2	Config3	C1	C2	C3	C4
1	0	0	0	1	0	0	0
2	0	0	0	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	1
5	1	0	0	1	0	0	0
6	1	0	0	0	1	0	0
7	1	0	0	0	0	1	0
8	1	0	0	0	0	0	1
9	0	1	0	1	0	0	0
10	0	1	0	0	1	0	0
11	0	1	0	0	0	1	0
12	0	1	0	0	0	0	1
13	0	0	1	1	0	0	0
14	0	0	1	0	1	0	0
15	0	0	1	0	0	1	0
16	0	0	1	0	0	0	1

Fonte: elaborado pelo autor

APÊNDICE E – FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA O MODELO

$$\text{ADOTANTES}(t) = \text{ADOTANTES}(t - dt) + (\text{Txa_de_Conversão_Adotantes} - \text{Perda_de_Adotantes}) * dt$$

$$\text{INIT ADOTANTES} = 3$$

UNITS: Clientes

INFLOWS:

$$\text{Txa_de_Conversão_Adotantes} =$$

$$\text{ADOTANTES_POTENCIAIS} * \text{Adoção_p_Indicação} / (\text{Tempo_p_Conversão})$$

UNITS: Clientes/Anos

OUTFLOWS:

$$\text{Perda_de_Adotantes} = \text{ADOTANTES} * \text{Efeito_da_Reputação_em_adotantes} / \text{Atraso_p_Abandonar}$$

UNITS: Clientes/Anos

$$\text{ADOTANTES_POTENCIAIS}(t) = \text{ADOTANTES_POTENCIAIS}(t - dt) +$$

$$(\text{Txa_de_Conversão_Adot_Potenciais} - \text{Txa_de_Conversão_Adotantes} -$$

$$\text{Perda_de_Adotantes_Potenciais}) * dt$$

$$\text{INIT ADOTANTES_POTENCIAIS} = \text{Mercado-ADOTANTES}$$

UNITS: Clientes

INFLOWS:

$$\text{Txa_de_Conversão_Adot_Potenciais} = \text{ADOTANTES_POTENCIAIS} * \text{Efeito_do_Preço_Relativo}$$

UNITS: Clientes/Anos

OUTFLOWS:

$$\text{Txa_de_Conversão_Adotantes} =$$

$$\text{ADOTANTES_POTENCIAIS} * \text{Adoção_p_Indicação} / (\text{Tempo_p_Conversão})$$

UNITS: Clientes/Anos

$$\text{Perda_de_Adotantes_Potenciais} =$$

$$\text{ADOTANTES_POTENCIAIS} * \text{Efeito_da_Reputação_em_adotantes_potenciais}$$

UNITS: Clientes/Anos

$$\text{Índice_de_Desempenho_da_PDI}(t) = \text{Índice_de_Desempenho_da_PDI}(t - dt) + * dt$$

$$\text{INIT Índice_de_Desempenho_da_PDI} = 0.67$$

UNITS: Adimensional

$$\text{Preço_da_Plataforma_Concorrente}(t) = \text{Preço_da_Plataforma_Concorrente}(t - dt) +$$

$$(\text{"Mudança_no_Preço_concorrentes"}) * dt$$

$$\text{INIT Preço_da_Plataforma_Concorrente} = 6970$$

UNITS: Reais (R\$)

INFLOWS:

$$\text{"Mudança_no_Preço_concorrentes"} = (\text{Preço_da_PDI-}$$

$$\text{Preço_da_Plataforma_Concorrente}) / \text{"Tempo_para_ajuste_dos_custos_concorrentes"}$$

$$\text{Reputação}(t) = \text{Reputação}(t - dt) + * dt$$

$$\text{INIT Reputação} = 0.80 * \text{Reputação}^2$$

UNITS: Adimensional

$$\text{Reputação}^2(t) = \text{Reputação}^2(t - dt) + * dt$$

$$\text{INIT Reputação}^2 = 1 - \text{Índice_de_Desempenho_da_PDI}$$

UNITS: Adimensional

(continua)

Adocao_p_Indicação = ADOTANTES*(ADOTANTES_POTENCIAIS/Mercado)*Fracao_de_Adocão

UNITS: Adimensional

Atraso_p_Abandonar = RANDOM(3, 5)

UNITS: Anos

Efeito_da_Reputação_em_adotantes = GRAPH(Reputação2)

(0,0000, 0,379), (0,0800, 0,388), (0,1600, 0,406), (0,2400, 0,429), (0,3200, 0,479), (0,4000, 0,534),
(0,4800, 0,699), (0,5600, 0,900), (0,6400, 0,973), (0,7200, 0,995), (0,8000, 1,000)

UNITS: Adimensional

Efeito_da_Reputação_em_adotantes_potenciais = GRAPH(Reputação)

