

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS  
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS

**RAIANNY SOUZA FERNANDES**

**MODELO DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 4.0 EM EMPRESAS  
DO ESPÍRITO SANTO**

Vitória  
2024

RAIANNY SOUZA FERNANDES

**MODELO DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 4.0 EM EMPRESAS  
DO ESPÍRITO SANTO**

Projeto de Pesquisa apresentado ao Programa de Pós-graduação em Tecnologias Sustentáveis como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Sustentáveis.

Linha de pesquisa: Otimização de Serviços, Sistemas e Processos.

Orientador: Prof. Dr. Mário Mestria.

Vitória

2024

F363m Fernandes, Raianny Souza.

Modelo de avaliação de maturidade da indústria 4.0 em empresas do Espírito Santo / Raianny Souza Fernandes. – 2024.

159 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Mário Mestria.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-graduação em Tecnologias Sustentáveis, Vitória, 2024.

1. Indústrias – Inovações tecnológicas. 2. Administração de projetos. 3. Empresas – Inovações tecnológicas. 4. Cultura organizacional. 5. Indústrias – Evolução. 6. Sustentabilidade e meio ambiente. I. Mestria, Mário. II. Instituto Federal do Espírito Santo. III. Título.

CDD 21 – 658.514

**RAIANNY SOUZA FERNANDES**

**MODELO DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE DA INDÚSTRIA 4.0  
EM EMPRESAS DO ESPÍRITO SANTO**

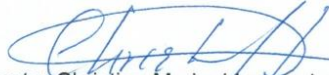
Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Tecnologias Sustentáveis, vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Sustentáveis do Instituto Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Sustentáveis.

Aprovada em 26 de abril de 2024

**COMISSÃO EXAMINADORA**



Doutor Mario Mestria  
Instituto Federal do Espírito Santo - Ifes  
Orientador



Doutor Christian Mariani Lucas dos Santos  
Instituto Federal do Espírito Santo - Ifes  
Membro Interno



Doutor Tiago José Menezes Gonçalves  
Instituto Federal do Espírito Santo - Ifes  
Membro Interno



Doutor José Barrozo de Souza  
Universidade Federal do Espírito Santo - Ufes  
Membro Externo

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Mário Mestria, orientador desta dissertação, por todo auxílio e compreensão no desenvolvimento do estudo. Agradeço pelo incentivo, pela paciência e confiança em mim depositada.

Agradeço a Deus e à minha família pelo apoio, principalmente à minha mãe, Ângela, pela paciência, compreensão e ajuda em todas as etapas do desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço aos professores do Departamento de Pós-Graduação em Tecnologias Sustentáveis do IFES.

E, por fim, agradeço aos professores da banca, pelas orientações e dedicação à leitura deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho propõe um modelo de maturidade para orientar o processo de implementação da Indústria 4.0 nas empresas. Assim, busca-se entender como propor um modelo de maturidade para ajudar as organizações a analisar melhor o processo de implementação da I4.0. Para tanto, uma extensa revisão de literatura foi realizada, com foco na busca por modelos de maturidade e por fatores críticos de sucesso, desafios e benefícios da implementação da Indústria 4.0. Assim, foi possível elaborar uma proposta de modelo de maturidade contendo as dimensões “Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional”, “Equipe de Trabalho” e “Tecnologia”, além de 30 elementos e cinco níveis de maturidade. Em seguida, um levantamento de dados foi feito com o uso de questionários que foram aplicados em 17 empresas no Espírito Santo, contendo 25 respondentes. Como resultado, o grau de maturidade das empresas avaliadas foi medido em 59,7%, com um nível intermediário de maturidade. O modelo proposto pode contribuir para a análise de maturidade da Indústria 4.0 nas empresas.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Manufatura Inteligente. Modelo de Maturidade. Tecnologias Digitais.

## **ABSTRACT**

This paper proposes a maturity model to guide the process of implementing Industry 4.0 in companies. The aim is therefore to understand how to propose a maturity model to help organizations better analyze the I4.0 implementation process. To this end, an extensive literature review was carried out, focusing on the search for maturity models and critical success factors, challenges and benefits of implementing Industry 4.0. As a result, it was possible to draw up a proposal for a maturity model containing the dimensions "Strategy, Culture and Organizational Innovation", "Work Team" and "Technology", as well as 30 elements and five levels of maturity. Data was then collected using questionnaires that were applied to 17 companies in Espírito Santo, with 25 respondents. As a result, the degree of maturity of the companies assessed was measured at 59.7%, with an intermediate level of maturity. The proposed model can contribute to the analysis of Industry 4.0 maturity in companies.

Palavras-chave: Industry 4.0. Smart Manufacturing. Maturity Model. Digital Technologies.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Evolução da indústria.....	18
Figura 2- Tecnologias da I4.0.....	19
Figura 3- Dispositivo IoT .....	23
Figura 4- Etapas de processo de Manufatura Aditiva.....	27
Figura 5- Campos da Inteligência Artificial .....	34
Figura 6- Pedidos de patentes entre 2008 e 2017 .....	38
Figura 7- Evolução das tecnologias habilitadoras da I4.0 .....	39
Figura 8- Aplicações da Indústria 5.0 .....	44
Figura 9- Metodologia do estudo.....	69
Figura 10- Representação do modelo .....	72
Figura 11- Cargo dos respondentes.....	79
Figura 12- Setores dos respondentes .....	80
Figura 13- Estratégias ou planos para I4.0 .....	83
Figura 14- I4.0 na estratégia de negócios .....	84
Figura 15- Investimentos em I4.0 .....	85
Figura 16- Promoção da inovação I4 .....	86
Figura 17- Uso de KPIs na I4.0 .....	87
Figura 18- Treinamento dos funcionários para I4.0.....	88
Figura 19- Conhecimentos e habilidades dos funcionários da I4.0 .....	89
Figura 20- Autonomia e criatividade para inovar .....	90
Figura 21- Abertura para sugerir mudanças.....	91
Figura 22- Infraestrutura para I4.0.....	92
Figura 23- Uso de dados em tempo real .....	93
Figura 24- Segurança dos dados .....	94
Figura 25- Personalização dos produtos.....	95
Figura 26- Tecnologias disruptivas I4.0.....	96
Figura 27- Gráfico de radar I4.0 .....	98
Figura 28- Gráfico de radar da dimensão Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional .....	100
Figura 29- Gráfico de radar da dimensão Equipe de Trabalho.....	101
Figura 30- Gráfico de radar da dimensão Tecnologia .....	102

Figura 31- Gráfico de radar da dimensão Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional – Setor de Mineração .....	106
Figura 32- Gráfico de radar da dimensão Equipe de Trabalho – Setor de Mineração.....	107
Figura 33- Gráfico de radar da dimensão Tecnologia – Setor de Mineração. ...	108
Figura 34- Gráfico de radar da dimensão Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional – Setor Elétrico .....	111
Figura 35- Gráfico de radar da dimensão Equipe de Trabalho – Setor Elétrico.....	112
Figura 36- Gráfico de radar da dimensão Tecnologia – Setor Elétrico.....	113
Figura 37- Gráfico de radar da dimensão Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional – Setor de TI.....	116
Figura 38- Gráfico de radar da dimensão Equipe de Trabalho – Setor de TI...	117
Figura 39- Gráfico de radar da dimensão Tecnologia – Setor de TI.....	118
Figura 40- Gráfico de radar da dimensão Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional – Setor de Metalurgia .....	121
Figura 41- Gráfico de radar da dimensão Equipe de Trabalho – Setor de Metalurgia.....	122
Figura 42- Gráfico de radar da dimensão Tecnologia – Setor de Metalurgia ...	123
Figura 43- ráfico de radar da dimensão Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional – Setor de Siderurgia.....	126
Figura 44- Gráfico de radar da dimensão Equipe de Trabalho – Setor de Siderurgia.....	127
Figura 45- Gráfico de radar da dimensão Tecnologia – Setor de Siderurgia ...	128
Figura 46- Comparativo dos setores – Dimensão Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional .....	130
Figura 47- Comparativo dos setores – Dimensão Equipe de Trabalho .....	131
Figura 48- Comparativo dos setores – Dimensão Tecnologia.....	132

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Trabalhos de Big Data e Indústria 4.0 .....	21
Quadro 2- Trabalhos de IoT e Indústria 4.0.....	23
Quadro 3- Trabalhos de Computação em Nuvem e Indústria 4.0 .....	25
Quadro 4- Trabalhos de Manufatura Aditiva e Indústria 4.0 .....	27
Quadro 5- Trabalhos de Realidade Aumentada e Indústria 4.0 .....	29
Quadro 6- Trabalhos de Simulação e Indústria 4.0 .....	30
Quadro 7- Trabalhos de Robótica e Indústria 4.0.....	32
Quadro 8- Trabalhos de Inteligência Artificial e Indústria 4.0. ....	34
Quadro 9- Trabalhos de Segurança Cibernética e Indústria 4.0 .....	36
Quadro 10- Patentes e Indústria 4.0 .....	39
Quadro 11- Trabalhos de Indústria 5.0.....	45
Quadro 12- Fatores críticos de sucesso da Indústria 4.0 .....	46
Quadro 13- Resumo dos desafios da I4.0.....	48
Quadro 14- Comparativo dos modelos de maturidade sobre I4.0 .....	59
Quadro 15- Desenvolvimento do trabalho.....	67
Quadro 16- Dimensões e elementos do modelo de maturidade .....	74
Quadro 17- Atribuição de pesos.....	77
Quadro 18- Nível de maturidade .....	78
Quadro 19- Resultados do questionário.....	81
Quadro 20- Pergunta 10 – resultados .....	82
Quadro 21- Pergunta 14 – resultados .....	82
Quadro 22- Índice local de maturidade dos elementos .....	97
Quadro 23- Índice de maturidade das dimensões.....	99
Quadro 24- Índice geral de maturidade.....	103
Quadro 25- Funções dos respondentes .....	105
Quadro 26- Índice local de maturidade dos elementos – Setor de Mineração .	105
Quadro 27- Índice de maturidade das dimensões – Setor de Mineração.....	106
Quadro 28- Índice geral de maturidade – Setor de Mineração.....	109
Quadro 29- Funções dos respondentes .....	109
Quadro 30- Índice local de maturidade dos elementos – Setor Elétrico.....	110
Quadro 31- Índice de maturidade das dimensões – Setor Elétrico .....	110
Quadro 32- Índice geral de maturidade – Setor Elétrico .....	114

Quadro 33- Funções dos respondentes .....	114
Quadro 34- Índice local de maturidade das dimensões – Setor de TI.....	115
Quadro 35- Índice de maturidade das dimensões – Setor de TI .....	115
Quadro 36- Índice geral de maturidade – Setor de TI .....	119
Quadro 37- Funções dos respondentes .....	120
Quadro 38- Índice local de maturidade dos elementos – Setor de Metalurgia .	120
Quadro 39- Índice de maturidade das dimensões – Setor de Metalurgia.....	121
Quadro 40- Índice geral de maturidade – Setor de Metalurgia.....	124
Quadro 41- Funções dos respondentes .....	124
Quadro 42- Índice local de maturidade dos elementos – Setor de Siderurgia .	125
Quadro 43- Índice de maturidade das dimensões – Setor de Siderurgia .....	125
Quadro 44- Índice geral de maturidade – Setor de Siderurgia .....	129

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	12
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	15
2.1	OBJETIVO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
<b>3</b>	<b>PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES</b>	16
<b>4</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	17
4.1	EVOLUÇÃO DA INDÚSTRIA	17
4.2	INDÚSTRIA 4.0	18
4.3	BIG DATA	20
4.4	INTERNET DAS COISAS	22
4.5	COMPUTAÇÃO EM NUVEM	24
4.6	MANUFATURA ADITIVA	26
4.7	REALIDADE AUMENTADA	28
4.8	SIMULAÇÃO	30
4.9	ROBÓTICA	32
4.10	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	33
4.11	SISTEMAS DE SEGURANÇA CIBERNÉTICA	35
4.12	ANÁLISE DE PATENTES	37
4.13	CONTRIBUIÇÃO INSTITUTO-INDÚSTRIA	40
4.14	INDÚSTRIA 5.0	42
4.15	FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO, DESAFIOS E BENEFÍCIOS DA I4.0	46
<b>4.15.1</b>	<b>Fatores críticos de sucesso da I4.0</b>	46
<b>4.15.2</b>	<b>Benefícios da I4.0</b>	47
<b>4.15.3</b>	<b>Desafios da I4.0</b>	48
4.16	MODELOS DE MATURIDADE	50
<b>4.16.1</b>	<b>Visão geral</b>	50
<b>4.16.2</b>	<b>Análise dos modelos de maturidade da I4.0</b>	51
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b>	66
5.1	ELABORAÇÃO DA METODOLOGIA	66
5.2	ELABORAÇÃO DO MODELO DE MATURIDADE	69
5.3	DEFINIÇÃO DO ESCOPO DO MODELO	72

5.4	DEFINIÇÃO DO PROJETO DO MODELO .....	72
5.5	POPULAR O MODELO .....	73
5.6	TESTAR O MODELO .....	76
<b>5.6.1</b>	<b>Instrumento de avaliação de dados .....</b>	<b>76</b>
5.7	IMPLEMENTAÇÃO E MANUTENÇÃO .....	78
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>79</b>
6.1	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....	79
6.2	APRESENTAÇÃO DO RESULTADO GERAL .....	83
6.3	ESTUDO DO SETOR DE MINERAÇÃO.....	104
6.4	ESTUDO DO SETOR ELÉTRICO .....	109
6.5	ESTUDO DO SETOR DE TI .....	114
6.6	ESTUDO DO SETOR METALURGIA.....	119
6.7	ESTUDO DO SETOR DE SIDERURGIA.....	124
6.8	COMPARATIVO DOS SETORES .....	129
6.8	COMPARATIVO DO RESULTADO GERAL COM RELATÓRIOS DA INDÚSTRIA 4.0 .....	134
<b>6.8.1</b>	<b>Relatório “Mapeamento das principais metodologias de aproximação entre o setor produtivo e as tecnologias 4.0” .....</b>	<b>134</b>
<b>6.8.2</b>	<b>Relatório “Sondagem especial: Indústria 4.0 cinco anos depois” ..</b>	<b>135</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>137</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>140</b>
	APÊNDICE A - Questionário.....	157

## 1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 (I4.0) é um movimento global de modernização da indústria manufatureira, trazendo avanços como novos sistemas e protocolos de comunicação, segurança cibernética, dispositivos de comunicação móveis e compactos com maior capacidade computacional e métodos de inteligência artificial. Portanto, a fusão do mundo físico com o digital está no centro desta revolução industrial, contribuindo para a existência das fábricas inteligentes do futuro (DIEZ-OLIVAN *et al.*, 2019).

A I4.0 tem moldado o ambiente social, econômico e tecnológico. As empresas, quando expostas à transformação digital, são capazes de explorar as oportunidades da I4.0 e gerenciar riscos e barreiras iminentes. Entretanto, estudos relacionados às oportunidades e desafios à implementação da I4.0 são escassos na literatura (HERCEG *et al.*, 2020).

Para Weking *et al.* (2020), a I4.0, também conhecida como a Quarta Revolução Industrial, é responsável pela digitalização das indústrias manufatureiras. Ela é crucial para que as empresas sustentem a vantagem competitiva e aproveitem as novas oportunidades.

Para Ghadimi *et al.* (2022), diversos benefícios são esperados com a transformação digital promovida pela I4.0, como a automação e descentralização de processos produtivos. Contudo, as empresas enfrentam inúmeros riscos que acabam gerando impactos à implementação da I4.0.

Segundo Nagy *et al.* (2018), a era da digitalização industrial faz com que empresas invistam cada vez mais em ferramentas e soluções para que seus processos, máquinas, funcionários e produtos sejam integrados em uma única rede, facilitando a coleta de dados, análise de dados, avaliação do desenvolvimento da empresa e melhoria do desempenho. Os autores ainda comentam que a Quarta Revolução Industrial tem impacto em toda a organização. Desta forma, é necessário entender como os vários elementos da empresa são capazes de explorar as oportunidades da digitalização.

A Confederação Nacional das Indústrias (CNI) (2016) cita a necessidade de incorporação de novas tecnologias como estratégica para o desenvolvimento da indústria brasileira, fomentando a competitividade do país e melhorando a sua participação nas cadeias globais de valor. Alguns países já tratam a I4.0 como prioridade, inclusive em seus governos, criando um duplo desafio para o Brasil, que deve incorporar e desenvolver tecnologias em tempo hábil para evitar o *gap* de

competitividade com outros países. A CNI ainda cita a heterogeneidade da indústria brasileira como ponto de atenção, exigindo que as políticas sejam adaptadas para diferentes conjuntos de setores e empresas, sendo abarcadas em velocidades e condições distintas.

Desta maneira, a discussão sobre a adoção da I4.0 pode contribuir para a melhoria dos processos produtivos das empresas e das estruturas organizacionais. Todavia, em alguns casos as empresas encontram dificuldade para desenvolver planos estratégicos de implementação da I4.0. De modo a superar as incertezas e dificuldades na sua implementação, novos métodos e ferramentas podem contribuir para orientar e dar suporte às empresas, como o modelo de maturidade (FACCHINI *et al.*, 2019).

Para Caiado *et al.* (2021), a I4.0 vincula tecnologias disruptivas a sistemas de manufatura, combinando operações inteligentes e gerenciando a cadeia de suprimentos. Neste sentido, modelos de maturidade podem contribuir para ajudar as organizações a acompanhar o progresso de suas iniciativas I4.0 e orientar a digitalização.

Desta maneira, o estudo envolve o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à decisão para a implementação da I4.0 nas empresas, por meio de um modelo de maturidade, a fim de contribuir para que as organizações entendam o grau de maturidade de seus processos na evolução da I4.0.

Segundo a Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (Firjan) (2019), é importante entender o nível de maturidade das empresas, facilitando o processo de construção de uma estratégia de ação. Assim, é possível identificar como está a empresa em termos de nível tecnológico, habilidades do corpo técnico e processos em uso, para diagnosticar o que está faltando nestas organizações (infraestrutura, normas e legislações, possíveis melhorias na implantação), de modo a estruturar estratégias para atuação.

Percebe-se que os investimentos em I4.0 podem se traduzir em ganhos em eficiência e redução de custos para as organizações, o que ressalta a importância de entender e avaliar o processo de maturidade das organizações na implementação das tecnologias disruptivas da I4.0.

Além disso, pode-se ressaltar o alinhamento do estudo com a temática dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) (2015), especialmente no que diz respeito aos objetivos: 8 - Trabalho decente

e crescimento econômico, 9 - Indústria, inovação e infraestrutura e 12 - Consumo e produção responsáveis. Este alinhamento é decorrente do fato que a I4.0 está diretamente relacionada às iniciativas que estimulam a inovação, a geração de emprego e renda, a modernização das indústrias, a digitalização, o crescimento econômico e a diminuição de resíduos gerados no processo produtivo.

A importância do trabalho reside na necessidade de mapear o nível de maturidade das empresas do Estado do Espírito Santo, de modo a entender como o Estado se posiciona num contexto tecnológico em relação às tecnologias da Indústria 4.0. Isto pode contribuir para que as empresas possam abordar os pontos positivos e negativos obtidos com este trabalho, além da possibilidade de contribuição para que a iniciativa pública e privada possa fomentar o desenvolvimento destas tecnologias, aumentando o desenvolvimento tecnológico do Estado.

Assim, a questão de pesquisa visa responder à seguinte pergunta: como propor um modelo de maturidade que ajude as organizações a entender melhor o processo de implementação da I4.0?

Este trabalho se organiza da seguinte maneira: após a introdução são apresentados os objetivos do trabalho, as principais contribuições, seguidos da revisão de literatura e da metodologia de pesquisa. Ao final, são apresentados resultados obtidos com a pesquisa, realizando uma discussão dos valores encontrados, encerrando com a conclusão da pesquisa.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Propor um modelo de avaliação de maturidade para apoiar a tomada de decisão na implementação da Indústria 4.0 em empresas do estado do Espírito Santo.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os fatores críticos de sucesso, desafios e benefícios da implementação da Indústria 4.0.
- Analisar os modelos de maturidade voltados à implementação da Indústria 4.0.
- Projetar uma ferramenta de avaliação de maturidade da Indústria 4.0.
- Aplicar a ferramenta por meio da realização de um questionário com empresas do estado do Espírito Santo que tenham interesse nas tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.

### 3 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

Esta dissertação apresenta um estudo com foco na proposta de um modelo de maturidade da Indústria 4.0. Para atingir tal objetivo, foi necessário explorar fatores críticos de sucesso, desafios e benefícios da implementação da I4.0, analisar os diversos modelos de maturidade existentes na literatura, caracterizando-os conforme seu modelo/autor, as dimensões, a estrutura, o método e validação do modelo e, por fim, as suas lacunas.

Desta maneira, foi possível contribuir para o estudo com três publicações:

- FERNANDES, Raianny Souza; MESTRIA, Mário. Indústria 4.0: revisão sistemática dos fatores críticos de sucesso e desafios à implementação. In: SIMPEP: Simpósio de Engenharia de Produção, 2023, Bauru. **Anais...** Bauru.
- FERNANDES, Raianny Souza; MESTRIA, Mário. Transição da indústria 4.0 para a indústria 5.0: uma revisão de literatura. In: SIMPEP: Simpósio de Engenharia de Produção, 2023, Bauru. **Anais...** Bauru.
- FERNANDES, Raianny Souza; MESTRIA, Mário. Oportunidades e diferenças entre Indústria 4.0 e 5.0: uma revisão de literatura. In: MARTINS, Ernane Rosa (org). **Gestão da Produção: conceitos, análises e práticas contemporâneas**. 1. ed. Guarujá-SP: Científica Digital, 2024. p. 27-45.
- Artigo “Modelo de Maturidade da Indústria 4.0 no contexto do Estado do Espírito Santo” encaminhado para a Revista Produção Online, em fase de avaliação.