(0,000, 0,196), (0,100, 0,210), (0,200, 0,233), (0,300, 0,269), (0,400, 0,301), (0,500, 0,342), (0,600,
0,379), (0,700, 0,443), (0,800, 0,525), (0,900, 0,630), (1,000, 0,753)

UNITS: Adimensional

Efeito_do_Preço_Relativo = GRAPH(Preço_Relativo)

(0,000, 0,977), (0,08333333333333, 0,954), (0,1666666666667, 0,932), (0,250, 0,904), (0,3333333333333,
0,872), (0,4166666666667, 0,836), (0,500, 0,785), (0,5833333333333, 0,703), (0,6666666666667, 0,562),
(0,750, 0,215), (0,8333333333333, 0,100), (0,9166666666667, 0,037), (1,000, 0,014)

UNITS: Adimensional

Fracao_de_Adocão = GRAPH(Índice_de_Desempenho_da_PDI)

(0,000, 0,0008), (0,100, 0,00137), (0,200, 0,0024), (0,300, 0,00331), (0,400, 0,00479), (0,500, 0,00685),
(0,600, 0,00982), (0,700, 0,01267), (0,800, 0,01644), (0,900, 0,02055), (1,000, 0,025)

UNITS: Adimensional

Mercado = 148

UNITS: Clientes

Preço_da_PDI = 7960

UNITS: Reais (R\$)

Preço_Relativo = Preço_da_PDI/Preço_da_Plataforma_Concorrente

UNITS: Reais (R\$)/Reais (R\$)

Tempo_p_Conversao = RANDOM(0.4, 0.6)

UNITS: Anos

"Tempo_para_ajuste_dos_custos_(concorrentes)" = RANDOM(0.75, 1.20)

UNITS: Anos

{ The model has 22 (22) variables (array expansion in parens).

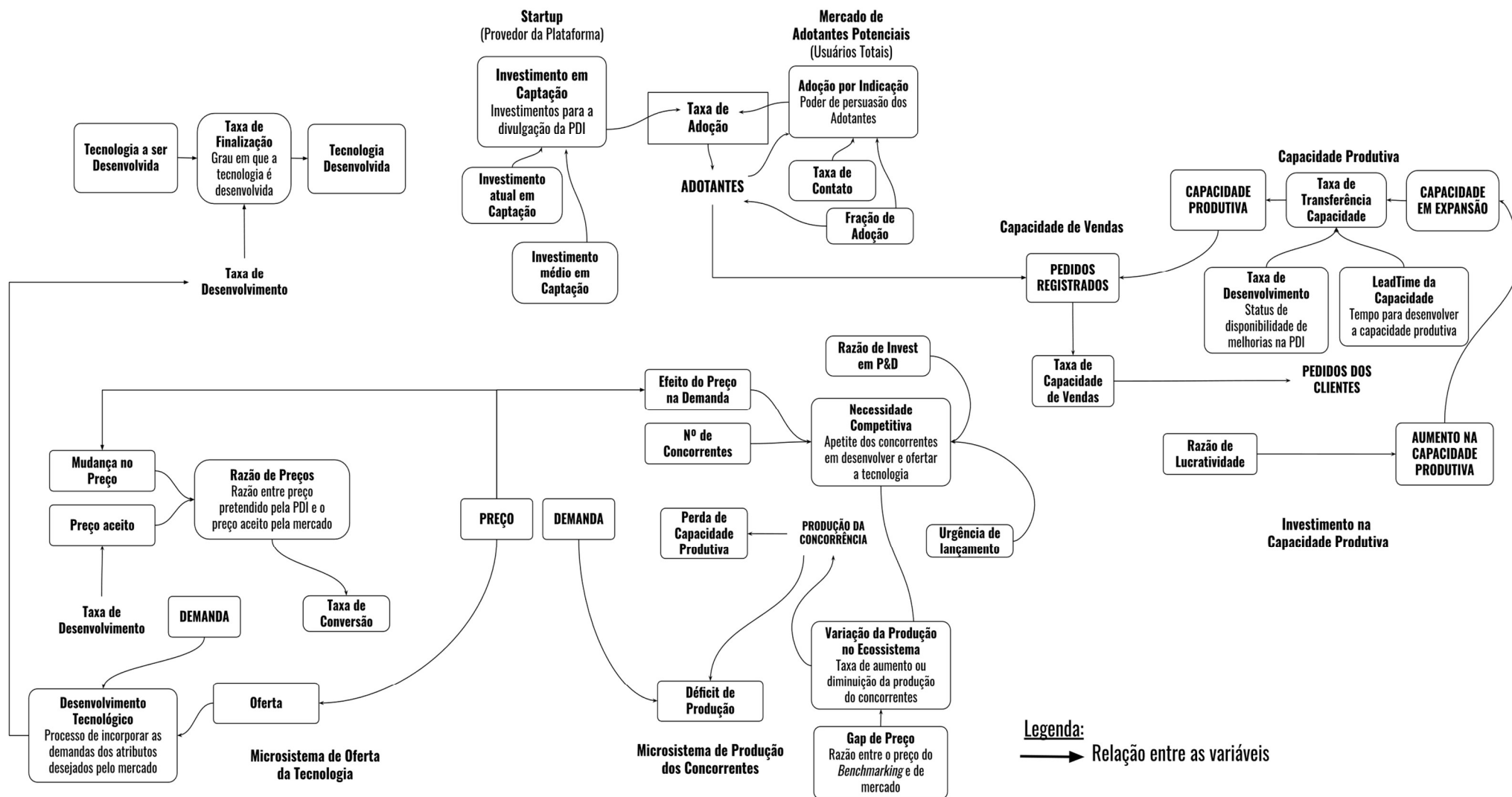
In 1 Modules with 0 Sectors.