## 4 REVISÃO DE LITERATURA

A seguir, a revisão de literatura é apresentada, abordando: a evolução da Indústria até a chegada da Indústria 4.0; seus conceitos e a contribuição dos pilares da Indústria 4.0; uma análise das patentes registradas no país e seu crescimento com o passar dos anos; o papel que os Institutos Federais (IFs) podem ter no fomento às tecnologias digitais da quarta revolução industrial e os fatores críticos de sucesso, os benefícios e os desafios da Indústria 4.0. Além disso, apresenta-se e analisa-se os modelos de maturidade da Indústria 4.0 que serviram de base para a definição do modelo de maturidade deste estudo.

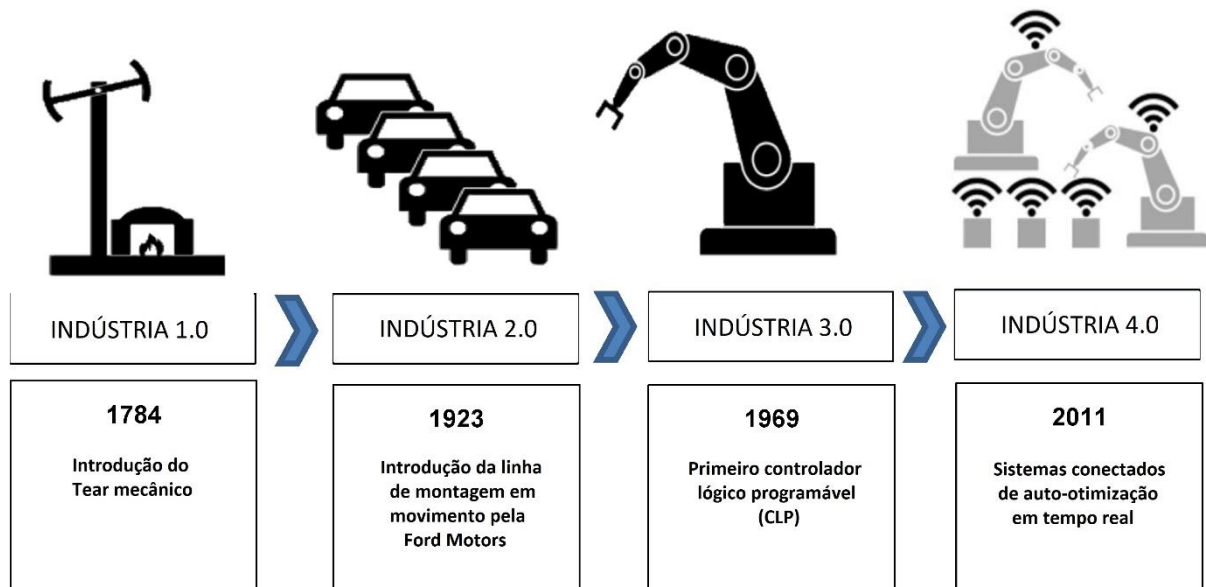
### 4.1 EVOLUÇÃO DA INDÚSTRIA

A aplicação de tecnologias emergentes aos sistemas produtivos pode trazer mudanças significativas na cadeia de valor dos vários segmentos. Ao longo dos anos, processos de industrialização, novos produtos, a gestão e as tecnologias aplicadas trouxeram mudanças disruptivas que foram consideradas revoluções industriais. As três revoluções industriais, desde as máquinas a vapor até as novas aplicações da robótica transformaram sobremaneira a sociedade, a competição industrial, a geopolítica e o crescimento urbano. Com base nestas transformações, surge a chamada Quarta Revolução Industrial ou Indústria 4.0, que compreende a evolução da microeletrônica, da robótica, aplicativos de internet, processamento e armazenamento de dados, Computação em Nuvem, Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs), Sistemas Ciberfísicos (CPS), Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), equipamentos autônomos, Manufatura Aditiva e outras tecnologias (SANTOS; MARTINHO, 2020).

Thoben, Wiesner e Wuest (2017) descrevem que com as primeiras revoluções industriais foi possível modificar o paradigma existente da produção, pela mecanização por meio da energia hidráulica e a vapor, a produção em massa, com uso das linhas de montagem e a automação, com uso da Tecnologia da Informação (TI). Atualmente, no entanto, as indústrias e pesquisadores têm defendido cada vez mais a existência da quarta revolução industrial. Isto foi corroborado por Xu, Xu e Li (2018), que ainda complementam que a quarta revolução industrial trouxe o uso de sistemas ciberfísicos como principal incentivador da mudança de paradigma nas indústrias, em particular no setor de manufatura.

As quatro revoluções industriais estão ilustradas na Figura 1.

Figura 1 – Evolução da indústria.



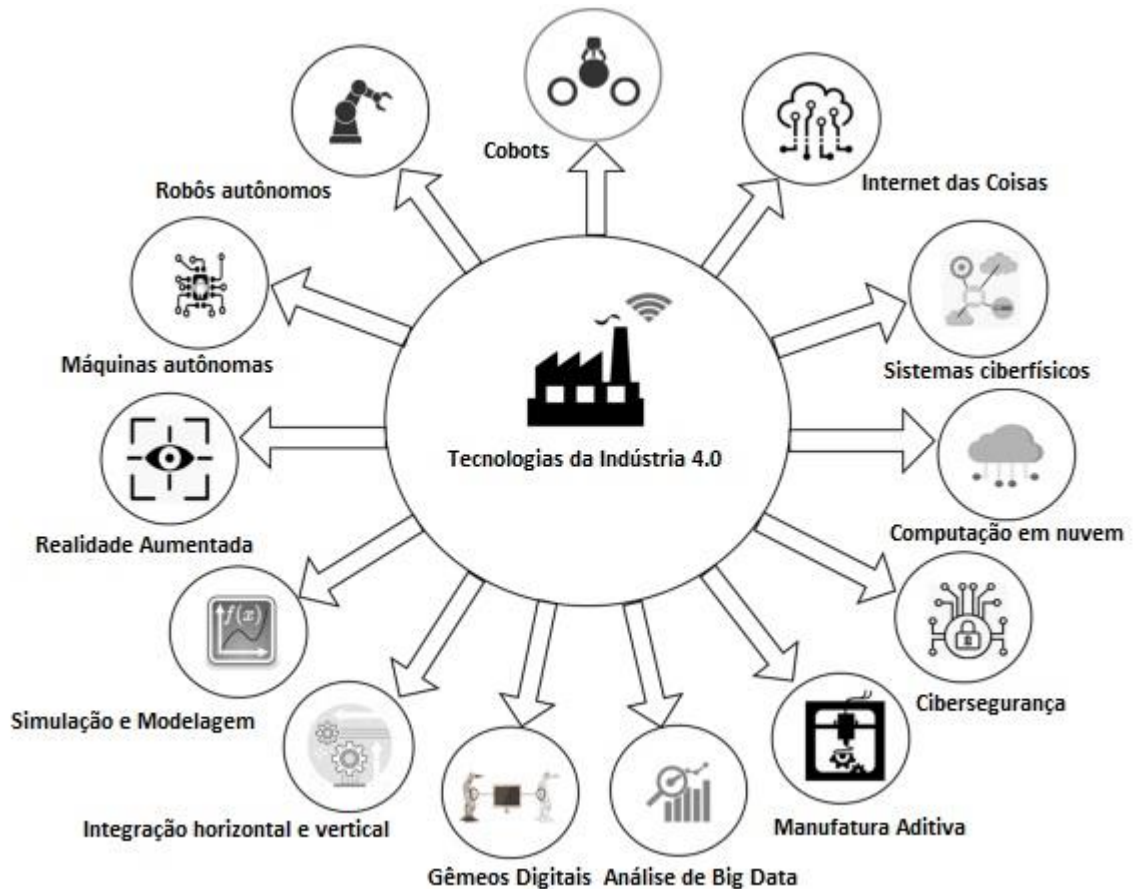
Fonte: Traduzido de Çinar *et al.* (2021).

O conceito moderno de I4.0 surgiu como uma iniciativa nacional para o desenvolvimento da economia da Alemanha, no ano de 2011. Ela se traduz no uso de tecnologias digitais no processo de manufatura para produzir com alta qualidade e custos reduzidos (PECH; VRCHOTA, 2020).

## 4.2 INDÚSTRIA 4.0

Vários países já adaptaram a I4.0 em seus ecossistemas e definiram diversos pilares para conceituar o tema, que podem ser visualizados na Figura 2. São eles: Internet das Coisas, *Big Data*, Integração do Sistema, Computação em Nuvem, Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada, Simulação, Gêmeos Digitais ou *Digital Twin*, Robótica, Sistemas Ciberfísicos, *Cobots* (Robôs Colaborativos), Inteligência Artificial e Segurança Cibernética (JANMAIJAYA *et al.*, 2021; PARHI *et al.*, 2022).

Figura 2 – Tecnologias da I4.0.



Fonte: Traduzido de Parhi *et al.* (2022)

A importância da Indústria no contexto nacional é destacada pela CNI (2020a), visto que a Indústria representa cerca de 21,4% do PIB nacional, 70,1% das exportações brasileiras de bens e serviços e cerca de 69,2% do investimento empresarial em P&D. Além disso, destaca-se também o poder da indústria de gerar crescimento, pois a cada R\$1,00 produzido na indústria são gerados R\$2,40 na economia brasileira. Em outros setores, o valor gerado é menor, como na agricultura (R\$1,66).

Assim, no contexto industrial, o relatório da Confederação Nacional da Indústria (CNI) (2020b) apresenta algumas motivações que levam as organizações a implementar as tecnologias disruptivas da I4.0 em seus processos produtivos: aumento da produtividade, aumento na produção industrial para atender ao mercado, redução de custos com manutenção de equipamentos, controle da produção para reduzir custos de energia e outros insumos, modernização dos processos logísticos de carga e descarga e integração à corporação empresarial, em casos de multinacionais. Enfim,

as empresas industriais buscam, principalmente, reduzir custos e aumentar a produtividade.

#### 4.3BIG DATA

A I4.0 traduz-se em um novo paradigma de controle digital, autônomo e descentralizado para sistemas de manufatura. A evolução da economia baseada em dados proporciona o crescimento no uso de técnicas de big data para atingir os objetivos(SAHAL; BRESLIN; ALI, 2020).

Santos *et al.* (2017) dizem que as TICs estão impulsionando o desenvolvimento da I4.0, promovendo a geração de dados por várias fontes, como controladores de máquinas, sensores, sistemas de manufatura, etc. Pessoas, dispositivos, infraestruturas e sensores se comunicam a todo o momento, gerando novos dados. Por consequência, esta geração de dados acontece em velocidades cada vez maiores, de variadas formas, dando início ao chamado *Big Data*. Desta forma, promover a união de volume, variedade e velocidade de dados com a I4.0 pode potencializar a inovação sustentável nas fábricas inteligentes.

Para Yan *et al.* (2017), os dados estão desempenhando cada vez mais um papel importante na indústria moderna e futura, visto que seu crescimento nestes setores é cada vez maior. O *Big Data* na indústria provém das seguintes fontes:

- Dados de projeto, como os de projetos de produtos e máquinas;
- Dados de operação das máquinas, como de sistemas de controle e operação;
- Dados de comportamento das equipes, como registros de operação manual;
- Dados de custos, como de fabricação e de operações;
- Dados logísticos;
- Dados ambientais, como informações meteorológicas, temperatura, umidade, ruídos;
- Dados sobre detecção de falhas e de monitoramento do sistema;
- Dados sobre a qualidade do produto;
- Dados de uso do produto, como sua disponibilidade;
- Dados do cliente, como feedback e sugestões.

No Quadro 1, são apresentados alguns trabalhos com o tema do *Big Data* aplicado à Indústria 4.0.

Quadro 1 – Trabalhos de *Big Data* e Indústria 4.0.

Autor	Descrição
(SANTOS <i>et al.</i> , 2017)	O artigo aborda o desafio da implementação de uma arquitetura de <i>Big Data Analytics</i> em uma multinacional. Para realizar a proposta, todo o ciclo de vida dos dados é tratado, considerando as diferentes velocidades de processamento de dados que podem existir no ambiente fabril. Foi possível concluir que as tecnologias de <i>Big Data</i> e I4.0 se complementam, contribuindo para a tomada de decisão.
(YAN <i>et al.</i> , 2017)	O artigo introduz as características do processamento industrial de <i>Big Data</i> , com foco na questão da manutenção preditiva. Uma estrutura com informações heterogêneas de várias fontes é elaborada, contendo dados estruturados e fatores modelados. Desta forma, o processo de produção se torna mais transparente, facilitando a implementação da manutenção preditiva nas instalações e economia de energia na I4.0. Várias fontes de dados foram analisadas para o estudo.
(SAHAL; BRESLIN; ALI, 2020)	O artigo utiliza uma metodologia sistemática para revisar as tecnologias de código aberto para <i>Big Data</i> e processamento de fluxo, com foco no uso da I4.0. Dois casos de manutenção preditiva na área de transporte ferroviário e energia eólica são selecionados, com os requisitos sendo mapeados. Ao final, elaboram-se combinações ideais de tecnologias de <i>Big Data</i> de código aberto para os casos estudados.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A seguir, o tópico de Internet das Coisas é detalhado.

#### 4.4 INTERNET DAS COISAS

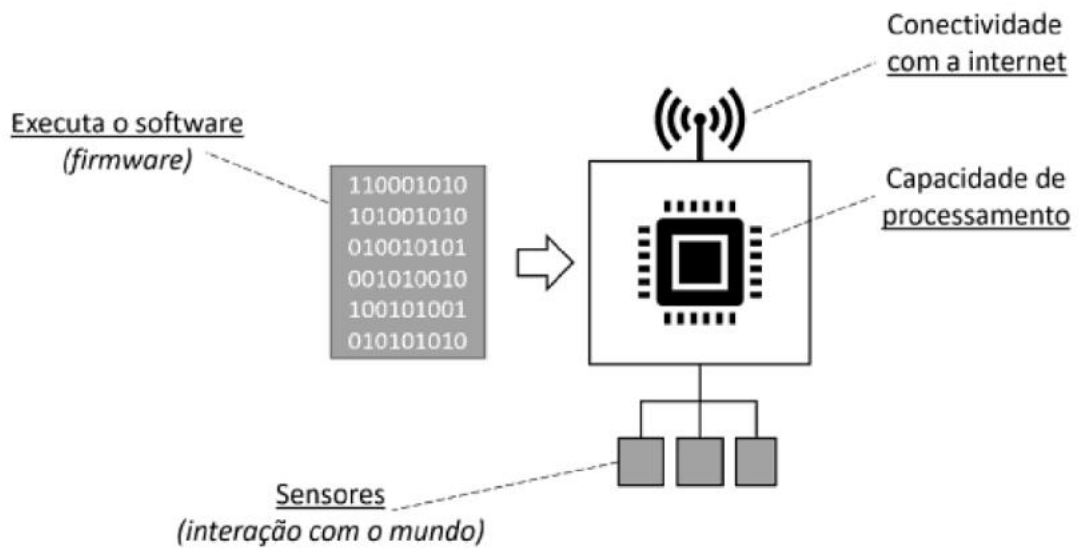
Para Elsisi *et al.* (2021) a Internet das Coisas é uma tecnologia inovadora que se estabelece como núcleo da I4.0. Com ela, é possível compartilhar sinais entre dispositivos e máquinas pela internet. Ela também permite o uso de técnicas de Inteligência Artificial ou *Artificial Intelligence* (IA), permitindo controlar e gerir sinais entre diferentes máquinas de maneira inteligente.

Os avanços tecnológicos proporcionaram uma revolução no setor industrial. A Internet das Coisas ou *Internet of Things* (IoT) que surgiu a alguns anos foi adotada pela indústria, gerando o que é conhecido como Internet Industrial das Coisas ou *Industrial Internet of Things* (IIoT), que visa tornar os processos e entidades industriais como parte da internet. A junção da IIoT e I4.0 consiste em redes de sensores, atuadores, robôs, máquinas, aparelhos, processos de negócios e pessoal, objetivando tornar o sistema mais robusto e seguro (AAZAM; ZEADALLY; HARRAS, 2018).

Manavalan e Jayakrishna (2019) definem IoT como uma evolução das tecnologias sem fio, sensores e internet. Ela conecta os sistemas em rede por meio da internet, com ajuda de sensores. Os dispositivos conectados transmitem uma grande quantidade de dados diariamente, que podem ser utilizados para tomar decisões. No ambiente industrial, a IoT promove uma grande oportunidade para a elaboração de sistemas industriais robustos, com tecnologias como RFID, sensores e comunicação sem fio, de modo a contribuir com o desenvolvimento da indústria.

De acordo com Ferreira, Duraes e Manzan (2022), para uma "coisa" estar envolvida no conceito de Internet das Coisas ela deve conter uma conexão direta ou indireta com a internet, ter capacidade para executar um software localmente, tendo um pequeno microcontrolador (MCU) para executar um código (*firmware*) e conseguir interagir com o mundo com base em sensores e atuadores. Este conceito é abordado na Figura 3.

Figura 3 – Dispositivo IoT.



Fonte: (FERREIRA; DURAES; MANZAN, 2022).

Para entender melhor as aplicações sobre a Internet das Coisas o Quadro 2 apresenta alguns trabalhos relacionando IoT e I4.0.

Quadro 2 – Trabalhos de IoT e Indústria 4.0.

Autor	Descrição
(FERNANDEZ-CARAMES; FRAGA-LAMAS, 2018)	O artigo apresenta os fundamentos da I4.0 e das etiquetas inteligentes, além das aplicações e tecnologias, fornecendo aos pesquisadores as bases para desenvolver a nova geração de etiquetas inteligentes conectadas à IoT centradas no ser humano.
(MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019)	O objetivo do trabalho era revisar os aspectos da Gestão da Cadeia de Suprimentos, do planejamento de recursos empresariais (ERP), da IoT e da I4.0. Para tanto, os autores buscaram explorar as oportunidades de uma Cadeia de Suprimentos Sustentável integrada à IoT para uma transformação digital. Ao final, uma estrutura ou <i>framework</i> foi proposto com base em cinco perspectivas, sendo negócios,

	tecnologia, desenvolvimento sustentável, colaboração e perspectivas de estratégia de gerenciamento.
(KALSOOM <i>et al.</i> , 2021)	O estudo fez uma revisão crítica de literatura para investigar e analisar as aplicações, benefícios e desafios da IoT na fabricação I4.0. O resultado mostrou que ainda há questões de segurança e privacidade de dados a serem avaliadas, principalmente no quesito compartilhamento de dados entre setores, aplicativos e coisas.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A seguir, o tópico de Computação em Nuvem é detalhado.

#### 4.5 COMPUTAÇÃO EM NUVEM

Pedone e Mezgár (2018) comentam que a computação em nuvem está proporcionando uma revolução em todos os campos de estudo. Sua abordagem baseada em serviços pode contribuir para a colaboração e troca de dados em níveis mais altos, proporcionando ganhos em desempenho e redução de custos paralelos. Ambientes de manufatura podem se beneficiar desta tecnologia para atender as mudanças constantes nas demandas do mercado de maneira mais eficaz.

O conceito da Computação em Nuvem aplica a técnica de virtualização para criar infraestruturas e realizar compartilhamentos com clientes, barateando os custos e ofertando soluções de TI para suprir as necessidades das empresas, sem precisar de grandes investimentos, instalações e funcionários especializados (VARELLA, 2019).

Há três tipos de serviços em Computação em Nuvem, segundo Veras (2012):

- Infraestrutura como um serviço (*Infrastructure as a Service - IaaS*): oferta de infraestrutura de processamento e armazenamento de forma transparente. Neste tipo de serviço, o usuário não tem controle sobre a infraestrutura física. No entanto, por meio da virtualização, controla as máquinas virtuais, armazenamento, aplicativos e controle limitado de recursos de rede.

- Plataforma como um serviço (*Platform as a Service - PaaS*): oferta de aplicativos que serão executados e disponibilizados na nuvem.
- Software como um serviço (*Software as a Service - SaaS*): aplicativos são hospedados na nuvem como alternativa ao processamento local. Os aplicativos são ofertados como serviços por provedores e acessados por clientes. O gerenciamento do sistema é feito pelo provedor de serviço.

No Quadro 3, alguns trabalhos envolvendo Computação em Nuvem e I4.0 são apresentados.

Quadro 3 – Trabalhos de Computação em Nuvem e Indústria 4.0.

Autor	Descrição
(OOI <i>et al.</i> , 2018)	O estudo busca entender como a expectativa de desempenho, a expectativa de esforço, o tamanho da empresa, o suporte da alta administração e a capacidade de absorção da tecnologia de Computação em Nuvem contribuem com a inovação e o desempenho das empresas de manufatura. Para tanto, dados de 188 cargos foram analisados pela metodologia de Modelagem de Equações Estruturais de Quadrados Mínimos Parciais em conjunto com a análise de Redes Neurais Artificiais. Os resultados trouxeram conclusões importantes sobre a aplicabilidade da computação em nuvem para melhorar o desempenho da manufatura em I4.0.
(ELHOSENY <i>et al.</i> , 2018)	O artigo utiliza os conceitos de Big Data, IoT e Computação em Nuvem para a área de saúde, por meio de um modelo para otimizar a seleção de máquinas virtuais em aplicativos de serviços de saúde. O objetivo é gerenciar de maneira mais eficiente a grande quantidade de dados na I4.0. Desta maneira, é possível melhorar o desempenho dos sistemas de saúde, reduzindo

	o tempo de execução de solicitações otimizando o armazenamento de dados.
(AZADI <i>et al.</i> , 2021)	O estudo propõe um método analítico abrangente para avaliar a eficiência dos provedores de serviços em nuvem, com foco na I4.0. O método é validado por meio de um conjunto de dados da vida real, fornecendo uma contribuição para a temática da computação em nuvem para a I4.0.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A seguir, o tópico de Manufatura Aditiva é detalhado.

#### 4.6 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva pode contribuir de maneira permanente no mundo da manufatura, sendo considerada um elemento crucial da Quarta Revolução Industrial. Ela se traduz em um novo paradigma de produção de peças e produtos, podendo contribuir para a sustentabilidade dos sistemas de manufatura, otimizando o consumo de materiais. Assim, é possível criar novas formas, personalizar novos projetos e reduzir o tempo de fabricação, revolucionando os modelos de negócios existentes. Além disso, pode contribuir para a redução de custos produtivos, logísticos, de estoques e no desenvolvimento e industrialização de um novo produto (GODINA *et al.*, 2020).

Para Elhoone *et al.* (2020), a integração da rede, os controles incorporados e a adição de tecnologias como a computação em nuvem são necessárias para potencializar o uso da manufatura aditiva, aumentando sua eficiência.

Para Volpato (2017), a Manufatura Aditiva é um processo de fabricação pela adição sucessiva de material em camadas, com informações obtidas por uma representação 3D do componente. Este modelo 3D é obtido por um sistema *Computer-Aided-Design* (CAD). Este processo envolve a fabricação de vários componentes físicos através de vários materiais, em múltiplas formas e ocorre de maneira automatizada. As etapas do processo de Manufatura Aditiva estão apresentadas na Figura 4 e envolvem:

- Modelagem tridimensional, gerando modelo geométrico 3D da peça;

- Obtenção do modelo 3D em um formato específico, num padrão adequado;
- Planejamento do processo de fabricação em camadas;
- Fabricação da peça no equipamento de Manufatura Aditiva; e
- Pós-processamento, através da limpeza, etapas seguintes de processamento e acabamento.

Figura 4 – Etapas de processo de Manufatura Aditiva.

			
Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD)	Planejamento de processo (fatiamento)	Processamento por adição das camadas	Peça fabricada
Modelo eletrônico 3D		Modelo físico	

Fonte: (VOLPATO, 2017).

No Quadro 4, alguns trabalhos envolvendo Manufatura Aditiva e I4.0 são apresentados.

Quadro 4 – Trabalhos de Manufatura Aditiva e Indústria 4.0.

Autor	Descrição
(CERUTI <i>et al.</i> , 2019)	O artigo apresenta o potencial da Manufatura Aditiva na manutenção do setor de aviação. Percebeu-se que a Manufatura Aditiva pode ser utilizada para produção de peças de reposição otimizadas para o uso em operações de manutenção, reduzindo a necessidade de grandes armazéns. A Manufatura Aditiva pode ser combinada com a Realidade Aumentada para fornecer informações sobre reposições de peças.

(ELHOONE <i>et al.</i> , 2020)	O artigo busca o desenvolvimento de uma estrutura para projetar um sistema de manufatura aditiva cibernética, de modo a integrar um sistema especialista com IoT. Utilizam-se técnicas de Inteligência Artificial para treinar o modelo, demonstrando sua contribuição para um projeto de sistemas de manufatura, alocando projetos digitais para diferentes técnicas de manufatura aditiva.
(SEPASGOZAR <i>et al.</i> , 2020)	O artigo apresenta aplicações práticas da implementação da Impressão 3D, sugerindo o caminho para trabalhos futuros. É feita uma abordagem de revisão crítica de conteúdo, mostrando que existem limitações práticas no desempenho da Impressão 3D, como a necessidade de manter o alto nível de segurança pela interação homem-máquina, a disponibilidade de materiais adequados para realização do trabalho, além das limitações operacionais envolvidas no processo de impressão. A tecnologia está em evolução e apresenta um amplo escopo para desenvolvimento na I4.0.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A seguir, o tópico de Realidade Aumentada é detalhado.

#### 4.7 REALIDADE AUMENTADA

Masood e Egger (2019) afirmam que a realidade aumentada permite que os trabalhadores acessem informações digitais e sobreponham essas informações ao mundo físico, sendo parte fundamental no conceito de I4.0. Devagiri *et al.* (2022) afirmam que a realidade aumentada é uma tecnologia composta por uma representação da realidade que se estabelece pela sobreposição das informações disponíveis em imagens de objetos observados por meio de dispositivos digitais. No

A Realidade Aumentada (RA) promove ligações diretas entre o mundo físico e o digital, fornecendo uma interface simples e imediata. Enquanto a realidade virtual

coloca o usuário dentro de um ambiente gerado por computador, a RA promove informações registradas diretamente no ambiente físico, indo além da computação móvel. Ela preenche a lacuna entre mundo virtual e real (SCHMALSTIEG; HOELLERER, 2016). No Quadro 5 alguns trabalhos envolvendo Realidade Aumentada e I4.0 são apresentados.

Quadro 5 – Trabalhos de Realidade Aumentada e Indústria 4.0.

Autor	Descrição
(BRUNO <i>et al.</i> , 2019)	O artigo traz uma ferramenta de Realidade Aumentada para aumentar a eficiência da coleta de dados e troca de informações entre os funcionários envolvidos no projeto de produtos no setor de Petróleo e Gás. Foram realizadas experimentações em campo com usuários finais, para verificar a aderência da ferramenta. Percebeu-se que ela foi aceita positivamente por todos participantes envolvidos no estudo.
(ANGRISANI <i>et al.</i> , 2020)	O artigo apresenta um sistema de monitoramento vestível para inspeção. Os óculos de realidade aumentada são desenvolvidos e integrados à uma interface cérebro-computador não invasiva. O usuário realiza atividades de inspeção, recebendo dados de redes externas de transdutores inteligentes sem fios, tendo as mãos livres para realizar tarefas. Experimentos de validação foram conduzidos em um estudo de caso da I4.0.
(MARINO <i>et al.</i> , 2021)	O artigo apresenta uma ferramenta de Realidade Aumentada para facilitar as atividades de inspeção dos operadores, detectando erros de produção e montagem. Um estudo de caso real foi utilizado para verificar a usabilidade da ferramenta, por meio de experimentações de campo. Questionários foram respondidos, levando em conta o desempenho do usuário em tarefas com a ferramenta. Concluiu-se que a

	adoção facilitou a atividade dos operadores, necessitando de baixa demanda mental.
--	--

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A seguir, o tópico de Simulação é detalhado.

#### 4.8 SIMULAÇÃO

Simulação é uma tecnologia para desenvolver modelos que têm como objetivo otimizar a tomada de decisão, o projeto e as operações que envolvem sistemas produtivos complexos e inteligentes, podendo também contribuir para que as empresas entendam os riscos, custos, barreiras de implementação, impactos no sistema e um roteiro bem definido da I4.0 (FERREIRA; ARMELLINI; DE SANTA-EULALIA, 2020).

A simulação é uma ferramenta de análise de problemas que contribui para entender melhor os sistemas, facilitando a comunicação entre analistas, gerentes e demais interessados na operação. O modelo de simulação visa entender o comportamento de dado sistema, representando-o como um modelo computacional. Desta forma, ele deve ser capaz de representar os vários fenômenos aleatórios no sistema, contruídos por meio de observação e do levantamento de dados, buscando um modelo de simulação que mais se aproxime do sistema real (CHWIF; MEDINA, 2014).

Para Bateman *et al.*, (2013), a Simulação envolve a experimentação de um sistema real por meio de modelos. Ela visa criar e simular fenômenos desejados para colaborar com a tomada de decisão. Os principais desafios envolvidos na simulação são o escopo do modelo e o nível de detalhes a ser considerado.

No Quadro 6, alguns trabalhos envolvendo Simulação e I4.0 são apresentados.

Quadro 6 – Trabalhos de Simulação e Indústria 4.0.

Autor	Descrição
(FLORESCU; BARABAS, 2020)	O artigo apresenta uma solução para modelar e otimizar fluxos de materiais em sistemas avançados de manufatura, por meio de um software de análise e simulação. Parâmetros

	técnicos e econômicos foram definidos e diferentes cenários de processamento foram avaliados por meio de simulação virtual, com foco na eficiência do sistema. O objetivo é desenvolver uma ferramenta para projeto de linhas flexíveis de manufatura no setor industrial, com uso da simulação na análise de parâmetros.
(BHAT; BHAT; GIJO, 2021)	O artigo determina a aplicabilidade do Lean Seis Sigma (LSS) baseado em simulação em uma indústria de água mineral, com foco na melhoria de produtividade. Uma pesquisa-ação é realizada para descobrir causas por meio da abordagem DMAIC e utiliza-se um software de simulação e um software estatístico para análise. Avaliou-se que o estudo promove boa aplicabilidade do método LSS, por meio da análise de dados proveniente da simulação.
(JIN; MA; LI, 2022)	O artigo apresenta uma modelagem de simulação dinâmica de robôs industriais no ambiente da I4.0. Busca-se mitigar erros de parâmetro e sua influência na posição final. Diversas técnicas são realizadas como interpolação linear, interpolação parabólica, etc. São simuladas soluções cinemáticas de robôs industriais e resultados da otimização. O objetivo é fornecer suporte teórico e prático para outras modelagens de simulação dinâmica de robôs industriais.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Existem diversos motivos para simular, mas o principal deles, segundo Bateman *et al.* (2013) é a possibilidade de avaliar hipóteses sem ter que implementá-las. Além disso, simular pode trazer criatividade ao processo de resolução de problemas, testando soluções e verificando seu impacto. A simulação também pode prever resultados, visto que o teste é um pré-requisito para implementação. Por fim, pode-se dizer que a simulação é uma das únicas ferramentas de tomada de decisão que pode lidar de

maneira eficaz com variações no sistema, aumentando o número de insights conforme a quantidade de variáveis do sistema.

A seguir, o tópico de Robótica é detalhado.

#### 4.9 ROBÓTICA

A implementação dos sistemas colaborativos humanos-robôs nos ambientes industriais tem crescido exponencialmente nos últimos anos, trazendo aplicativos de fabricação reproduzidos em instalações de laboratório até simulações digitais de chão de fábrica. Estes projetos tem sido orientados pela adoção de padrões para a operação mais segura (DIEZ-OLIVAN *et al.*, 2019).

Para Javaid *et al.* (2021), a Robótica é uma tecnologia essencial para a I4.0, ampliando as capacidades no campo de manufatura. Com esta tecnologia, é possível aprimorar sistemas de automação, executando atividades repetitivas com maior precisão. Desta maneira, os produtos gerados por meio da robótica apresentam maior qualidade, refinando a fabricação em massa, melhorando a segurança, a confiabilidade do processo e reduzindo custos. No Quadro 7, alguns trabalhos envolvendo Robótica e I4.0 são apresentados.

Quadro 7 – Trabalhos de Robótica e Indústria 4.0.

Autor	Descrição
(PARMAR <i>et al.</i> , 2021)	O artigo apresenta o panorama geral das tecnologias da I4.0 na fabricação de compósitos poliméricos, trazendo os avanços na fabricação robótica e aditiva destes produtos. Além disso, aspectos da manufatura aditiva são apresentados, incluindo a otimização de topologia, oportunidades de design, desenvolvimentos em máquinas, divulgação de patentes e detecção de falhas durante a fabricação.
(JAVAID <i>et al.</i> , 2021)	O artigo apresenta o potencial da Robótica no campo industrial, apresentando 18 aplicações para a I4.0. Para tanto, uma revisão sistemática

	da literatura apresentou uma melhor compreensão da área. Os resultados apresentam os benefícios da robótica, considerando a confiabilidade, precisão, desempenho e resistência. A Robótica apresenta-se como uma tecnologia que permite uma tomada de decisão mais racional para a I4.0.
(DANESHMAND <i>et al.</i> , 2023)	O artigo busca identificar os fatores que impactam a montagem e desmontagem de produtos, considerando os robôs envolvidos e identificando a eficácia das medidas envolvidas na economia circular dos processos industriais. Vários aspectos das estruturas de fabricação e remanufatura foram identificados, considerando a eficiência dos procedimentos subjacentes.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A seguir, o tópico de Inteligência Artificial é detalhado.

#### 4.10 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A Inteligência Artificial (IA) é o principal componente da digitalização da indústria, fazendo com que máquinas inteligentes executem tarefas de maneira autônoma, como interpretação, diagnóstico e análise. Técnicas baseadas em IA apoiam fabricantes e indústrias na previsão de suas necessidades de manutenção e diminuição do tempo ocioso (AHMED *et al.*, 2022).

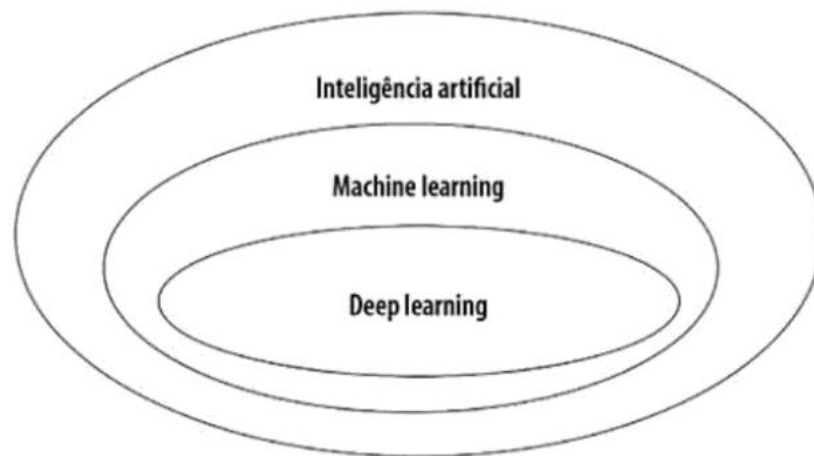
A IA abrange uma grande variedade de teorias e tecnologias, podendo subdividi-la em Aprendizado de Máquina ou *Machine Learning* e o Aprendizado Profundo, ou *Deep Learning*. Com o Aprendizado de Máquina, o computador pode aprender e melhorar o processamento de dados sem ser explicitamente programado. Isto é possível com uso de estatística, e, mais especificamente, análise de probabilidade, realizando previsões mais precisas (TAULLI, 2020).

Já o Aprendizado Profundo é definido por Kelleher (2019), como:

O aprendizado profundo é o subcampo da inteligência artificial que se concentra na criação de grandes modelos de redes neurais capazes de tomar decisões precisas baseadas em dados. O aprendizado profundo é particularmente adequado para contextos em que os dados são complexos e onde há grandes conjuntos de dados disponíveis.

A Figura 5 apresenta em detalhes os campos da Inteligência Artificial.

Figura 5 – Campos da Inteligência Artificial.



Fonte: (TAULLI, 2020).

No Quadro 8, alguns trabalhos envolvendo Inteligência Artificial e I4.0 são apresentados.

Quadro 8 – Trabalhos de Inteligência Artificial e Indústria 4.0.

Autor	Descrição
(PATEL; ALI; SHETH, 2018)	O artigo apresenta uma plataforma de Web Semântica das Coisas para a Indústria 4.0 (SWeTI). Com base na plataforma e por meio de cenários reais de casos, é possível enfrentar os desafios da I4.0, facilitar a integração dos sistemas e desenvolver serviços para a manufatura inteligente.
(SOOD; RAWAT; KUMAR, 2022)	O artigo apresenta os benefícios da aplicação da Inteligência Artificial para o campo das usinas nucleares, buscando resolver o complexo

	sistema de integração homem-máquina-rede e suas falhas. O conceito de Sistema Humano-Ciberfísico de Usina Nuclear é apresentado e discutido. Além disso, as aplicações de energia nuclear relacionadas à IA são classificadas. O objetivo da pesquisa é contribuir para a I4.0.
(AHMED <i>et al.</i> , 2022)	O artigo apresenta uma visão abrangente dos métodos de IA e Inteligência Artificial Explicável (XAI) adotados na I4.0. Uma investigação da literatura é apresentada, detalhando o quê, como, por que e onde os métodos têm sido aplicados na I4.0. Os estudos e abordagens baseados nestas tecnologias apresentam oportunidades para aplicações industriais.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A seguir, o tópico de Segurança Cibernética é detalhado.

#### 4.11 SISTEMAS DE SEGURANÇA CIBERNÉTICA

A Cibersegurança ou Segurança Cibernética é um dos maiores desafios enfrentados pelas empresas no contexto industrial, visto que vários dispositivos inteligentes associados a máquinas, computadores e pessoas estão em rede, se comunicando. Neste cenário, é preciso estar ciente dos problemas de segurança cibernética de modo a prevenir ou minimizar incidentes de violação de dados corporativos, tornando as empresas mais resilientes à ataques cibernéticos (CORALLO *et al.*, 2022).

A cibersegurança é essencial para as organizações, devido aos danos causados pelos ataques. Estes danos podem comprometer as operações comerciais, envolver o roubo de informações confidenciais e causar inúmeros problemas à reputação das empresas. A conscientização sobre a importância da segurança cibernética na I4.0 é essencial, visto que a dependência de sistemas de informação integrados é um fato (CULOT *et al.*, 2019).

No Quadro 9, alguns trabalhos envolvendo Segurança Cibernética e I4.0 são apresentados.

Quadro 9 – Trabalhos de Segurança Cibernética e Indústria 4.0.

Autor	Descrição
(LEZZI; LAZOI; CORALLO, 2018)	O artigo apresenta o estado da arte sobre questões de segurança cibernética no contexto da I4.0. O foco é identificar os principais elementos envolvidos na segurança cibernética dentro do contexto industrial onde os sistemas físicos se conectam por meio da internet. A análise foi baseada nos conceitos de cibersegurança e I4.0; no foco industrial dos estudos investigados; na caracterização do conceito e nas questões envolvendo o gerenciamento da cibersegurança. Ao final, uma estrutura foi elaborada com as principais características do tema.
(CULOT <i>et al.</i> , 2019)	O artigo apresenta os desafios à cibersegurança e a necessidade da I4.0 abordar e evoluir este conceito. As falhas das abordagens atuais são apresentadas e as atividades emergentes são analisadas, com base nas discussões realizadas com executivos seniores e na literatura. Especialmente executivos e empresários, a complexidade das preocupações envolvendo a cibersegurança são abordadas. Além disso, aponta-se a dificuldade de alinhar o discurso dos profissionais de segurança, tornando complexa a comunicação sobre as questões técnicas envolvidas na implementação desta tecnologia.
(SAWIK, 2020)	O artigo apresenta um problema de programação linear inteira mista para otimizar o investimento na segurança cibernética de cadeias de suprimentos da I4.0. O modelo obtido é capaz de selecionar o portfólio ideal para minimizar o investimento em segurança cibernética e o custo envolvido nas perdas de violação de segurança. A ideia é equilibrar as vulnerabilidades existentes na cadeia de suprimentos, ainda que ataques

	<p>cibernéticos e problemas de segurança ocorram. A conclusão traz a importância da vulnerabilidade intrínseca.</p>
--	---

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A seguir, o tópico de Análise de Patentes é detalhado.

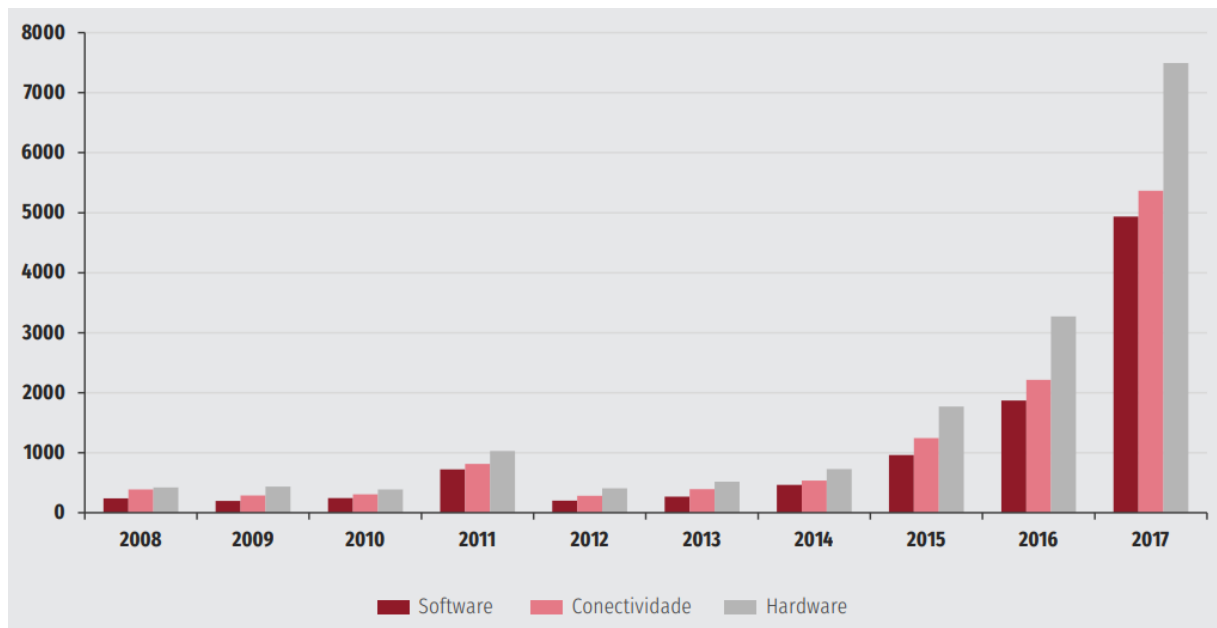
#### 4.12 ANÁLISE DE PATENTES

Neste tópico, uma análise sobre os pedidos de patentes é realizada, com base no relatório da CNI (2020c), com objetivo de demonstrar o crescimento e a importância das tecnologias habilitadoras da I4.0 para as organizações.

O relatório da CNI (2020c) traz uma análise do aumento de pedidos de patentes no Brasil, entre os anos de 2008 a 2017. Em 2008, o Brasil recebeu 1.202 depósitos de patentes de invenções relacionadas à I4.0, o que representou 5% do total de 23.170 pedidos. Já em 2017, 14.634 patentes foram depositadas, representando 57% dos 25.658 pedidos de patente depositados neste ano. Este fato pode ser observado na Figura 6.

A pesquisa da CNI (2020c) relaciona os grupos de subgrupos de patentes com base em três tipos: tecnologias centrais, que transformam um produto em um dispositivo inteligente conectado à internet (hardware, software e conectividade); tecnologias habilitadoras da I4.0; e setores de aplicação, sendo artigos pessoais, residencial, automóveis, indústria e cidades.