Stocks: 6 (6) Flows: 5 (5) Converters: 11 (11)

Constants: 2 (2) Equations: 14 (14) Graphicals: 4 (4)

}

APÊNDICE F – DIAGRAMAS DE ESTRUTURA SISTÊMICA



Fonte: elaborado pelo autor

APÊNDICE G – EXTRATO DA MATRIZ DE IMPACTO

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> Menu Principal CLD CTM CTM Caixa Mágica Variáveis x Sistema </div>					<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Adoção de Big D, IoT e Nuvem</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Emergência de IoT</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Infraestrutura Digital</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Orçamento Disponível</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Necessidade de Reduzir Custos de Manutenção e Inatividade</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Qualidade e Gerenciamento dos Dados (INF/IA-ML)</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Apoio Financeiro</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">ADOÇÃO DA PDI</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Avanços Tecnológicos</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Controle de Qualidade do Processo Produtivo</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Desempenho da PDI</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Monitoramento de Parâmetros Ambientais</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Transparança</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Capacitação e Treinamento</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Custos de Adaptação</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Ajuste à Normas e Regulamentação</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Questões Legais</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Relatório de Informa</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Ve</div> </div>																						
Influência	Dependência	IL	RI	IP	Código	Descrição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
6	5	1	0,55	0,42	1	Adoção de Big D, IoT e Nuvem	1		1	3	2																
2	1	1	0,67	0,42	2	Emergência de IoT	2				2																
8	8	0	0,50	0,40	3	Infraestrutura Digital	3					3															
2	7	-5	0,22	0,31	4	Orçamento Disponível	4						2														
5	2	3	0,71	0,45	5	Necessidade de Reduzir Custos de Manutenção e Inatividade	5							3	2												
11	9	2	0,55	0,43	6	Qualidade e Gerenciamento dos Dados (INF/IA-ML)	6									2	3	3	3								
9	4	5	0,69	0,48	7	Apoio Financeiro	7	2							2						3	2					
3	18	-15	0,14	0,14	8	ADOÇÃO DA PDI	8																			3	
6	2	4	0,75	0,47	9	Avanços Tecnológicos	9																				
1	4	-3	0,20	0,35	10	Controle de Qualidade do Processo Produtivo	10																		1		
3	26	-23	0,10	0,00	11	Desempenho da PDI	11								3												