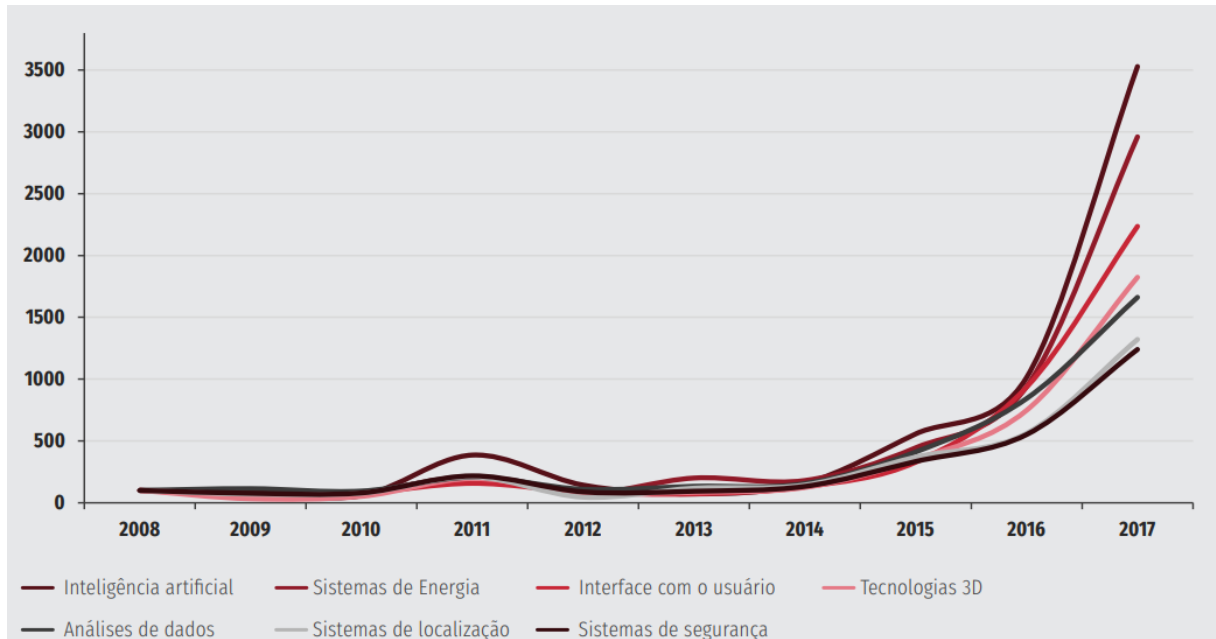
Figura 6 – Pedidos de patentes entre 2008 e 2017.



Fonte: CNI (2020c).

O subgrupo com maior pedido de patentes é o de análise de dados, com 49% das invenções, demonstrando a importância da aquisição, tratamento e análise de dados para a I4.0. Outro subgrupo com grande importância em termos de patentes é o de sistemas de segurança, com 22% do total. Estas tecnologias relacionam-se às questões de sigilo e privacidade de dados, essenciais para proteger as estratégias empresariais. O terceiro em importância é o subgrupo de sistemas de localização, que são tecnologias relevantes para a logística de produtos se associadas às outras, como IA, por exemplo. Esta tecnologia de IA, aliás, apresenta maior crescimento em relação aos demais subgrupos que não foram citados acima, permitindo a aplicação de técnicas avançadas baseadas em lógica, como o Aprendizado de Máquina. Este crescimento pode ser observado na Figura 7 (CNI, 2020c).

Figura 7 – Evolução das tecnologias habilitadoras da I4.0.



Fonte: CNI (2020c).

De modo a aprofundar o conteúdo sobre patentes, o Quadro 10 apresenta uma descrição sobre algumas patentes registradas sobre o contexto da I4.0.

Quadro 10 – Patentes e Indústria 4.0.

Autor	Descrição
(COUTINHO, 2019)	A patente visa conectar o CNC dedicado a internet das coisas, de modo a gerar dados do processo e receber dados para alterar o funcionamento da máquina. Além disso, pode controlar os eixos motorizados por saídas de pulso e direção e/ou entradas de <i>encoder</i> e saídas analógicas que podem controlar desde motores de passo a acionamentos com motores de corrente contínua.
(CORTELETTI <i>et al.</i> 2019)	Os autores apresentam um novo método e dispositivo IoT para monitoramento remoto de bancos de bateria, para realizar um diagnóstico das necessidades de ações preventivas e corretivas das baterias, evitando falhas dos

	componentes. Para tanto, monitoram-se dados de tensão, corrente, temperatura e resistência interna, visando reduzir a manutenção corretiva e aumentar a vida útil dos produtos.
(DOTTO, 2019)	O autor apresenta um sistema acústico magnético sem fio, para monitorar processos de manufatura como furação, torneamento, fresamento, entre outros. O foco é o monitoramento em tempo real destes processos, para evitar o mal funcionamento ou falhas. O objetivo é reduzir a lacuna no monitoramento e controle de qualidade dos processos de manufatura. O sistema ainda permite a análise em tempo real da condição da ferramenta ou peça fabricada, com base nas imagens do processo.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A seguir, o tópico de contribuição Instituto-Indústria é detalhado.

#### 4.13 CONTRIBUIÇÃO INSTITUTO-INDÚSTRIA

Esta seção busca discutir a importância das patentes e a contribuição dos Institutos Federais, em especial o Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), para o fomento e estabelecimento da inovação e geração de valor entre estas entidades.

Primeiramente, é necessário entender que a patente está inserida no contexto da propriedade intelectual. A Propriedade Intelectual é uma expressão que visa garantir a inventores ou responsáveis pela produção do intelecto o direito de receber, por um determinado período de tempo, uma recompensa pela própria criação. As marcas, patentes, desenhos industriais, indicações geográficas e programas de computador são ativos valiosos que as empresas possuem. Assim, proteger estes ativos fortalece as atividades comerciais, licenciando seus ativos e criando laços estratégicos com outras empresas. Neste contexto, o papel das universidades e institutos de pesquisa brasileiros pode contribuir para a divulgação científica, facilitando a comunicação com o público (LIBERATO, 2018).

As interações entre universidade-indústria-governo são alvo de vários estudos com foco na promoção da inovação, sendo chamada de modelo "Hélice Tríplice", contribuindo para o crescimento econômico e social baseados no conhecimento. Este modelo visa aprimorar as interações entre a universidade, a Indústria e o governo. Neste contexto, acredita-se que a universidade está deixando de ter um papel secundário para ter um papel primordial, como geradora de novas indústrias e empresas. Cita-se como exemplo, o caso do Vale do Silício, cujo papel das universidades foi importante para a dinâmica interativa da Hélice Tríplice (ETZKOWITZ; ZHOU, 2017).

Neste contexto, as chamadas Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação (ICTs) podem contribuir para o estímulo e desenvolvimento de uma maior parceria com as empresas, ampliando o desenvolvimento social. É sabido que existe uma grande lacuna entre avanço científico e incorporação da inovação tecnológica aos setores produtivos do país (MATOS *et al.*, 2019).

Existem diversos intervenientes na cooperação entre universidades e empresas, facilitando, auxiliando e estimulando-as a interagirem. Outros podem dificultar, desestimular ou impedir esta relação. O conhecimento e os estímulos financeiros, compostos pela captação de recursos, minimização de custos, financiamentos com juros reduzidos e incentivos fiscais figuram como os fatores motivacionais mais importantes para o processo de cooperação entre estes entes (MIKOSZ; LIMA, 2018).

Deste modo, o papel dos institutos federais é importante para contribuir com o fomento à inovação tecnológica. No Espírito Santo, o Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes) visa promover a educação profissional pública de excelência, buscando a integração entre ensino, pesquisa e extensão, contribuindo para uma sociedade mais democrática, justa e sustentável. A instituição oferece desde cursos técnicos até o doutorado e possui mais de 30 mil alunos. De acordo com o site institucional, são ofertados 98 cursos técnicos, 66 cursos de graduação, 34 cursos de pós-graduação, 12 mestrados e 1 doutorado profissional. Estão em funcionamento 22 campi, com 3 outros em implantação, se fazendo presente em todas as microrregiões capixabas. O instituto ainda possui 49 polos de educação a distância, o Polo de Inovação e a Cidade de Inovação (IFES, 2023a).

Diversas iniciativas são utilizadas pelo Ifes para fomentar a inovação, sendo cursos e minicursos, projetos de pesquisa e extensão e outros. Uma destas iniciativas é o Polo de Inovação Vitória do Ifes, que busca fomentar projetos de pesquisa voltados à inovação, atuando em conjunto com empresas industriais (IFES, 2023b).

Outra iniciativa é a Cidade de Inovação, que foi criada com objetivo de fomentar soluções em conjunto com a sociedade para o desenvolvimento humano, econômico e social. Para tanto, o Ifes atua em parceria com outras instituições governamentais, o setor produtivo e a sociedade. O objetivo é de ter um espaço para que vários parceiros tenham atividades e laboratórios, contribuindo para a inovação na comunidade Ifes (IFES, 2023c).

Além destes, cita-se o Núcleo Incubador de Empreendimentos do Campus Vitória, cujo foco está no apoio e incubação de empresas com projetos inovadores, de cunho tecnológico e social, fornecendo infraestrutura, assessoria em gestão de inovação e propriedade intelectual, acesso a bolsistas e estagiários, capacitação, networking e suporte para captar recursos (IFES, 2017).

A seguir, o tópico de Indústria 5.0 é detalhado.

#### 4.14 INDÚSTRIA 5.0

A Indústria 5.0 é um conceito abrangente de uma indústria sustentável e centrada no ser humano. Seu paradigma reside na agilidade e resiliência dos sistemas com uso de tecnologias adaptativas e mais flexíveis, envolvendo ações de sustentabilidade, promovendo talento, diversidade e empoderamento (HUANG *et al.*, 2022).

Segundo Jafari, Azarian e Yu (2022), a inserção do ser humano, a resiliência e a sustentabilidade impulsionam o conceito de Indústria 5.0, fazendo uma transição da Indústria 4.0 focada em tecnologia para uma indústria mais inteligente e harmoniosa. Neste caso, o ser humano e a tecnologia são conceitos condutores da transformação tecnológica.

A Indústria 5.0 é resultado da necessidade encontrada pela Comissão Europeia de integrar melhor a questão social e ambiental europeia na inovação tecnológica, trazendo uma abordagem mais sistêmica do processo. Questões como o *Green Deal* exigem a necessidade de uma transição para uma economia mais circular e

dependente de recursos sustentáveis. Além disso, cita-se a pandemia da Covid-19, que promoveu uma grande modificação na forma de abarcar os métodos e abordagens de trabalho existentes, apontando a fragilidade da cadeia de suprimentos global. A Indústria 5.0 concentra-se em três pilares: a centralização no ser humano, a sustentabilidade e a resiliência (XU *et al.*, 2021).

Adel (2022) cita como desafios da Indústria 5.0:

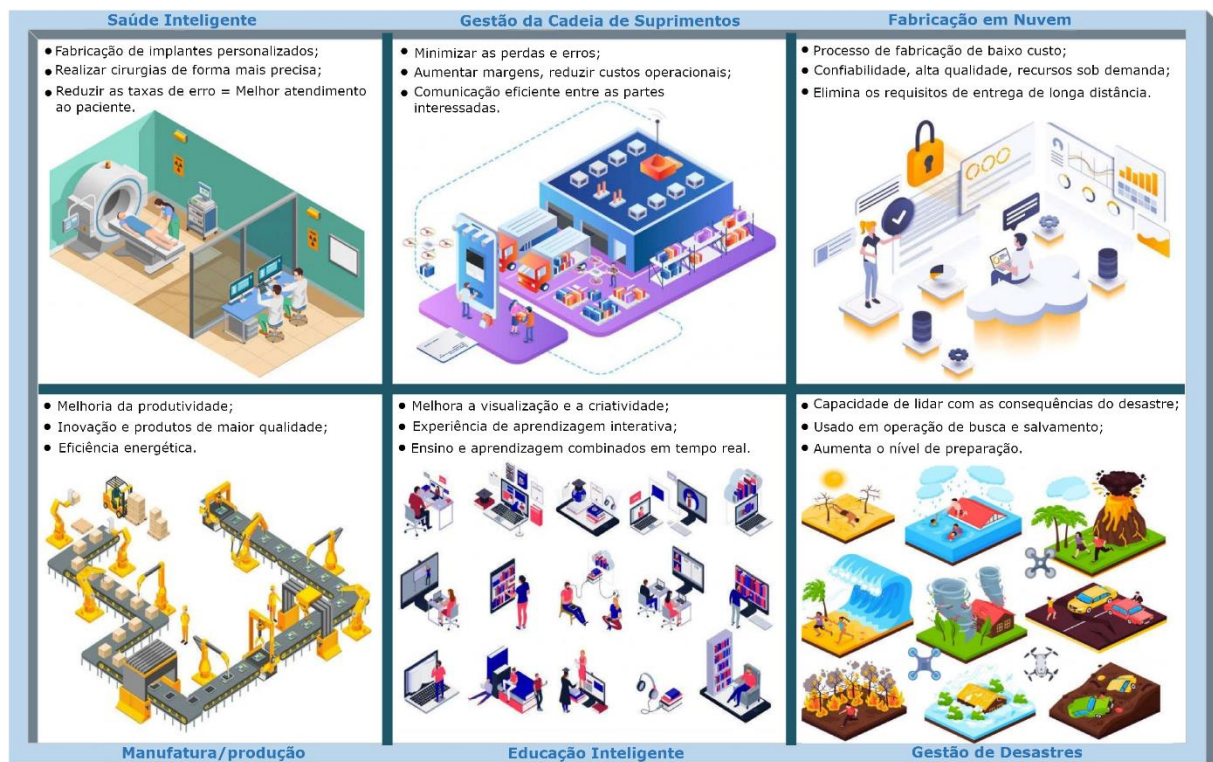
1. A necessidade de desenvolver novas competências, como trabalho com robôs avançados, exigindo alto nível de habilidades técnicas;
2. A adoção de tecnologias avançadas requer tempo e esforço dos trabalhadores;
3. Os altos investimentos para a Indústria 5.0, como, por exemplo, o custo de implantar máquinas inteligentes e o treinamento de funcionários para aumentar a produtividade e eficiência;
4. As questões de segurança, com uso das Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) para obter requisitos sólidos de segurança.

Algumas das aplicações da Indústria 5.0 são apresentadas na Figura 8 e discutidas por Maddikunta *et al.* (2022):

- Saúde inteligente: uso de *cobots* ou robôs colaborativos para realizar cirurgias com maior precisão, além do uso da tecnologia para fabricação de dispositivos personalizados, implantes, etc. (REINHARDT; OLIVEIRA; RING, 2020).
- Fabricação em nuvem: A nuvem promove colaboração eficiente e de baixo custo de processos de fabricação. Uso de recursos da nuvem promove maior confiabilidade, qualidade, economia e recursos sob demanda. Além disso, o uso da nuvem pode facilitar a manufatura aditiva. O potencial das tecnologias de Inteligência Artificial, de Computação de Borda e Redes de Telecomunicações baseadas em 5G podem expandir a capacidade de sistemas de fabricação em nuvem.
- Gestão da cadeia de suprimentos: uso de tecnologias pode facilitar o gerenciamento da cadeia de suprimentos, promovendo a personalização em massa dos sistemas de produção. O uso de Gêmeos Digitais pode contribuir para que as indústrias reduzam custos operacionais e aumentem suas margens, nas várias fases da cadeia de suprimentos.

- **Manufatura/produção:** uso de robôs para desenvolver atividades colaborativas, modificando normas e promovendo mudanças fundamentais na abordagem de manufatura.
- **Educação:** com a Indústria 5.0, o foco é de criar sinergia entre máquinas autônomas e humanos. A combinação entre especialistas altamente treinados e o maquinário proporcionado pela Indústria 5.0 pode contribuir para uma produção com maior segurança, eficácia e sustentabilidade.
- **Gestão de desastres:** estratégias de prevenção à desastres contribuem para reduzir suas consequências. Muitos planos de recuperação de desastres foram revisados devido à pandemia de COVID-19. Sukmono e Junaedi (2020) citam a contribuição da Inteligência Artificial e da Internet das Coisas para resolver problemas decorrentes de desastres, gerenciando-os de maneira mais eficiente com a colaboração de humanos e máquinas inteligentes.

Figura 8 – Aplicações da Indústria 5.0.



Fonte: Traduzido de Maddikunta *et al.* (2022).

No Quadro 11, alguns trabalhos envolvendo a Indústria 5.0 são apresentados.

Quadro 11 – Trabalhos de Indústria 5.0.

Autor	Descrição
(MADDIKUNTA <i>et al.</i> , 2022)	O artigo apresenta inúmeras possibilidades de aplicações e tecnologias de suporte da Indústria 5.0. Definições e conceitos são apresentados pela perspectiva de profissionais e acadêmicos. Aplicações como assistência médica inteligente, fabricação em nuvem, gestão da cadeia de suprimentos e produção industrial são citadas, além de tecnologias de suporte como Gêmeos digitais e Robôs colaborativos. Os desafios também são acrescentados e as possíveis questões em aberto são sugeridas.
(NAHAVANDI, 2019)	O artigo apresenta os recursos e preocupações que fabricantes devem ter na Indústria 5.0. Algumas aplicações bem sucedidas também são apresentadas, avaliando também o impacto da Indústria 5.0 no contexto da indústria de manufatura e na economia em geral. Assim, questões envolvendo produtividade, economia e geração de emprego podem ser obtidas por meio da Indústria 5.0.
(NAYERI; SAZVAR; HEYDARI, 2023)	O artigo apresenta uma estrutura de tomada de decisão para uma Cadeia de Suprimentos responsiva, levando em conta as dimensões da Indústria 5.0 em sistemas de saúde. O método <i>best-worst</i> é desenvolvido para calcular os pesos dos indicadores. Em seguida, o método <i>Fuzzy</i> também é utilizado para ranquear as alternativas viáveis. Os resultados apresentaram a capacidade de resposta, a sustentabilidade a resiliência e a centralização no ser humano como os fatores mais importantes para a Indústria 5.0 no contexto da Cadeia de Suprimentos responsiva.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

#### 4.15 FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO, DESAFIOS E BENEFÍCIOS DA I4.0

Neste tópico, são investigados os fatores críticos de sucesso, os desafios e os benefícios da implementação da Indústria 4.0 nas organizações.

##### 4.15.1 Fatores críticos de sucesso da I4.0

Os elementos cruciais de uma fábrica inteligente, os funcionários, as máquinas e os produtos geram um grande impacto nos modelos de negócios. Desta forma, é necessário analisar os fatores críticos que afetam a gestão destes modelos, de modo a incentivar os gestores a considerá-los no processo de planejamento da organização (JERMAN; ERENDA; BERTONCELJ, 2019).

De acordo com Khin e Kee (2022), os fatores de decisão da I4.0 podem contribuir para que os fabricantes entendam melhor onde investir na I4.0, analisando suas vantagens, desvantagens, benefícios, habilidades, suporte necessário e, ainda, quais desafios podem ser enfrentados. Os resultados de seus estudos apresentam impulsionadores, facilitadores e impeditivos que desempenham papel fundamental na decisão de adoção da I4.0. Os fatores mais importantes foram definidos como: benefícios esperados, oportunidades de mercado, problemas trabalhistas, requisitos dos clientes, concorrência e imagem de qualidade.

O Quadro 12 apresenta os fatores críticos de sucesso mais citados pela literatura.

Quadro 12 – Fatores críticos de sucesso da Indústria 4.0.

<b>Autores</b>	<b>Fatores críticos de sucesso</b>
(PARHI <i>et al.</i> , 2022)	Capacitação da força de trabalho, capacidades técnicas, flexibilidade do sistema, infraestrutura de software, precisão operacional e relações com partes interessadas.
(YILMAZ <i>et al.</i> , 2022)	Cultura organizacional, habilidade e motivação, suporte da alta gerência, liderança, participação dos funcionários, transparência dos gestores, comunicação entre gerência e funcionários e treinamento.
(HORVÁTH; SZABÓ, 2019)	Recursos humanos, recursos financeiros e rentabilidade, condições de mercado e concorrentes, expectativas de gestão, realidade de gestão, produtividade e eficiência, fatores organizacionais, integração tecnológica e de processos e cooperação.

(JABBOUR <i>et al.</i> , 2018)	Liderança de gestão, prontidão para mudança organizacional, compromisso da alta administração, alinhamento estratégico, treinamento e capacitação, fortalecimento, trabalho em equipe e equipe de implementação, cultura organizacional, comunicação, gerenciamento de projetos, cultura nacional e diferenças regionais.
(JAYASHREE <i>et al.</i> , 2022)	Liderança de gestão, trabalho em equipe, pressão do mercado, Suporte externo, disponibilidade de recursos de TI e sustentabilidade.
(SONY <i>et al.</i> , 2021)	Apoio da alta direção, sustentabilidade operacional, econômica, ambiental e social, alinhamento das iniciativas da indústria 4.0 com a estratégia organizacional, mudança da gestão, digitalização da organização, esforço de digitalização da cadeia de suprimentos, produtos e/ou serviços inteligentes, gerenciamento de projetos, apoio dos funcionários e gestão da segurança cibernética.
(WANKHEDE; VINODH, 2021)	Gestão de manufatura, estratégia de manufatura, tecnologia de manufatura, força de trabalho e gestão organizacional.
(YU; SCHWEISFURTH, 2020)	Grau de implementação, conhecimento sobre tecnologia, benefício da implementação da tecnologia, custo de implementação de tecnologia, grau de automação, método de produção, variedade de produtos, número de empregados, faturamento e pressão regulatória.
(BRAVI; MURMURA, 2021)	Qualidade do produto, assistência no pós-venda ao cliente, customização de produto, capacidade de antecipar as necessidades futuras dos clientes, possibilidade de acompanhamento e antecipação do produto e possibilidade de dar nova vida a produtos artesanais tradicionais.
(KUMAR; BHATIA, 2021)	Organizacional, humano, tecnológico, desempenho de mercado, desempenho ambiental e dinamismo ambiental.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

#### 4.15.2 Benefícios da I4.0

Masood e Sonntag (2020) apresentam os benefícios de implementar a I4.0, sendo: custo operacional, que diminui ao implementar as tecnologias; eficiência operacional, que aumenta após implementar as tecnologias; flexibilidade operacional, que é aprimorada; qualidade de fabricação e a vantagem competitiva, que é o reflexo da adoção da I4.0 pelas organizações.

Para Cugno, Castagnoli e Büchi (2021), a abertura às tecnologias da I4.0 pode melhorar o desempenho das organizações. Assim, são citados como benefícios: flexibilidade de produção, velocidade da produção de produtos, maior capacidade de saída dos produtos, custos de configuração reduzidos, menos erros e menos tempo

de inatividade da máquina, maior qualidade do produto e menos produtos rejeitados, opinião melhorada dos clientes sobre os produtos e melhor produtividade dos recursos humanos.

Sony *et al.* (2021) descreve os cinco principais benefícios da I4.0 como sendo:

- Melhorar a satisfação do cliente;
- Maximizar a eficiência, cortar custos operacionais e manter a competitividade no ambiente de negócios;
- Tomar decisões organizacionais baseadas em *Big Data*;
- Atender às crescentes necessidades de produtos inteligentes; e
- Alcançar eficácia e agilidade organizacional.

#### 4.15.3 Desafios da I4.0

Segundo Lee e Lim (2021), qualquer iniciativa de mudança em larga escala não é algo simples, e isto vale para a I4.0. Dada a natureza multidimensional, os desafios da I4.0 são de grande importância para a correta implementação das tecnologias habilitadoras nas organizações. Para tanto, os desafios mais citados na literatura foram mapeados. No Quadro 13, estes desafios são detalhados.

Quadro 13 – Resumo dos desafios da I4.0.

Dimensão	Desafios	Autores
Técnica	Prontidão tecnológica	(AOUN <i>et al.</i> , 2021; BELTRAMI <i>et al.</i> , 2021; BRAVI; MURMURA, 2021; CHAUHAN; SINGH; LUTHRA, 2021; HORVÁTH; SZABÓ, 2019; KUMAR; SINGH; KUMAR, 2021; KUMAR; SINGH; DWIVEDI, 2020; KUMAR; BHATIA, 2021; LEE; LIM, 2021; OZKAN-OZEN; KAZANCOGLU; KUMAR MANGLA, 2020; RAJ <i>et al.</i> , 2020; SENNA <i>et al.</i> , 2022; SHARMA <i>et al.</i> , 2021; SONY <i>et al.</i> , 2021; TAY; ALIPAL; LEE, 2021)
	Análise e gerenciamento de dados	
	Segurança de dados e Privacidade	
	Falta de padronização	
	Falta de infraestrutura de TI	
	Problemas de integração e compatibilidade	
Econômica	Alto custo de implantação	(ABDUL-HAMID <i>et al.</i> , 2020; AOUN <i>et al.</i> , 2021; BRAVI; MURMURA, 2021; CHAUHAN; SINGH; LUTHRA, 2021; CUGNO; CASTAGNOLI; BÜCHI, 2021; KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; KUMAR; SINGH; DWIVEDI, 2020; MAJUMDAR; GARG; JAIN, 2021; MASOOD; SONNTAG, 2020; OZKAN-OZEN;
	Ganhos econômicos incertos	
	Falta de clareza dos benefícios econômicos	
	Restrições financeiras	

		KAZANCOGLU; KUMAR MANGLA, 2020; RAJ <i>et al.</i> , 2020; SENNA <i>et al.</i> , 2022; SONY <i>et al.</i> , 2021; TAY; ALIPAL; LEE, 2021; WANKHEDE; VINODH, 2021)
Social	Condições de trabalho	(AOUN <i>et al.</i> , 2021; BELTRAMI <i>et al.</i> , 2021; BRAVI; MURMURA, 2021; CHAUHAN; SINGH; LUTHRA, 2021; HORVÁTH; SZABÓ, 2019; KUMAR; SINGH; KUMAR, 2021; KUMAR; SINGH; DWIVEDI, 2020; KUMAR; BHATIA, 2021; LEE; LIM, 2021; OZKAN-OZEN; KAZANCOGLU; KUMAR MANGLA, 2020; RAJ <i>et al.</i> , 2020; SENNA <i>et al.</i> , 2022; SHARMA <i>et al.</i> , 2021; SONY <i>et al.</i> , 2021; TAY; ALIPAL; LEE, 2021)
	Saúde e segurança	
	Substituição do trabalhador	
	Habilidades e competências dos funcionários	
	Falta de treinamento	
	Resistência à mudança	
	Falta de mão de obra qualificada	
Política	Regulamentos e políticas	(AOUN <i>et al.</i> , 2021; BELTRAMI <i>et al.</i> , 2021; BRAVI; MURMURA, 2021; CHAUHAN; SINGH; LUTHRA, 2021; KUMAR; SINGH; KUMAR, 2021; KUMAR; SINGH; DWIVEDI, 2020; KUMAR; BHATIA, 2021; LEE; LIM, 2021; OZKAN-OZEN; KAZANCOGLU; KUMAR MANGLA, 2020; RAJ <i>et al.</i> , 2020; SENNA <i>et al.</i> , 2022; SHARMA <i>et al.</i> , 2021)
	Falta de apoio do governo	
	Incentivos fiscais e econômicos	
Organizacional	Prontidão organizacional	(BELTRAMI <i>et al.</i> , 2021; BRAVI; MURMURA, 2021; CHAUHAN; SINGH; LUTHRA, 2021; HORVÁTH; SZABÓ, 2019; KAMBLE; GUNASEKARAN; SHARMA, 2018; KUMAR; SINGH; KUMAR, 2021; KUMAR; SINGH; DWIVEDI, 2020; LEE; LIM, 2021; MAJUMDAR; GARG; JAIN, 2021; OZKAN-OZEN; KAZANCOGLU; KUMAR MANGLA, 2020; RAJ <i>et al.</i> , 2020; SENNA <i>et al.</i> , 2022; WANKHEDE; VINODH, 2021)
	Envolvimento dos stakeholders	
	Dificuldade de mudança organizacional	
	Falta de metodologias para otimização de processos	
	Falta de comprometimento da alta gerência	
	Dificuldade de integração da cadeia de valor	
	Falta de planejamento e estrutura organizacional	
	Falta de conhecimento sobre a I4.0	
	Cultura organizacional	
	Barreiras intrínsecas dos departamentos	
Sustentabilidade	Práticas sustentáveis	(BELTRAMI <i>et al.</i> , 2021; KUMAR; SINGH; KUMAR, 2021; KUMAR; SINGH; DWIVEDI, 2020; KUMAR; BHATIA, 2021; WANKHEDE; VINODH, 2021)
	Falta de conscientização sobre benefícios da I4.0 para a produção sustentável	
	Falta de gestão de resíduos	
	Falta de comprometimento com a sustentabilidade	

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

## 4.16 MODELOS DE MATURIDADE

### 4.16.1 Visão geral

A Quarta Revolução Industrial está promovendo mudanças relevantes na maneira como as organizações produzem e alterando o estilo de vida da sociedade. Desta forma, é extremamente válido identificar as capacidades das empresas no contexto da I4.0 (DIKHANBAYEVA *et al.*, 2020).

Colli *et al.* (2019) dizem que o setor produtivo está sendo fortemente modificado por meio da transformação digital, proporcionando uma grande mudança industrial. Apoiar as organizações nesta mudança é um objetivo contemplado pelos diversos modelos de maturidade, normalmente operacionalizados por questionários padronizados. Os modelos de maturidade oferecem uma avaliação do atual estágio de maturidade da organização e fornecem um conjunto de recomendações para mudança e melhoria nas empresas.

Santos e Martinho (2020) definem modelos de maturidade como instrumentos de mensuração do nível de maturidade de uma empresa em um determinado domínio, ou um processo relacionado a um objetivo desejado. Estes modelos se baseiam na ideia de que pessoas, organizações, áreas funcionais e processos progredem por meio de etapas mais avançadas de maturidade, alcançando determinados níveis. Um nível de um modelo de maturidade diz respeito ao ponto inicial para a evolução da maturidade desejada, planejada e implementada. Modelos de maturidade visam quantificar as atividades realizadas e mensurá-las e amadurecê-las com o tempo.

Ariffin e Ahmad (2021) afirmam que a maturidade diz respeito à evolução e desenvolvimento dos indicadores organizacionais, isto é, pessoas, processos, tecnologias, habilidades e vontade de se adaptar às práticas de melhoria da qualidade.

Assim, modelos de maturidade são ferramentas de medição que podem ser utilizadas pelas empresas para avaliar a maturidade em certo ramo ou domínio, com base em critérios diversificados, de modo a mensurar sua capacidade de melhoria contínua em determinado escopo (MOHAMED; HASSAN; HAMID, 2018).

Fraser, Moultrie e Gregory (2002) afirmam que para elaborar modelos de maturidade é necessário definir o número de dimensões, identificando estágios ou níveis de maturidade, com uma descrição das características de desempenho nos vários níveis de granularidade. Dessa forma, os componentes que podem ou não estar presentes em modelos de maturidade envolvem:

- Vários níveis (de três a seis);
- Um descritor para cada nível;
- Uma descrição genérica ou resumo das características de cada nível;
- As dimensões;
- Elementos ou atividades para cada dimensão;
- Uma descrição de cada atividade em cada nível de maturidade.

#### **4.16.2 Análise dos modelos de maturidade da I4.0**

Para desenvolver um modelo de maturidade, é necessário entender como a literatura aborda o tema e as lacunas apresentadas nos modelos. Nesta seção, são listados os modelos de maturidade da literatura, com base nas dimensões, elementos e níveis de maturidade encontrados.

Sjödin *et al.* (2018) elaboraram um modelo de maturidade com base em dados colhidos de cinco fábricas, operadas pelos dois fabricantes automotivos que são líderes na região. As dimensões sugeridas para o modelo foram compostas por Pessoas, Tecnologia e Processos. Os níveis de maturidade foram definidos de um a quatro. Para os autores, as fábricas inteligentes podem melhorar a eficiência dos processos, reduzir custos operacionais, melhorar a qualidade dos produtos e aumentar a segurança e sustentabilidade do processo.

Oliveira Júnior (2018) elaborou um modelo de maturidade para a I4.0 com as dimensões Tecnologia, Organização e Pessoas, tendo os elementos: Estratégia Organizacional, Gerenciamento de dados, Tecnologia da Informação, Internet das Coisas, Competências em Tecnologias, Abertura à inovação e Cultura Organizacional. A validação do modelo se deu por meio da execução de um painel com especialistas, composto por dez membros. Os níveis foram definidos como de zero a cinco. Uma empresa brasileira foi escolhida para avaliar a maturidade de seus processos.

Percebeu-se que a maturidade da empresa está no nível 2, com utilização de sistemas amplamente conectados, mas ainda em processo de digitalização.

Santos (2018) desenvolveu um modelo de maturidade para empresas de manufatura. As dimensões encontradas foram: Estratégia, estrutura e cultura organizacional; Equipes de trabalho; Fábricas inteligentes; Processos inteligentes; e Produtos e serviços inteligentes. Foram definidos cinco níveis, de 0 a 4, para o trabalho. Para validação, entrevistas qualitativas em empresas do setor industrial foram elaboradas com especialistas. O setor industrial escolhido para análise e definição da maturidade foi o automotivo.

Colli *et al.* (2019) realizaram uma abordagem baseada na Aprendizagem Baseada em Problemas ou *Problem-Based Learning*, para estruturar um procedimento de avaliação, identificando recomendações de melhoria específicas ao contexto das empresas. Assim, a abordagem proposta aliada a um modelo de maturidade é testada em três indústrias. O modelo de maturidade analisado é baseado no modelo de maturidade da *Acatech* (SCHUH *et al.*, 2017) que foi adaptado, incluindo um estágio adicional ("nenhum") e algumas etapas foram renomeadas. No caso das dimensões, adicionou-se mais uma ao modelo, sendo, portanto, utilizadas as seguintes dimensões: governança, tecnologia, conectividade, criação de valor e competências.

Frank, Dalenogare e Ayala (2019) implementam um estudo para avaliar tecnologias *front-end* e base da I4.0. Assim, as tecnologias *front-end* são descritas como: Manufatura Inteligente ou *Smart Manufacturing*, Produtos inteligentes ou *Smart Products*, Cadeia de Suprimentos Inteligente ou *Smart Supply Chain* e Trabalho Inteligente ou *Smart Working*. As tecnologias de base são Internet das Coisas, Nuvem ou *cloud* e Análise de *Big Data*. Isto foi feito por meio do uso de um questionário com base na escala Likert, para classificar as empresas quanto aos padrões de implementação da I4.0. Em seguida, foi feita uma análise de dados dos diferentes níveis de maturidade das empresas na adoção das tecnologias de *Smart Manufacturing*, para descobrir padrões e agrupá-las em *clusters*. Ao final, as descobertas foram resumidas em uma estrutura final ou *Framework*, que representa um padrão de maturidade da implementação da I4.0 nas empresas estudadas.

Gürdür, El-Khoury e Törngren (2019) realizaram um estudo para avaliar a maturidade da área de Análise de Dados da indústria sueca, com uso de questionários aplicados em algumas empresas. Os autores fizeram uso do modelo de Schuh *et al.*, 2017, de nome *Acatech Industrie 4.0 Maturity Index*, utilizando apenas a área de Análise de Dados. As dimensões definidas foram: Prontidão de Recursos, Sistemas de Informação, Prontidão Cultural e Organizacional. Em seguida, um questionário online foi desenvolvido para avaliar a prontidão da indústria sueca. Cinco níveis de prontidão foram fixados. Os resultados foram: alto nível de Prontidão Cultural e Recursos, valor médio para Sistemas de Informação e valor médio-baixo de Prontidão Organizacional.

Ghobakhloo e Ching (2019) buscaram identificar os determinantes da adoção da manufatura inteligente nas Pequenas e Médias Empresas (PMEs). Foi utilizada a estrutura *Technology-Organization-Environment* (TOE) ou Tecnologia-Organização-Ambiente (TOA), avaliando as características técnicas das Informações e Tecnologias Digitais Relacionadas à Manufatura Inteligente ou *Smart Manufacturing-related Information and Digital Technologies* (SMIDT), o valor percebido, os custos e a compatibilidade percebida do SMIDT. Foram aplicados questionários baseados em medidas correspondentes ao modelo de adoção do SMIDT, com base na escala Likert, aplicados em PMEs do Irã e da Malásia. Os resultados apresentados confirmam o conjunto de fatores tecnológicos, organizacionais e ambientais como determinantes para a adoção do SMIDT nas PMEs.

Rafael *et al.* (2020) desenvolveram um modelo de maturidade adaptado do modelo IMPULS de Lichtblau *et al.* 2015, composto pelas dimensões: produtos inteligentes, operações inteligentes, orientação a dados, fábrica inteligente, estratégia e organização e funcionários. O modelo também contém 24 elementos e seis níveis de maturidade (*outsider*, iniciante, intermediário, experiente, especialista, *top performer*). Foi utilizado um questionário padronizado com base na escala *Likert*, aplicado a uma empresa fabricante de máquinas de dobra, punção e corte a *laser*. Para a aplicação do teste, foram feitas reuniões com o Conselho de Administração da Empresa. O objetivo do modelo era fornecer uma ferramenta de autoavaliação acessível para fabricantes de máquinas-ferramenta.

Wagire *et al.* (2020) elaboraram um modelo de maturidade composto por sete dimensões e 38 itens de maturidade. As seguintes dimensões foram definidas: pessoas e cultura, conscientização da indústria 4.0, estratégia organizacional, cadeia

de valor e processo, tecnologia de fabricação inteligente, tecnologia orientada a produtos e serviços e tecnologia de base da indústria 4.0. Foram definidos quatro níveis de maturidade, do mais baixo ao mais alto. O modelo é focado na tecnologia para avaliar a maturidade das empresas de manufatura da Índia. Para tanto, é realizado um estudo em uma empresa de fabricação de componentes automotivos, obtendo como resultado nível 2 de maturidade.

Santos e Martinho (2020) realizaram um estudo com engenheiros e gerentes de algumas indústrias, além de testes-piloto em duas indústrias brasileiras do ramo automotivo para validar o modelo de maturidade definido. Cinco dimensões foram definidas: estratégia, estrutura e cultura organizacional; força de trabalho; fábricas inteligentes; processos inteligentes; e produtos e serviços inteligentes. Seis níveis de maturidade foram definidos, de 0 a 5, com o maior nível sendo a referência a ser alcançada.

Pirola, Cimini e Pinto (2020) buscaram estabelecer uma ferramenta de análise de maturidade para superar limitações dos modelos existentes, com foco nas PMEs. Foram avaliadas 20 PMEs italianas. Cinco dimensões foram definidas: estratégia, pessoas, processos, tecnologia e integração. Além disso, cinco níveis de maturidade foram definidos. A fase de validação foi feita com duas empresas, por meio de entrevistas. Em seguida, o questionário foi aplicado. Os principais problemas encontrados foram a complexidade do gerenciamento de dados e informações dentro e fora das empresas e a sua integração. Percebe-se também que a dimensão processos é a mais madura entre as empresas estudadas.

Hajoary (2020) desenvolveu um modelo de maturidade com base na revisão de literatura de 53 artigos. Dez dimensões foram encontradas: estratégia e organização, manufatura e operações, cadeia de suprimentos, modelo de negócios, TI, pessoas, clientes, produto, serviços e cultura. Como conclusão, percebeu-se uma liderança da Alemanha na questão da maturidade da I4.0 e do desenvolvimento de modelos de prontidão.

Estensoro *et al.* (2021) desenvolvem uma estrutura para implementação da I4.0 de acordo com os estágios de desenvolvimento das PMEs, aplicando um método misto de abordagem, com uso de entrevistas e dados de pesquisa, além de um estudo de caso na Espanha. Foram definidas pré-condições para a I4.0, como inovação,

produtos e estratégia e condições para a I4.0, como mercado, concorrentes e equipe qualificada. Seguiu-se então para as entrevistas e levantamentos. Para a pesquisa quantitativa, utilizou-se escala *Likert* de quatro pontos. Utilizou-se um software de estatística chamado IBM SPSS® para validação e análise dos dados. Ao final, quatro etapas de desenvolvimento foram encontradas, sendo: não implementadores sem pré-condições da I4.0; implementadores não planejados; implementadores plenos e implementadores completos. Assim, o artigo apresenta recursos necessários para a implementação da I4.0 em PMEs, baseadas no estágio de evolução.

Caiado *et al.* (2021) desenvolveram um modelo de maturidade baseado na lógica *fuzzy* combinado com uma simulação de Monte Carlo, integrando operações e a gestão da cadeia de suprimentos com a I4.0. O modelo de maturidade foi obtido por meio da comparação dos modelos da literatura, além do desenho do modelo de maturidade. Em seguida, partiu-se para a implementação do modelo, por meio de um questionário e da modelagem de sistemas inferenciais *fuzzy*. Por fim, foi feita uma avaliação do modelo, por meio de um estudo de caso em uma empresa de manufatura. O modelo de maturidade apresentado contém os seguintes indicadores: cliente, logística, fornecedor, integração, produção, planejamento e controle (PPC), qualidade e manutenção.

Liebrecht *et al.* (2021) apresentaram um modelo de *framework* e uma *toolbox* ou caixa de ferramentas de métodos para a I4.0 com base em tipologias de produção. As tipologias definidas foram o foco em grande número de variações com produção manual ou produção automatizada e o foco em um alto volume de produção em uma produção manual ou produção automatizada. Os autores enumeraram 60 métodos divididos em 6 categorias: habilitadores, dados, categoria humana, sistemas de assistência e visualização, networking e transparência e auto-organização e descentralização. Eles ainda realizaram uma avaliação estratégica com os Indicadores-Chave de Desempenho ou *Key Performance Indicators* (KPIs) e uma avaliação monetária com pagamentos recorrentes e acumulados, com o Valor Presente Líquido (VPL). Ao final, os autores encontraram um roteiro que serve de base para a implementação da I4.0 nas empresas, direcionado com os seus objetivos estratégicos e financeiros.

Reiman *et al.* (2021) descreveram o estado da arte sobre Fatores Humanos e Ergonomia (HF/E) relacionados ao contexto da I4.0. Dos 336 artigos, 37 foram analisados para desenvolver um modelo de maturidade no nível de organização para otimizar o desempenho humano no contexto tecnológico da indústria de manufatura. Para tanto, o sistema de trabalho centrado no ser humano foi apresentado em três categorias: tecnológica, organizacional e pessoal. A estrutura de maturidade proposta integra as HF/E com tecnologia em todo o processo de fabricação, definindo baixa maturidade e alta maturidade em quatro cenários, variando a maturidade em baixa e alta nos níveis HF/E e no nível tecnológico.

Gökalp e Martinez (2021) apresentam um estudo para desenvolver um modelo de maturidade de capacidade de transformação digital, aplicando-o em um estudo de múltiplos casos. Este estudo foi feito em duas empresas de diferentes setores, tamanhos e em países distintos, com objetivo de verificar sua usabilidade e aplicabilidade. Os resultados confirmaram a aplicabilidade do modelo para fornecer um roteiro de base para melhoria da maturidade de transformação digital. Os níveis de maturidade encontrados foram: incompleto, executado, gerenciado, estabelecido, previsto, inovador.

A abordagem de Amaral e Peças (2021) envolveu uma estrutura para um modelo de maturidade para PMEs, definido com base na literatura, tendo como base as seguintes dimensões: tecnologia, processos de produção, pessoas, produto inteligente, organização e mudança. Em seguida, os autores realizaram uma comparação dos modelos de maturidade da literatura, levando em conta o contexto da estrutura desenvolvida no trabalho. Escolheu-se um modelo da literatura e desenvolveu-se uma aplicação, definindo sua maturidade com base em um questionário.

Çinar *et al.* (2021) desenvolveram um modelo de maturidade com quatro dimensões, cinco níveis, 60 dimensões de segundo nível e 246 elementos. Além disso, propõem um quadro com quatro camadas e sete níveis hierárquicos. Para validação, eles aplicaram o modelo em uma empresa de fabricação de autopeças, analisando as áreas de lacuna. As dimensões do modelo foram definidas em: fábrica 4.0; logística 4.0; operador 4.0 e gestão 4.0. Além disso, os valores de 0 a 4 foram definidos para os níveis de maturidade. Os autores ainda identificaram um modelo de análise de

tendência da literatura para ser aplicado na empresa estudada. Ao final, percebeu-se que a empresa apresenta nível de maturidade de 2,73 de 5.

Ferreira (2021) elaborou um modelo de maturidade da I4.0 para processos têxteis, com base na validação de especialistas, por meio de um modelo de Análise Multicritério. A sua aplicação aconteceu em empresas do Arranjo Produtivo Local (APL) têxtil do Agreste pernambucano. As dimensões encontradas foram: estratégia e inovação, tecnologia e processos, sustentabilidade, pessoas e liderança. Os níveis de maturidade definidos foram: inexistente, básica, intermediária, experiente, especialista e convergente.