Fonte: elaborado pelo autor

APÊNDICE H – EXTRATO DA MATRIZ DE TEMPO

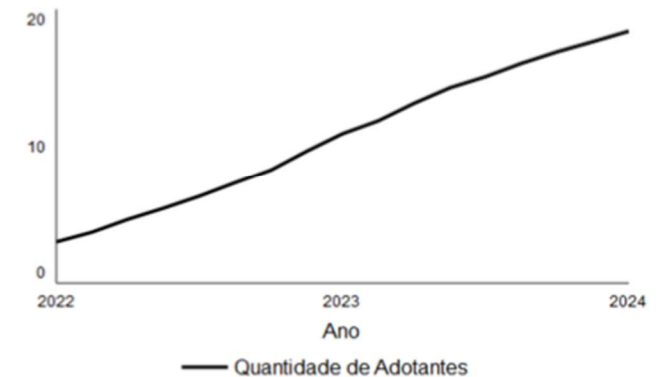
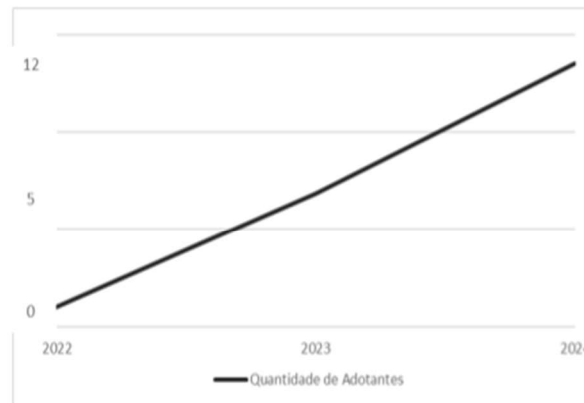
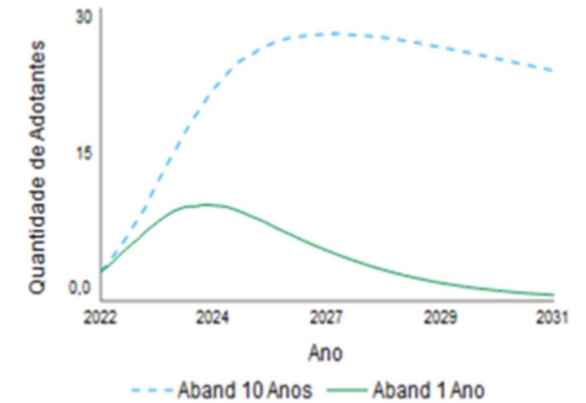
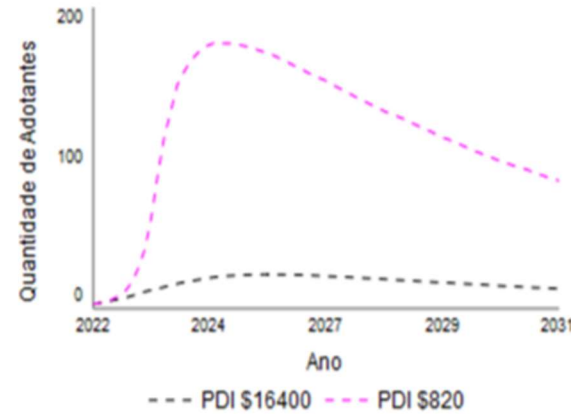
		<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div style="display: flex; gap: 10px;"> Menu Principal CLD </div> <div style="display: flex; gap: 10px;"> CTM CTM Caminho Mísera Variáveis x Sistema </div> </div> <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> Adoção de Big D, IoT e Nuvem Emergência de IoT Infraestrutura Digital Orçamento Disponível Necessidade de Reduzir Custos de Manutenção e Inatividade Qualidade e Gerenciamento dos Dados (INF/IA-ML) Apoio Financeiro ADOÇÃO DA PDI Avanços Tecnológicos Controle de Qualidade do Processo Produtivo Desempenho da PDI Monitoramento de Parâmetros Ambientais Transparência Capacitação e Treinamento Ajuste à Normas e Regulamentação Questões Legais Relatório de Informações Vendas/Receita Comprometimento da Gerência Visão e Estratégia Digital Investimento em P&D Eficiência Benefícios Econômicos Poup Custos Oper. Manu Resu </div> </div>																										
Código	Descrição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
1	Adoção de Big D, IoT e Nuvem	1	3	1	1																							
2	Emergência de IoT	2				3																						
3	Infraestrutura Digital	3					3																					
4	Orçamento Disponível	4						3																				
5	Necessidade de Reduzir Custos de Manutenção e Inatividade	5							5	5																		
6	Qualidade e Gerenciamento dos Dados (INF/IA-ML)	6									1	1	1	3														
7	Apoio Financeiro	7	3						3						1	1												
8	ADOÇÃO DA PDI	8																			3							
9	Avanços Tecnológicos	9																										
10	Controle de Qualidade do Processo Produtivo	10																		1								
11	Desempenho da PDI	11							3																			

Fonte: elaborado pelo autor

APÊNDICE I – TESTES DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Para o **teste de valores extremos** (figuras superiores), percebe-se que o modelo atende às expectativas quando os parâmetros são alterados. No primeiro caso, o preço da PDI é alterado, e em resposta, o número de adotantes é bastante exagerado quando a PDI é ofertada a um valor extremamente baixo (R\$820). O oposto também ocorre quando o preço da PDI (R\$16400) é o dobro daquele praticado pelos concorrentes. As mesmas conclusões podem ser obtidas quando na alteração da variável “tempo para abandonar”. Além disso, como mencionado, o modelo repete, em todos os casos, o padrão previsto na teoria DOI.

Para o **teste de ajuste visual**, os resultados gerados no Excel (inferior esquerda) são visualmente aderentes ao gerado no modelo (inferior direita). Contudo, menciona-se aqui, que o período selecionado é relativamente curto em relação ao horizonte temporal do modelo (10anos). Além desse período selecionado para o teste, seriam necessárias modelagens matemáticas objetivando replicar toda a curva de adoção.



Fonte: elaborado pelo autor