Zoubek *et al.* (2021) elaboraram um modelo de maturidade com foco nos processos ambientais de empresas de manufatura, definindo como dimensões a produção, a logística, a manutenção e a tecnologia da informação (TI). Foram definidos seis níveis de maturidade, de 0 a 5. Em seguida, o modelo foi aplicado dentro da ferramenta de Mapeamento de Fluxo de Valor (MFV), mapeando os processos de produção da empresa. Um questionário e uma entrevista estruturada com funcionários de uma empresa serviram de base para o estudo. Em seguida, a maturidade foi analisada. O foco da pesquisa era mapear os processos da empresa em relação aos aspectos ambientais e encontrar pontos de melhoria nas áreas de produção, logística e outras áreas da empresa.

Castelo-Branco *et al.* (2022) apresentaram um modelo de implementação da I4.0 com base em métodos qualitativos e quantitativos. Com base na literatura, os autores encontraram cinco elementos: estratégia de Tecnologia da Informação (TI) e segurança cibernética, habilitadores, fábrica inteligente, proposta de valor e experiência do cliente.

Beisekenov *et al.* (2022) definiram um modelo de maturidade para a I4.0, específico para a Indústria de Petróleo e Gás, com cinco dimensões: estratégia inteligente, recursos humanos inteligentes, exploração e perfuração inteligente e operação de produção inteligente. Além disso, 5 níveis de maturidade foram estabelecidos, sendo estreante, principiante, aluno, integrador e especialista. Para avaliar o modelo, oito especialistas fizeram uma análise das dimensões e dos elementos definidos pelos autores. O modelo encontrado foi implementado para uma avaliação da prontidão de

três empresas de Petróleo e Gás do Cazaquistão e duas da Noruega. Concluiu-se que as empresas de ambos países apresentam altos níveis de maturidade.

Ünal, Sungur e Yildirim (2022) desenvolveram um modelo de maturidade com base na opinião de especialistas, por meio do método AHP. O modelo foi aplicado a 87 empresas de vários setores no Parque Industrial da Câmara de Indústria de Ancara, na Turquia. O modelo de maturidade, chamado SANOL, é composto pelas seguintes dimensões: estratégia e gestão, clientes e fornecedores, empregados e cultura corporativa, tecnologia (produtos), dados e segurança e apoio e incentivos. Os níveis definidos foram de um a cinco e 47 elementos foram estabelecidos. Para verificar a maturidade, um questionário foi disponibilizado para funcionários de empresas da Turquia. Percebeu-se que as maiores pontuações foram de empresas mais antigas, nacionais e dos setores Industrial, de Manufatura e Logística.

Gajdzik (2022) estabeleceu um modelo de maturidade para o mercado siderúrgico. A pesquisa foi elaborada com base em 79 empresas polonesas. O modelo de maturidade foi definido em cinco níveis: maturidade inteligente no início; maturidade inteligente em construção; maturidade inteligente em crescimento; maturidade inteligente em resultados; até a maturidade inteligente completa. Não foram definidas dimensões ou elementos. O modelo se baseou na opinião de entrevistados, encontrando como resultado o nível três de maturidade para as empresas polonesas.

Honorato e De Melo (2022) explicam que a I4.0 envolve a integração de diversos atores na empresa, tendo o alinhamento com a estratégia, o planejamento, o desenvolvimento, a implantação e a operação. Desta forma, os autores descreveram um modelo de maturidade com escala de um a quatro, com as seguintes dimensões: cadeia de suprimentos, fabricação, entrega, pós-venda e Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Para validar o modelo, uma empresa foi escolhida para analisar sua maturidade. Constatou-se que as empresas não implementam, necessariamente, a I4.0 em todos seus processos, devido às questões orçamentárias, restrições de recursos ou por determinada área não ser prioridade. Desta forma, o modelo de maturidade pode identificar lacunas para que a empresa analise o que pode ser uma oportunidade de negócio relevante.

Ávila-Bohórquez e Gil-Herrera (2022) definiram um modelo de maturidade para PMEs com base em oito dimensões: serviço, operações, qualidade, produtos, informação documentada- big data, liderança e estratégia, comunicação, e cultura e pessoas. Foram definidos quatro níveis de maturidade. Para validar o modelo foram feitas consultas com especialistas por meio do método Delphi, trazendo sugestões para as dimensões. Em seguida, um questionário foi aplicado em um grupo de PMEs e um teste piloto em uma empresa local colombiana.

No Quadro 14 são detalhados os modelos de maturidade da I4.0 na literatura. Para tanto, foram utilizados os parâmetros de modelo/autor, lacuna, visando descrever os *gaps* dos modelos abordados, a estrutura do modelo de maturidade, com suas dimensões, elementos e níveis e o método/validação para efetuar a coleta de dados e análise.

Quadro 14 – Comparativo dos modelos de maturidade sobre I4.0.

<b>MODELO/AUTOR</b>	<b>LACUNA</b>	<b>DIMENSÕES</b>	<b>ESTRUTURA</b>	<b>MÉTODO E VALIDAÇÃO</b>
(SJÖDIN <i>et al.</i> , 2018)	Modelo não aplicado, falta de comparação com a literatura e falta de metodologia estruturada.	Pessoas, Tecnologia e Processos.	3 dimensões e 4 níveis de maturidade.	Dados baseados em empresas automobilísticas.
(OLIVEIRA JÚNIOR, 2018)	Limitação do estudo à uma empresa em um setor específico.	Tecnologia, Organização e Pessoas.	3 dimensões, 7 elementos e 6 níveis de maturidade.	Painel com especialistas e estudo de caso.
(SANTOS, 2018)	Limitado a um setor industrial e validação em uma empresa.	Estratégia, estrutura e cultura organizacional, Equipes de trabalho, Fábricas inteligentes, Processos inteligentes, Produtos e serviços inteligentes.	5 dimensões e 5 níveis de maturidade.	Entrevistas com especialistas e avaliação de maturidade com empresa automobilística.

(COLLI <i>et al.</i> , 2019)	Melhorar a robustez do modelo e limitações de desenvolvimento.	Governança, Tecnologia, Conectividade, Criação de valor e Competências.	5 dimensões e 6 níveis de maturidade.	Modelo de aprendizagem baseado em problemas e estudo de múltiplos casos (3) com questionário.
(FRANK; DALENOGARE; AYALA, 2019)	Limitação do perfil das empresas (muito homogêneo) e falta de validação para outras indústrias.	Manufatura inteligente, Produtos inteligentes, Cadeia de Suprimentos Inteligente e Trabalho Inteligente.	<i>Cluster 1</i> (adotantes baixos), <i>cluster 2</i> (moderados) e <i>cluster 3</i> (adotantes avançados)	Análise de <i>cluster</i> , testes de independência (ANOVA, Fisher e Pearson) e questionário.
(GÜRDÜR; EL-KHOURY; TÖRNGREN, 2019)	Limitação da adequação do modelo ao objetivo principal e subjetividade da pesquisa.	-	Uma área de negócio, com quatro recursos e 5 níveis de maturidade.	Questionário online; softwares de análise de dados ( <i>Microsoft Excel e Tableau</i> )
(GHOBAKHLOO; CHING, 2019)	Falta de estruturação do modelo, análise limitada à adoção e sem avaliação de maturidade.	-	Não há.	Questionários usando escala <i>Likert</i> , teste t e regressão logística para validação de resultados.
(RAFAEL <i>et al.</i> , 2020)	Método de ponderação pouco rigoroso, subjetividade, limitado a um setor e conclusão limitada a uma empresa.	Produtos inteligentes, Operações inteligentes, Orientação a dados, Fábrica inteligente, Estratégia e Organização e funcionários.	6 dimensões; 24 elementos; e 6 níveis de maturidade.	Tomada de decisão por consenso e estudo de caso (reuniões com questionários e entrevistas).

(WAGIRE <i>et al.</i> , 2020)	Subjetividade da avaliação e limitado a um setor.	Pessoas e Cultura, Conscientização da Indústria 4.0, Estratégia Organizacional, Cadeia de valor e processo, Tecnologia de Fabricação Inteligente, Tecnologia orientada a produtos e serviços e Tecnologia de Base da Indústria 4.0.	7 dimensões e 4 níveis de maturidade.	Estudo de caso, entrevistas e questionário.
(SANTOS; MARTINHO, 2020)	Limitação do número de respondentes.	Estratégia, estrutura e cultura organizacional; Força de trabalho; Fábricas inteligentes; Processos inteligentes; Produtos e serviços inteligentes.	5 dimensões e 6 níveis de maturidade.	Testes-piloto e entrevistas.
(PIROLA; CIMINI; PINTO, 2020)	Questionário não respondido por completo e limitado às PMEs.	Estratégia, Pessoas, Processos, Tecnologia e Integração.	5 dimensões e 5 níveis de maturidade.	Entrevistas e questionários.
(HAJOARY, 2020)	Sem instrumento de validação, somente revisão de literatura.	Estratégia e Organização, Manufatura e Operações, Cadeia de Suprimentos,	10 dimensões.	Revisão de literatura.

		Modelo de Negócios, TI, Pessoas, Clientes, Produto, Serviços e Cultura.		
(ESTENSORO <i>et al.</i> , 2021)	Estudo limitado ao território específico, conclusões não podem ser generalizadas e falta de estrutura do modelo.	-	4 estágios de desenvolvimento.	Abordagem de método misto (entrevistas e uso de dados de pesquisa).
(CAIADO <i>et al.</i> , 2021)	Conclusão limitada a uma empresa e modelo limitado a um setor.	-	7 indicadores e 5 níveis de maturidade.	Estudo de caso com entrevistas, simulação de Monte Carlo e modelo baseado em lógica <i>fuzzy</i> .
(LIEBRECHT <i>et al.</i> , 2021)	Métodos limitados ao estado atual da literatura e parâmetros de modelagem.	-	60 métodos.	Estudo de caso com avaliação estratégica (KPIs) e monetária (VPL e simulação de Monte Carlo).
(REIMAN <i>et al.</i> , 2021)	Estudo teórico, sem aplicação prática, falta de estrutura do modelo e sem dimensões.	-	4 estágios de maturidade.	Revisão de literatura.
(GÖKALP; MARTINEZ, 2021)	Estudo realizado em apenas 2 empresas e falta de uma ferramenta de autoavaliação dos funcionários.	-	6 níveis de maturidade.	Estudo de casos múltiplos e entrevistas.

(AMARAL; PEÇAS, 2021)	Estrutura de maturidade, sem níveis, não foi aplicado em uma empresa.	Tecnologia, Processos de Produção, Pessoas, Produto Inteligente, Organização e Mudança.	6 dimensões.	Estudo de caso e análise de modelos de maturidade.
(ÇINAR <i>et al.</i> , 2021)	Subjetividade das respostas do questionário e aplicação em uma empresa de um setor.	Fábrica 4.0, Logística 4.0, Operador 4.0 e Gestão 4.0.	4 dimensões, 5 níveis 60 dimensões de segundo nível e 246 elementos.	Questionário.
(ZOUBEK <i>et al.</i> , 2021)	Aplicação em uma empresa e limitação de foco na área ambiental.	Produção, Logística, Manutenção e a Tecnologia da Informação (TI).	4 dimensões e 6 níveis de maturidade.	Estudo de caso, questionário e uso de MFV.
(FERREIRA, 2021)	Análise limitada a um setor.	Estratégia e Inovação, Tecnologia e Processos, Sustentabilidade, Pessoas e Liderança.	5 dimensões e 6 níveis de maturidade.	Análise Multicritério e questionário com especialistas.
(CASTELO-BRANCO <i>et al.</i> , 2022)	Não mensura as tecnologias da I4.0 e Subjetividade dos elementos.	Estratégia de Tecnologia da informação (TI) e segurança cibernética, Facilitadores, Fábrica inteligente, Proposta de valor e Experiência do cliente.	5 elementos, 16 dimensões e 30 indicadores.	Entrevistas com experts, survey e avaliação de maturidade de empresas.
(BEISEKENOV <i>et al.</i> , 2022)	Limitado a um setor, amostra pequena e baixa	Estratégia Inteligente, Recursos Humanos	5 dimensões e 5 níveis de maturidade	Avaliação de especialistas e estudo de múltiplos casos.

	capacidade de resposta.	Inteligentes, Exploração e Perfuração Inteligente e Operação de Produção Inteligente.		
(ÜNAL; SUNGUR; YILDIRIM, 2022)	Área de aplicação limitada, falta de interesse e conhecimento dos participantes e a falta de padrões para modelos de maturidade.	Estratégia e Gestão, Clientes e Fornecedores, Empregados e Cultura Corporativa, Tecnologia (Produtos), Dados e Segurança e Apoio e Incentivos.	6 dimensões, 47 elementos, 5 níveis de maturidade.	Método de Análise Multicritério, avaliação de especialistas e uso de questionário.
(GAJDZIK, 2022)	Modelo sem dimensões e elementos e limitado a um setor.	-	5 níveis de maturidade.	Questionário com funcionários.
(HONORATO; DE MELO, 2022)	Modelo limitado a um setor e avaliação em uma única empresa.	Cadeia de Suprimentos, Fabricação, Entrega, Pós-venda e Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).	4 níveis de maturidade e 5 dimensões.	Questionário e estudo de caso.
(ÁVILA-BOHÓRQUEZ; GIL-HERRERA, 2022)	Modelo sem elementos.	Serviço, Operações, Qualidade, Produtos, Informação documentada- Big Data, Liderança e	8 dimensões e 4 níveis de maturidade.	Método Delphi, questionário e teste-piloto.

		estratégia, Comunicação, e Cultura e pessoas.		
--	--	--	--	--

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A seguir, a metodologia do trabalho será apresentada.

## 5 METODOLOGIA

### 5.1. ELABORAÇÃO DA METODOLOGIA

A pesquisa é descrita como exploratória, descritiva, qualitativa e quantitativa, e foi realizada por meio de um levantamento de dados, de modo a desenvolver um modelo para analisar o grau de maturidade das empresas na implementação de tecnologias da I4.0.

A pesquisa exploratória envolve a investigação de pesquisa empírica para formular questões ou problemas, de modo a desenvolver hipóteses, familiarizar-se com um fato ou fenômeno e clarificar conceitos. Ela envolve procedimentos sistemáticos para obter observações empíricas ou analisar dados. Pode-se usar descrições qualitativas e quantitativas do objeto de estudo, podendo coletar dados por meio de entrevista, análise de conteúdo, entre outros. Quando a pesquisa exploratória é combinada com a descritiva, ela envolve descrever determinado fenômeno, com descrições qualitativas e/ou quantitativas (MARCONI; LAKATOS, 2003).

Para Gil (2017), o levantamento se caracteriza pela indagação de pessoas cujo comportamento se deseja investigar. Assim, são solicitadas informações a um grupo significativo de pessoas sobre determinado problema para efetuar uma análise quantitativa, de modo a obter conclusões sobre os dados coletados. Uma vantagem deste estudo reside no fato de que, por ter dados obtidos pelo uso de perguntas, obtém-se um conhecimento direto da realidade. Além disso, os custos envolvidos na coleta de dados são baixos e podem ser obtidos mais rapidamente. No entanto, algumas desvantagens são notadas, como a subjetividade da percepção, podendo gerar dados distorcidos, visto que a percepção das pessoas é diferente. Outra limitação envolve o fato de o estudo proporcionar uma visão estática do fenômeno estudado, não envolvendo processos de mudança.

Na pesquisa qualitativa o objetivo é entender como as pessoas interpretam suas experiências e atribuem significado as suas ações, de modo a compreender o fenômeno com base na perspectiva dos participantes. Em um levantamento ou *survey* de experiência, o que interessa é a realidade das pessoas que são pesquisadas, entendendo a experiência dos participantes. Na pesquisa qualitativa, o conhecimento é construído pelas pessoas de maneira contínua à medida em que se envolvem em

uma atividade, experiência ou fenômeno. Diferem das pesquisas quantitativas, que se baseiam na crença de que este conhecimento é preexistente (GIL; REIS NETO, 2020).

O Quadro 15 apresenta o desenvolvimento do trabalho, bem como os resultados esperados com base nos objetivos de pesquisa.

Quadro 15 – Desenvolvimento do trabalho.

Objetivo específico	Técnica de pesquisa	Resultados	Seção
I. Identificar os fatores críticos de sucesso, desafios e benefícios da implementação da Indústria 4.0.	Revisão sistemática de literatura.	Quadro com fatores críticos de sucesso	4.15.1
		Identificação dos benefícios da I4.0	4.15.2
		Quadro com desafios da I4.0	4.15.3
II. Analisar os modelos de maturidade voltados à implementação da Indústria 4.0.	Revisão sistemática de literatura.	Quadro com modelos de maturidade da I4.0	4.16.2
III. Projetar uma ferramenta de avaliação de maturidade da Indústria 4.0.	Modelo de maturidade de De Bruin <i>et al.</i> (2005)	Modelo composto por dimensões, elementos, questões para elaboração de questionário e níveis de maturidade.	5.2
IV. Aplicar a ferramenta por meio da realização de um questionário com empresas do estado do Espírito Santo que tenham interesse nas tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.	Elaboração e aplicação de questionário.	Grau de maturidade das empresas estudadas.	6.2
	Análise das informações	Resultados do modelo de maturidade aplicado.	6

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O estudo foi feito por meio de uma revisão da literatura, de modo a analisar os modelos de maturidade existentes e os fatores críticos de sucesso, desafios e benefícios da implantação das tecnologias da I4.0. Esta busca se deu por meio da plataforma de periódicos da Capes, e o estudo se utilizou das bases de dados *Scopus*, *Web of Science*, *ScienceDirect*, *ACM Digital Library*, *IEEE Xplore*.

O recorte temporal do estudo levou em conta os últimos 5 anos, desde 2017 até 2022. Artigos em inglês e português foram analisados. Foram analisadas publicações

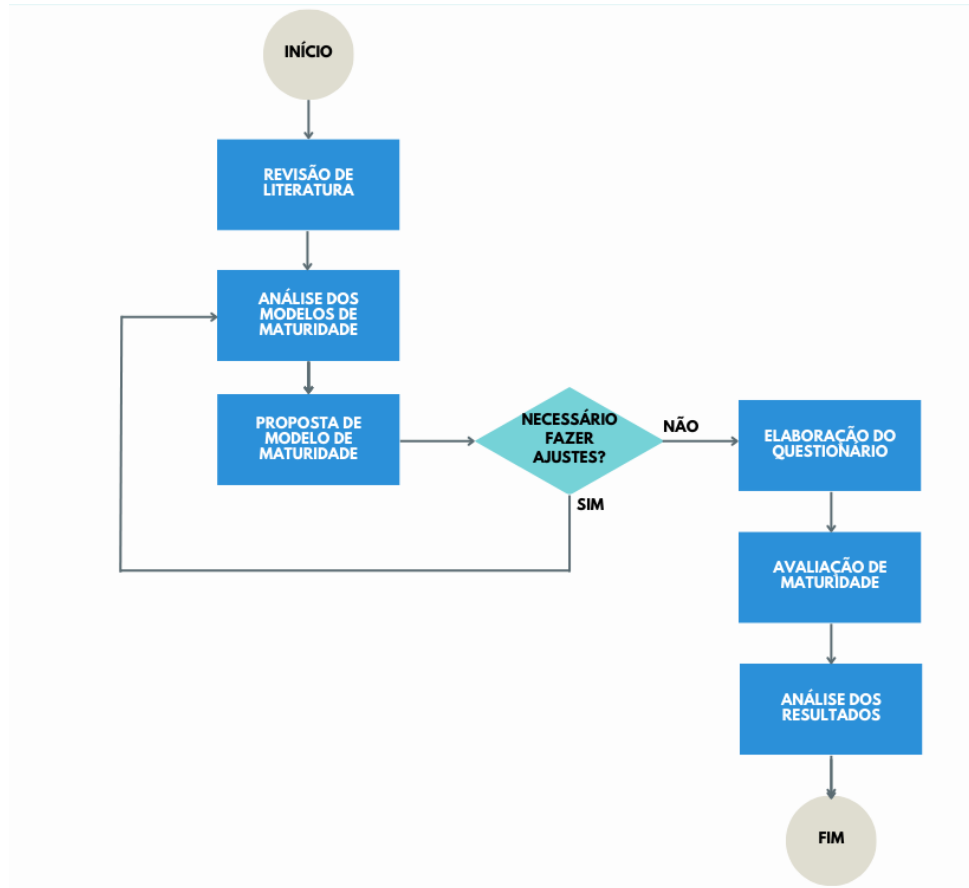
revisadas por pares. Para as palavras-chave, definiu-se a busca por Indústria 4.0 e sinônimos, combinando-a com a busca de fatores críticos de sucesso e barreiras. Foi excluído, neste caso, a análise de artigos de modelos de maturidade. Portanto, foi obtido o seguinte conjunto de análise:

- ("industry 4.0" OR "smart manufacturing" OR "fourth industrial revolution" OR "advanced manufacturing") AND ("critical factors" OR "barriers") NOT "maturity model"

Ao todo foram encontrados 6.618 artigos. Destes, foram excluídos artigos com base em alguns critérios: na exclusão de artigos duplicados, anteriores a cinco anos, artigos de conferências, resenhas, capítulos e resenhas de livros, enciclopédia, relatos de caso, informações de conferência, correspondência, editoriais e outros. Além disso, foram excluídos artigos com títulos e resumos com escopo diferente do da Indústria 4.0. Com base nos critérios de inclusão e exclusão, foram encontrados 29 artigos para análise.

Com base nesta busca, foi possível definir um modelo de avaliação de maturidade. Este modelo foi validado por meio da aplicação de questionários com funcionários de empresas do Espírito Santo, com objetivo de realizar uma avaliação de maturidade, e tem como base o conjunto de respostas “sim”, “sim, parcialmente” e “não”. Após a aplicação do questionário foi feita a análise dos dados. Em seguida, os resultados foram apresentados em forma de gráficos, tabelas e números. A conclusão trouxe recomendações sobre a implementação da I4.0, limitações do modelo e sugestões futuras. Esta metodologia está descrita na Figura 9.

Figura 9 – Metodologia do estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Como o questionário não envolve, de maneira expressa, a opinião ou percepção do funcionário sobre o nível da organização, mas sim um relatório dos procedimentos, equipamentos e processos envolvidos na empresa, não foi necessário submeter o projeto ao Comitê de Ética em Pesquisa (CEP).

## 5.2. ELABORAÇÃO DO MODELO DE MATURIDADE

Dentre as metodologias de maturidade, escolheu-se a de De Bruin *et al.* (2005) por conta da sua base descritiva, prescritiva e comparativa dentro de determinado domínio. Para os autores, estas fases da metodologia podem gerar uma compreensão mais profunda do domínio estudado, analisando o estado atual e buscando melhorias substanciais. Além disso, permite-se o seu uso em uma ampla gama de organizações, permitindo uma comparação válida entre elas. Esta metodologia pode ser aplicada em

múltiplas disciplinas, de maneira generalizável e padronizada. As contribuições vão desde o conhecimento do domínio, perpassando a compreensão das relações e influências existentes, até a capacidade de medir e avaliar o domínio em um determinado instante. Isto favorece a eficiência no uso de recursos para melhorar o entendimento do domínio estudado, contribuindo para o seu fomento. Desta forma, o modelo de maturidade tem como base a metodologia definida por De Bruin *et al.* (2005), com as seguintes fases:

1. A primeira fase é composta pelo escopo do modelo desejado, de modo a definir os limites externos para aplicação e uso do modelo. Focalizar o modelo significa definir para qual domínio o modelo será direcionado e aplicado. Assim, é possível identificar as partes interessadas do modelo, ou seja, indústria, organizações sem fins lucrativos, governo ou pesquisadores.
2. A segunda fase é composta pelo projeto do modelo. Esta fase incorpora as necessidades do público-alvo e como estas necessidades serão atendidas. Nesta fase, deve-se responder o motivo de aplicação do modelo, como ele pode ser aplicado, os envolvidos na aplicação e o que deve ser alcançado na aplicação do modelo. Deve existir um equilíbrio entre a complexidade e simplicidade do modelo. Modelos simplificados podem não possuir informações suficientes para o público-alvo. Já modelos complexos podem ser complicados, limitados e podem criar confusão, resultando em respostas enganosas. Geralmente, o princípio de projeto mais comum envolve representar a maturidade como um conjunto de estágios ou níveis cumulativos, com os níveis superiores representando alta maturidade e os inferiores representando baixa maturidade.
3. A terceira fase é chamada de popular ou preencher o modelo. É nesta fase que o conteúdo do modelo é decidido. Assim, deve-se identificar o que deve ser medido e como medir, identificando os componentes do domínio. Geralmente, uma extensa revisão de literatura deve ser alcançada para identificar estes componentes, citando-se fatores críticos de sucesso e barreiras à entrada como insights para os componentes do domínio. Assim que os componentes são definidos, entrevistas podem ser utilizadas para validar os elementos. No entanto, ressalta-se que, em um domínio novo, a revisão de literatura é considerada suficiente, servindo de ponto de partida teórico. Em seguida, deve-

se definir como a medição da maturidade pode ocorrer, por meio de uma avaliação com perguntas e medidas apropriadas. Recomenda-se um método quantitativo, como um *survey*, disponibilizado em meio eletrônico. Seu uso permite coletar dados e realizar análises estatísticas consistentes, melhorando a análise dos resultados. A entrega da pesquisa por meio eletrônico pode facilitar o alcance da pesquisa, reduzindo custos associados. Pode-se fazer uso de escalas, como a *Likert*, contribuindo para a consistência dos dados e associando facilmente aos níveis de maturidade.

4. Na quarta fase, testar o modelo, deve-se avaliar o modelo quanto à relevância e rigor. A validação dos elementos pode ser realizada por meio de ferramentas como grupos focais e entrevistas. Uma extensa revisão de literatura e amplitude do domínio coberto serve como medida de validade de conteúdo. Com base na completude do modelo, é possível realizar testes piloto, como por exemplo, *surveys*, entrevistas, estudos de caso, sessões de *brainstorming*, grupos focais, entre outros. Isto pode ser feito por meio de uma pesquisa de avaliação de maturidade.
5. Na quinta fase, de implantação, o modelo é disponibilizado para uso, verificando quão extensa é a sua generalização, aplicando tanto em entidades que fizeram parte do projeto de avaliação e entidades independentes das atividades de desenvolvimento e teste. Com base no escopo, a inclusão de entidades de vários setores pode ajudar a melhorar a generalização do modelo. Os passos finais incluem identificar entidades que possam se beneficiar do modelo e a capacidade de aplicar o modelo a várias entidades.
6. A sexta e última fase, chamada de manutenção, envolve os recursos necessários para manter e fazer crescer o uso do modelo. O sucesso depende da disponibilização de repositórios para acompanhar a evolução do modelo, como por exemplo, caso o modelo seja disponibilizado por meio da web, deve-se identificar a necessidade de recursos para atualizar a interface. Se o modelo se tornar globalizado, questões como material para treinamento e certificação devem ser disponibilizadas. A relevância do modelo é obtida por meio da sua manutenção ao longo do tempo. A Figura 10 apresenta as seis fases.

Figura 10 – Representação do modelo.



Fonte: Adaptado de De Bruin *et al.* (2005).

Para a elaboração do modelo de maturidade da I4.0, as etapas definidas por De Bruin *et al.* (2005) são seguidas e especificadas abaixo.

### 5.3. DEFINIÇÃO DO ESCOPO DO MODELO

Para a fase de definição do escopo, estabeleceu-se que as partes interessadas do projeto são a Indústria, por meio das empresas interessadas na digitalização de seus processos com uso da I4.0; o setor acadêmico, cujo interesse reside na pesquisa e análise da implementação dos conceitos da I4.0, fomentando o conhecimento sobre o tema; e, por fim, os profissionais do setor que tenham interesse em se aprofundar no processo de transformação digital e nos resultados obtidos com a pesquisa.

### 5.4. DEFINIÇÃO DO PROJETO DO MODELO

Esta etapa envolve o entendimento de como as necessidades do público-alvo serão atendidas. Para tanto, o modelo a ser aplicado é composto por cinco níveis de maturidade e três dimensões, desmembrando-se em 30 elementos. Além disso, definiu-se que o método escolhido para a análise foi a autoavaliação, em que os funcionários das empresas respondem a avaliação de maneira autodirigida.

## 5.5. POPULAR O MODELO

Para a composição do modelo é necessário identificar as dimensões, elementos e os níveis de maturidade. Assim, uma análise comparativa foi feita, com base nos modelos estudados na seção 4.16.2 e resumidos no Quadro 14.

A análise levou em conta o fato de as dimensões estarem diretamente relacionadas à três pontos principais, sendo eles Tecnologia, Pessoas e Organização (OLIVEIRA JÚNIOR, 2018). O modelo de Santos (2018) ainda acrescenta que, para a estrutura organizacional, as questões de Estratégia, estrutura e cultura organizacional são relevantes. As questões envolvendo a “Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional” são citadas por vários autores, como Oliveira Júnior (2018), Santos (2018), Rafael et al. (2020), Wagire et al. (2020), Santos e Martinho (2020), Pirola, Cimini e Pinto (2020), Hajoary (2020), Amaral e Peças (2021), Çinar et al. (2021), Ferreira (2021), Castelo-Branco et al. (2022), Beisekenov et al. (2022), Ünal, Sungur e Yildirim (2022) e Ávila-Bohórquez e Gil-Herrera (2022).

Santos (2018) apresenta as “Equipes de Trabalho” como uma dimensão relevante. A dimensão "Equipe de Trabalho" está presente para vários autores, como Oliveira Júnior (2018), Rafael et al. (2020), Wagire et al. (2020), Santos e Martinho (2020), Pirola, Cimini e Pinto (2020), Amaral e Peças (2021), Çinar et al. (2021), Ferreira (2021), Ünal, Sungur e Yildirim (2022) e Ávila-Bohórquez e Gil-Herrera (2022).

A dimensão “Tecnologia” aparece para quase todos os autores, sendo citada em Colli et al. (2019), Wagire et al. (2020), Pirola, Cimini e Pinto (2020), Amaral e Peças (2021), Zoubek et al. (2021), Ferreira (2021) e Ünal, Sungur e Yildirim (2022).

Para tanto, com base na análise da literatura, o modelo proposto baseou-se nas seguintes dimensões:

- Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional;
- Tecnologia; e
- Equipe de Trabalho.

A dimensão “Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional” tem foco na implementação de planos de negócios voltados à I4.0, aos investimentos, à promoção

da inovação na estratégia da empresa para geração de valor e aos indicadores estratégicos gerados para implantação da I4.0 nas empresas.

A dimensão “Tecnologia” envolve toda a estrutura necessária para implementar as tecnologias habilitadoras da I4.0, seja por meio de equipamentos, maquinário e recursos físicos e digitais. Avalia-se neste caso, como os dados podem ser utilizados pela organização para gerar valor, personalizando produtos com base nas necessidades dos clientes, promovendo alterações em tempo real. Além disso, a forma de captar, tratar e manter os dados obtidos também é importante, tendo cuidado com a segurança dos dados obtidos pelas empresas.

A dimensão “Equipe de Trabalho” envolve todo o pessoal necessário para o correto funcionamento dos processos da empresa rumo à excelência em I4.0. Para tanto, avalia-se a qualificação, as habilidades técnicas, a abertura à inovação, a autonomia e criatividade da equipe, a abertura para sugerir mudanças no processo, a flexibilidade e comprometimento da equipe e da alta gerência para atingir as metas estabelecidas para geração de valor na I4.0.

O Quadro 16 apresenta as dimensões do modelo de maturidade proposto com os respectivos elementos.

Quadro 16 – Dimensões e elementos do modelo de maturidade.

<b>Dimensões</b>	<b>Elementos</b>	<b>Código</b>
Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional	Alinhamento da Estratégia Organizacional com os conceitos da I4.0;	P. 1
	Composição da I4.0 no plano de negócios	P. 2
	Disponibilização de Recursos financeiros	P. 3
	Promoção da inovação e colaboração para geração de valor	P. 4
	Uso de KPIs para acompanhamento da I4.0	P. 5
Equipe de Trabalho	Treinamento dos colaboradores	P. 6

	Conhecimentos e habilidades		P. 7
	Autonomia e criatividade para inovar		P. 8
	Flexibilidade para sugerir mudanças		P. 9
Tecnologia	Infraestrutura para implementar a I4.0	Equipamentos	P.10.1
		Maquinário	P.10.2
		Recursos Físicos	P.10.3
		Recursos Digitais	P.10.4
	Capacidade de alterar seus processos em tempo real com base em dados		P.11
	Segurança dos dados		P.12
	Personalização dos produtos		P.13
	Uso do Big Data		P. 14.1
	Manufatura Aditiva		P. 14.2
	Realidade Aumentada		P. 14.3
	Realidade Virtual		P. 14.4
	Digital Twin		P. 14.5
	Robôs autônomos		P. 14.6
	Computação em Nuvem		P. 14.7
	Inteligência Artificial		P. 14.8
	Internet das Coisas		P. 14.9
	Sistemas Ciberfísicos		P. 14.10
	Simulação		P. 14.11
Sistemas de Apoio à Decisão		P. 14.12	

	Sensores e Atuadores	P. 14.13
	Integração de Sistemas	P. 14.14

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os níveis de maturidade definidos foram: inexistente, iniciante, intermediário, experiente e especialista. O critério de avaliação se deu por meio de média simples para a avaliação das dimensões e do nível global de maturidade, conforme definido por Santos (2018).

## 5.6. TESTAR O MODELO

Para o teste do modelo, foi elaborado um questionário com perguntas baseadas nas dimensões, nos elementos do modelo de maturidade e nas perguntas elaboradas por Ferreira (2021), Oliveira Júnior (2018) e Santos (2018), de modo a validar os parâmetros identificados. Para tanto, 14 perguntas foram definidas, com respostas do tipo "sim", "sim, parcialmente" e "não" e duas perguntas do tipo caixa de seleção.

Este questionário foi disponibilizado em meio digital, por meio da plataforma *Google Forms*. Os participantes foram selecionados com base no critério de conhecimento dos processos da empresa e das tecnologias habilitadoras da I4.0. Além disso, buscou-se empresas que atuam no Estado do Espírito Santo e que implementam alguma tecnologia habilitadora da I4.0. Este questionário está disponível no Apêndice A deste trabalho.

### 5.6.1 Instrumento de avaliação de dados

Para entender o processo de maturidade da empresa, é necessário encontrar o índice de maturidade e compará-lo a uma escala, composta pelos níveis de maturidade definidos. Como o modelo de maturidade é composto por elementos e dimensões, calcula-se o índice de maturidade local, destinado aos elementos, e, em seguida, faz-se uma média dos valores anteriores para obter a maturidade das dimensões. Por fim, é estabelecido, por meio de uma média, o índice geral de maturidade, que determina a maturidade da organização em um nível global.

Para avaliar os dados obtidos por meio do questionário, foi necessário atribuir um peso para cada resposta definida no questionário, através de uma escala própria, conforme Quadro 17.

Quadro 17 – Atribuição de pesos

Pergunta	Peso
Sim	1
Sim, parcialmente	0,5
Não	0

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Para obter o índice local de maturidade, ou seja, o valor da maturidade de cada elemento do Quadro 16, foi necessário obter a média ponderada dos dados. Para tanto, foi feita uma associação de cada resposta a um peso com valor de 0, 0,5 e 1. Assim, multiplicou-se o peso pelo total de vezes em que cada pessoa respondeu “Sim”, “Sim, parcialmente” e “Não”, e dividiu-se pelo valor total, que é de 25 respondentes.

Já as perguntas do tipo caixa de seleção possuem peso definido de 0 ou 1. Esta simplificação foi feita devido à quantidade de itens da pergunta 10 e 14, buscando reduzir o tamanho do questionário e por julgar ser importante averiguar se os itens estão ou não presentes na empresa, com as respostas do tipo “Sim” ou “Não”.

A escala foi definida com base em uma modificação da escala de Thurstone (DA CUNHA, 2007; MONTE, 2020), adicionando-se a resposta do tipo “sim, parcialmente”, buscando uma maior aderência das respostas ao tratar do modelo de maturidade.

Por exemplo, caso a pessoa tenha respondido cinco vezes “Sim”, dez vezes “Sim, parcialmente” e nove vezes “Não”, seu índice será igual a cinco vezes o valor um, mais 10 vezes o valor 0,5, mais nove vezes o valor zero, dividindo este resultado por 25, o que retorna 0,40, ou 40%, que indica o valor de “Iniciante”. A equação 1 apresenta os valores necessários para o resultado do índice de maturidade local ( $I_l$ ), sendo o valor de a, que representa quantas vezes a resposta “Sim” foi utilizada e b, que representa quantas vezes a resposta “Sim, parcialmente” foi utilizada.

$$I_l = \frac{(1a+0,5b)}{25} \quad (1)$$

Após a atribuição de pesos das perguntas dos elementos, calcula-se a média dos dados obtidos, para assim encontrar o valor da maturidade das dimensões. Este foi definido com base no Quadro 16. Ou seja, com os valores de cada elemento, fez-se uma média para obter o valor das dimensões, lembrando que a dimensão “Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional” possui cinco elementos, a dimensão “Equipe de Trabalho” tem quatro elementos e a dimensão “Tecnologia” tem 21 elementos, somando a maturidade de cada item e dividindo pela quantidade de elementos. O objetivo é de obter, ao final, o nível de maturidade global. A escala de Marinho (2020) atribui um nível de maturidade para cada processo de implementação, com um peso específico. Esta escala serviu de base para a elaboração de uma escala própria, contendo os níveis de maturidade estabelecidos no Quadro 18.

Quadro 18 – Nível de maturidade.

<b>Índice</b>	<b>Maturidade</b>	<b>Processo de implementação</b>	<b>Peso</b>
5	Especialista	Nível de excelência em implementação da I4.0	91-100%
4	Experiente	Implementação de grande parte das tecnologias da I4.0	76-90%
3	Intermediário	Implementação parcial do uso da I4.0	51-75%
2	Iniciante	Poucas evidências de implementação da I4.0	31-50%
1	Inexistente	Nenhuma evidência de implementação da I4.0	0-30%

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

## 5.7 IMPLEMENTAÇÃO E MANUTENÇÃO

As etapas de implementação e manutenção marcam a finalização do modelo de maturidade. Estas etapas foram elaboradas por meio da disponibilização do modelo para uso na internet, por meio da divulgação em artigos de periódicos e eventos.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

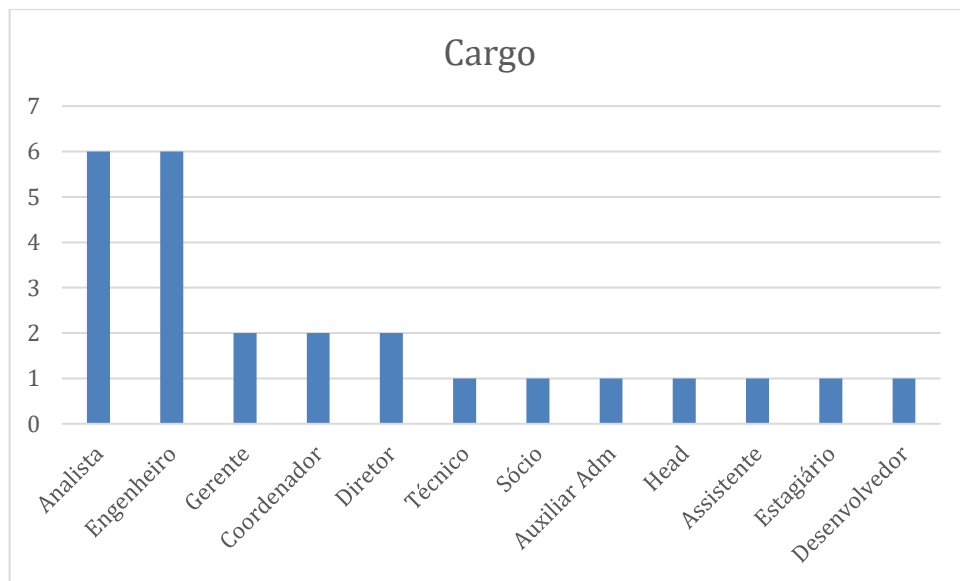
Nesta seção, os resultados da pesquisa são apresentados.

### 6.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O estudo foi realizado com 17 empresas do Espírito Santo. A maior parte das empresas é brasileira, com apenas três multinacionais internacionais. São quatro empresa de grande porte, com três destas realizando exportações para o mundo todo. São, ao todo, nove empresas capixabas, com sede no Estado.

Ao total, 25 profissionais realizaram a avaliação. A Figura 11 apresenta os cargos dos respondentes. Com base nos resultados, é possível perceber que a maioria dos participantes atua em cargos relacionados à análise, gestão, coordenação, direção e engenharia. Isto está de acordo com o perfil esperado para o questionário envolvendo a maturidade das empresas em relação à Indústria 4.0.

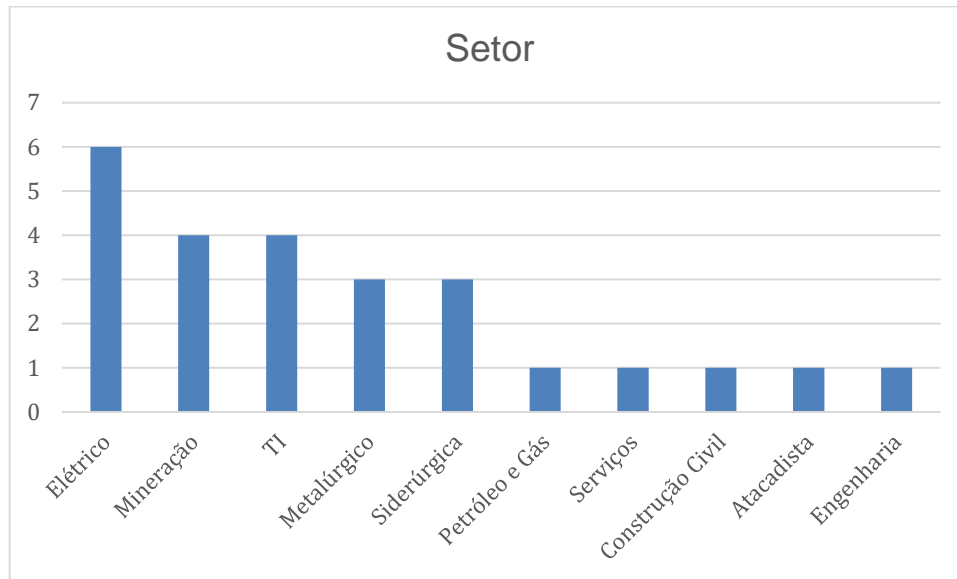
Figura 11 - Cargo dos respondentes.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A Figura 12 apresenta o setor das empresas estudadas.

Figura 12 – Setor das empresas estudadas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com a Figura 12, é possível perceber que os setores empresariais mais citados são o Elétrico, de Mineração, TI, Metalurgia e Siderurgia. Esta resposta é esperada devido ao perfil do Espírito Santo em termos de participação na economia e no contexto tecnológico mais desenvolvido destes setores.

O Quadro 19, apresentado abaixo, traz os resultados do questionário, apresentando os dados com base nas questões e no número de respostas do tipo “Sim”, “Sim, parcialmente” e “Não”. As perguntas estão elencadas na ordem com a quantidade, com P.1 representando a pergunta 1, por exemplo. Ou seja, se a P.1 tem 11 respostas “Sim”, significa que 11 funcionários responderam sim para a pergunta 1. Lembrando que o total de respostas é igual a 25, visto que 25 funcionários participaram do questionário. As perguntas 10 e 14 são tratadas de maneira específica, pois são perguntas do tipo “Caixa de Seleção”, com mais de uma alternativa possível e estão representadas nos Quadros 20 e 21. Ressalta-se ainda que estas perguntas do tipo “Caixa de Seleção” apresentam apenas duas alternativas de resposta, sendo “Sim” ou “Não”, portanto, sem o peso atribuído da resposta “Sim, parcialmente” do Quadro 17 (Valor 0,5).

Quadro 19 – Resultados do questionário.

<b>P.1</b>	<b>Quantidade</b>	<b>P.2</b>	<b>Quantidade</b>	<b>P.3</b>	<b>Quantidade</b>
Sim	12	Sim	14	Sim	13
Sim, parcialmente	10	Sim, parcialmente	9	Sim, parcialmente	9
Não	3	Não	2	Não	3
<b>P.4</b>	<b>Quantidade</b>	<b>P.5</b>	<b>Quantidade</b>	<b>P.6</b>	<b>Quantidade</b>
Sim	18	Sim	10	Sim	6
Sim, parcialmente	5	Sim, parcialmente	2	Sim, parcialmente	10
Não	2	Não	13	Não	9
<b>P.7</b>	<b>Quantidade</b>	<b>P.8</b>	<b>Quantidade</b>	<b>P.9</b>	<b>Quantidade</b>
Sim	9	Sim	10	Sim	18
Sim, parcialmente	9	Sim, parcialmente	13	Sim, parcialmente	6
Não	7	Não	2	Não	1
<b>P.11</b>	<b>Quantidade</b>	<b>P.12</b>	<b>Quantidade</b>	<b>P.13</b>	<b>Quantidade</b>
Sim	13	Sim	18	Sim	15
Sim, parcialmente	7	Sim, parcialmente	3	Sim, parcialmente	9
Não	5	Não	4	Não	1

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

No Quadro 20 são apresentados os resultados da pergunta 10. Assim, o quadro contém a quantidade de respostas afirmativas para os itens descritos, tendo como limite máximo o valor de 25 respostas em cada item.

Quadro 20 – Pergunta 10 – resultados.

<b>P.10</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Percentual (%)</b>
Maquinário	9	36
Equipamentos	14	56
Recursos Físicos	17	68
Recursos Digitais	22	88

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

No Quadro 21 são apresentados os resultados da pergunta 14.

Quadro 21 – Pergunta 14 – resultados.

<b>P.14</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Percentual (%)</b>
Big Data	10	40
Manufatura Aditiva	3	12
Realidade Aumentada	9	36
Realidade Virtual	11	44
Digital Twin	5	20
Robôs autônomos	9	36
Computação em Nuvem	18	72
Inteligência Artificial	11	44
Internet das Coisas	11	44
Sistemas Ciberfísicos	3	12
Simulação	14	56
Sistemas de Apoio à Decisão	12	48
Sensores e Atuadores	11	44

Integração de Sistemas	16	64
------------------------	----	----

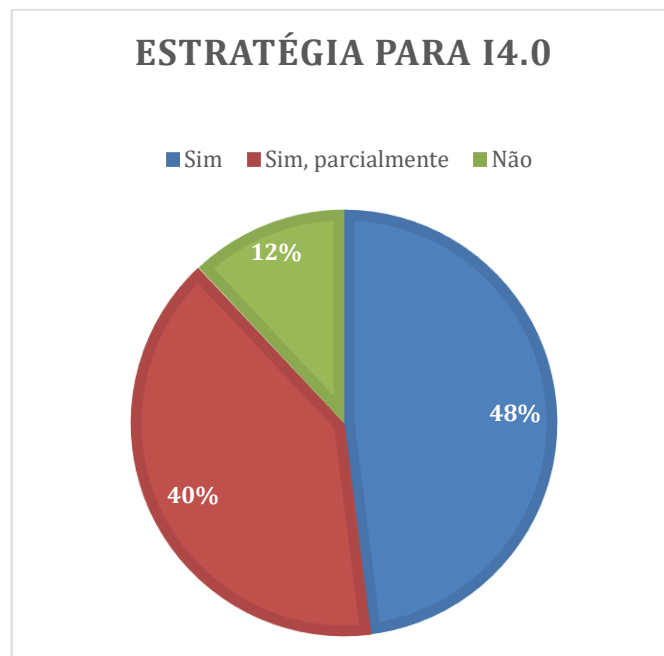
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A partir deste conjunto de dados, uma série de conclusões podem ser realizadas. No próximo tópico, as respostas de cada pergunta e o que elas representam para o contexto das empresas na Indústria 4.0 é apresentada.

## 6.2 APRESENTAÇÃO DO RESULTADO GERAL

Os resultados a seguir apresentam o contexto geral sobre as respostas do questionário aplicado. Assim, as respostas dos 25 funcionários das 17 empresas foram analisadas conjuntamente. Desta forma, é possível obter um panorama geral do contexto espírito-santense. As primeiras cinco perguntas apresentam resultados sobre a dimensão “Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional”. Abaixo, a Figura 13 apresenta os resultados sobre o alinhamento da estratégia organizacional da empresa para implementar as tecnologias da I4.0 no ES.

Figura 13 - Estratégias ou planos para I4.0.



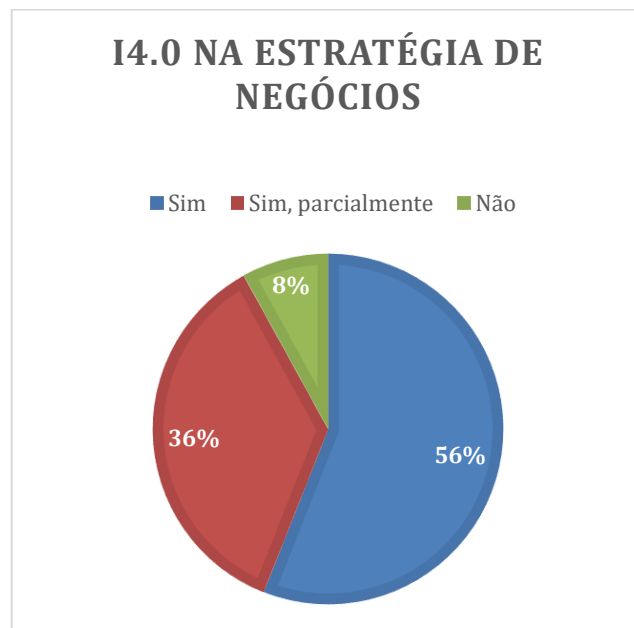
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com base nos resultados, é possível perceber que a maior parte das empresas (48%) possui uma estratégia ou plano alinhado às tecnologias da Indústria 4.0. Cerca de 40% apresenta alguma estratégia parcial e apenas 12% não apresenta nenhuma

estratégia. Isto pode significar que as organizações estão interessadas na implementação destas tecnologias e que estão buscando realizar um planejamento para que as tecnologias da Indústria 4.0 possam contribuir para os seus processos.

A Figura 14 apresenta os resultados à segunda pergunta do questionário, sobre a Indústria 4.0 fazer parte da estratégia de negócios da empresa.

Figura 14 – I4.0 na estratégia de negócios.

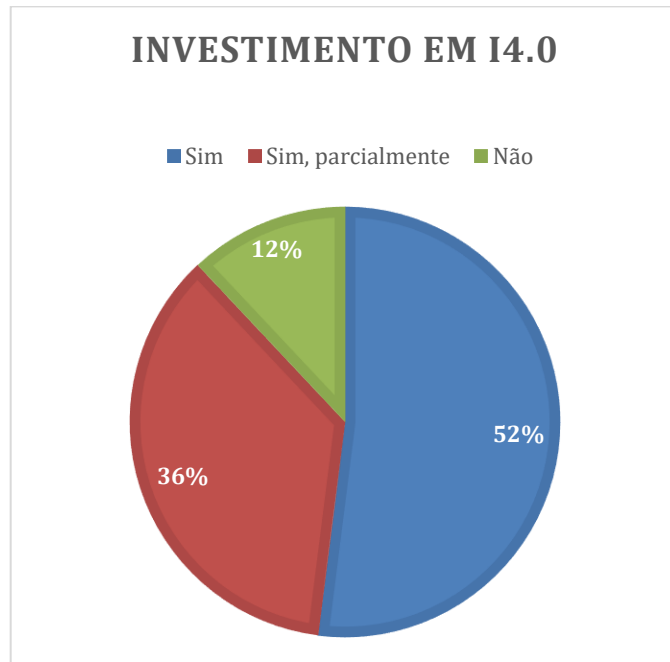


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com base nestes resultados, é possível dizer que grande parte das empresas (56%) já considera a Indústria 4.0 como relevante para a sua estratégia de negócios. Estas duas primeiras questões se complementam no que diz respeito ao Planejamento Estratégico, buscando implementar as tecnologias da Indústria 4.0 no seu plano de negócios à longo prazo. Além disso, 36% das empresas está inserindo parcialmente a Indústria 4.0 em seus processos e apenas 8% não está considerando a Indústria 4.0 em sua estratégia de negócios.

A Figura 15 apresenta os investimentos destinados pela empresa para a implementação da Indústria 4.0.

Figura 15 - Investimentos em I4.0.

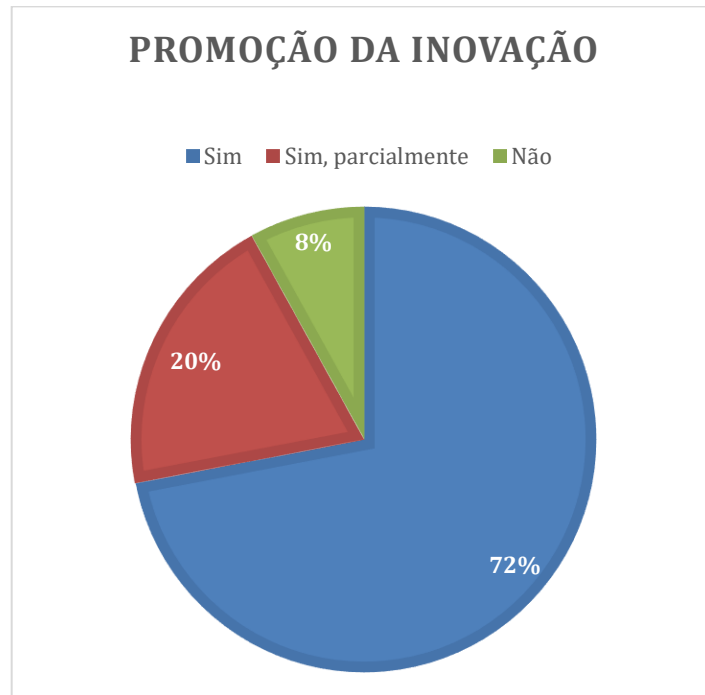


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os resultados demonstram a importância dos investimentos para a Indústria 4.0 na organização. Ao todo, cerca de 52% das empresas busca realizar investimentos. Já 36% investe parcialmente e 12% não investe nestas tecnologias. Este resultado é relevante, já que o fator econômico é visto como barreira à implementação das tecnologias da Indústria 4.0, como demonstrado no Quadro 13. Desta forma, realizar investimentos pode se tornar um fator chave para o sucesso das tecnologias da I4.0 nas empresas.

A Figura 16 apresenta a promoção da inovação na empresa com uso da I4.0.

Figura 16 – Promoção da inovação I4.0.

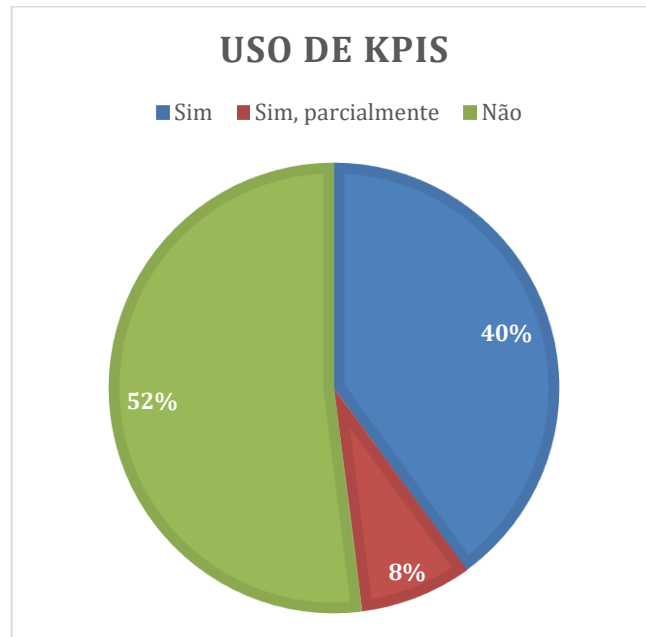


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Estes resultados demonstram que o perfil das empresas estudadas busca a inovação nos seus processos para gerar valor para os produtos (72%). Poucas empresas consideram a inovação apenas parcialmente (20%) e uma pequena parcela não prioriza a inovação nos seus processos (8%). A inovação é um resultado direto dos esforços da Indústria 4.0 em melhorar a eficiência operacional, redução de custos e busca de uma maior vantagem competitiva, portanto, os resultados apresentados são considerados satisfatórios no contexto da inovação.

A Figura 17 apresenta o uso de KPIs para a I4.0.

Figura 17 – Uso de KPIs na I4.0.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A partir destas respostas, é possível perceber que o uso de KPIs para avaliar a implementação das tecnologias da I4.0 não é recorrente nas empresas (52%). Apenas 40% dos respondentes faz uso destes indicadores, com 8% fazendo uso parcial. Isto indica que as empresas fazem pouco uso de indicadores para mensurar os aspectos da implementação destas tecnologias.

Ao analisar as respostas deste bloco de “Estratégia, Cultura e Inovação” percebe-se que as empresas estão buscando implementar as tecnologias da Indústria 4.0, inserindo-as nos planos de negócios e liberando investimentos para estas tecnologias, mas não estão preocupadas, em sua maioria (52%), com a mensuração dos principais indicadores chave de performance no contexto da I4.0.

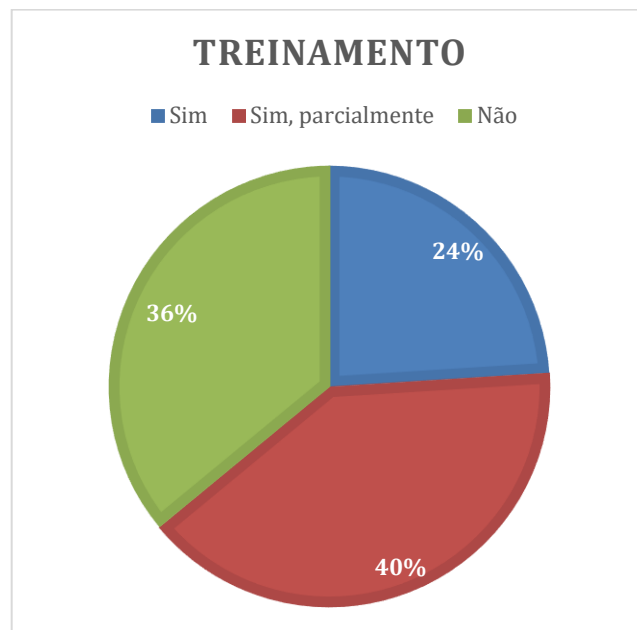
O papel dos KPIs é considerado crucial para que as organizações possam ter sucesso na implementação das práticas da Indústria 4.0. Eles são importantes pois há uma necessidade constante de monitorar a eficiência e eficácia dos processos. Ao utilizar estes KPIs no contexto da I4.0 é possível obter diversos benefícios, como uma maior padronização do trabalho dos colaboradores, uma maior produtividade, uma utilização eficiente dos dados sobre capacidade e disponibilidade dos equipamentos, para explorar mais corretamente as instalações, um planejamento mais preciso da produção, facilitando o cumprimento dos prazos de entrega, além da identificação e

eliminação de gargalos nos processos, tendo um controle mais apurado da produção, facilitando assim a transição para a I4.0, por meio de uma maior digitalização e automação dos processos (ZIZEK *et al.* 2020).

Portanto, é importante que as organizações estudadas busquem aprimorar a avaliação e controle dos indicadores-chave de performance da implementação da I4.0, pois estes são cruciais para entender melhor o processo e entender os ganhos que estão sendo obtidos com estas tecnologias.

As próximas quatro perguntas apresentam resultados acerca da dimensão “Equipe de Trabalho”. A Figura 18 apresenta os resultados sobre o treinamento empregado pelas empresas para implementar a I4.0.

Figura 18 – Treinamento dos funcionários para I4.0.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

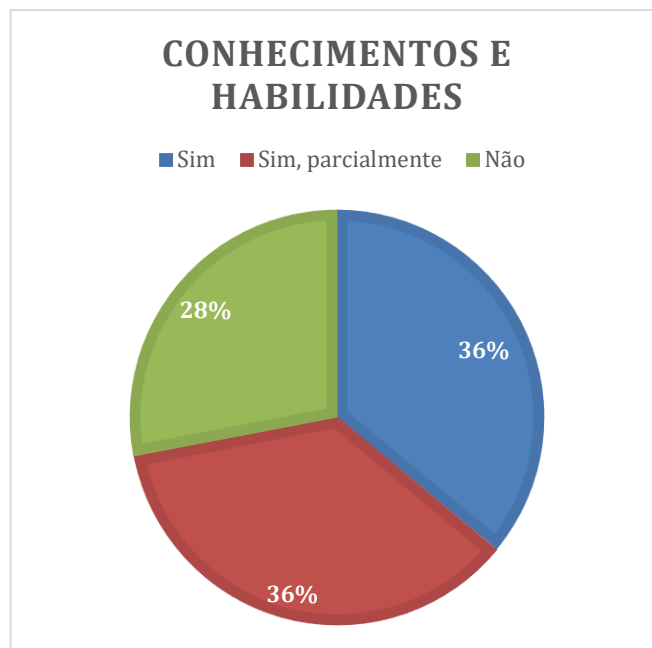
No contexto do treinamento de funcionários, cerca de 24% apresenta treinamento adequado para lidar com a I4.0. No entanto, cerca de 36% diz que a equipe de trabalho não recebeu treinamento suficiente para lidar com as tecnologias da I4.0 e 40% apresenta treinamento parcial.

Com base nestes resultados, é possível perceber como a questão social pode impactar no sucesso da I4.0 nas empresas. Como já descrito no Quadro 13, a falta de

treinamento pode representar uma grande barreira para as organizações e isto se reflete nas respostas apresentadas pelos respondentes. Apenas 24% das organizações considera que o treinamento é adequado para seus funcionários lidarem com os desafios da I4.0, portanto, avalia-se que este deve ser um ponto a ser melhorado nas organizações estudadas.

A Figura 19 apresenta os resultados da questão 7, sobre as habilidades e conhecimentos dos funcionários das empresas do ES na I4.0.

Figura 19 - Conhecimentos e habilidades dos funcionários da I4.0.



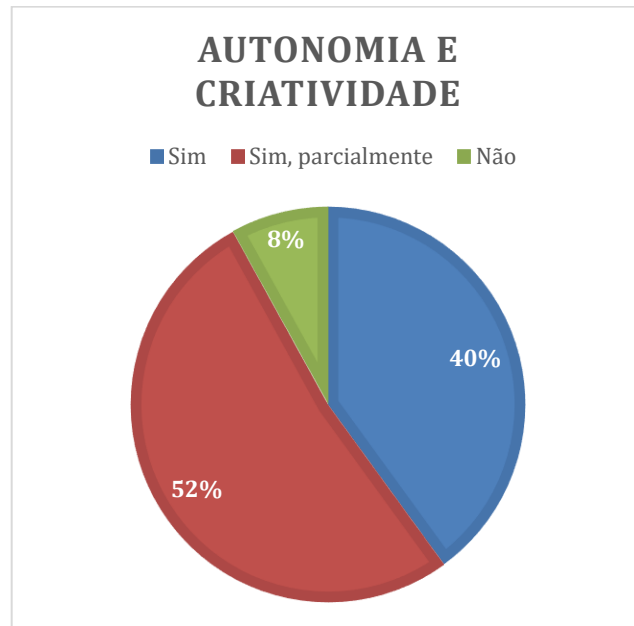
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com base nos resultados mostrados, 36% dos respondentes considera que os funcionários possuem conhecimentos e habilidades suficientes para lidar com as tecnologias da I4.0. Cerca de 36% diz que os funcionários possuem conhecimentos e habilidades de maneira parcial e 28% diz que não há.

As habilidades e conhecimentos dos funcionários também figuram entre os desafios apresentados no Quadro 13. Apesar de o julgamento ter apresentado um número maior de respostas do que a pergunta anterior, sobre treinamento, deve-se ressaltar que 36% é um resultado relativamente baixo para lidar com este desafio.

A Figura 20 apresenta os resultados sobre a autonomia e criatividade para inovar.

Figura 20 – Autonomia e criatividade para inovar.

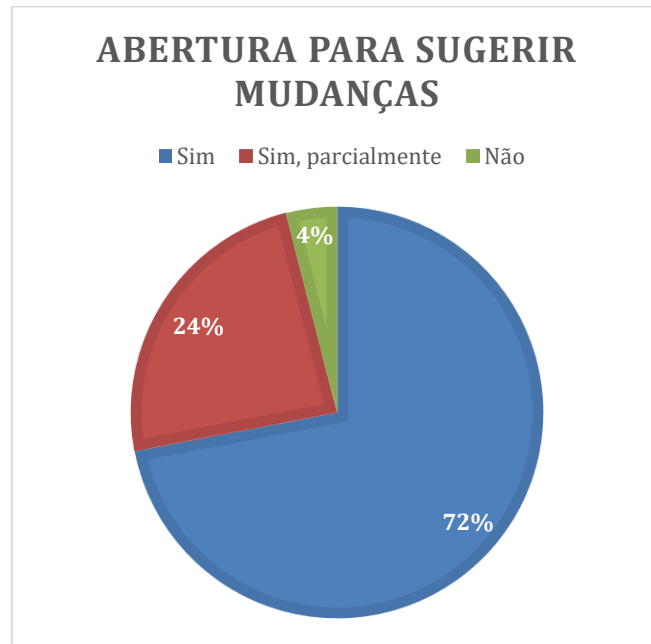


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Cerca de 40% dos respondentes diz que há autonomia dos trabalhadores e criatividade para inovar dentro das organizações. Já 52% diz que há autonomia e criatividade de maneira parcial e 8% diz que não há. Este resultado é satisfatório, ao abordar a questão da autonomia e criatividade, com trabalhadores apresentando certa liberdade para criar e inovar, podendo contribuir e se sentindo parte do processo de implementação da I4.0.

A Figura 21 apresenta os resultados sobre abertura da empresa para sugerir mudanças no processo produtivo.

Figura 21 – Abertura para sugerir mudanças.



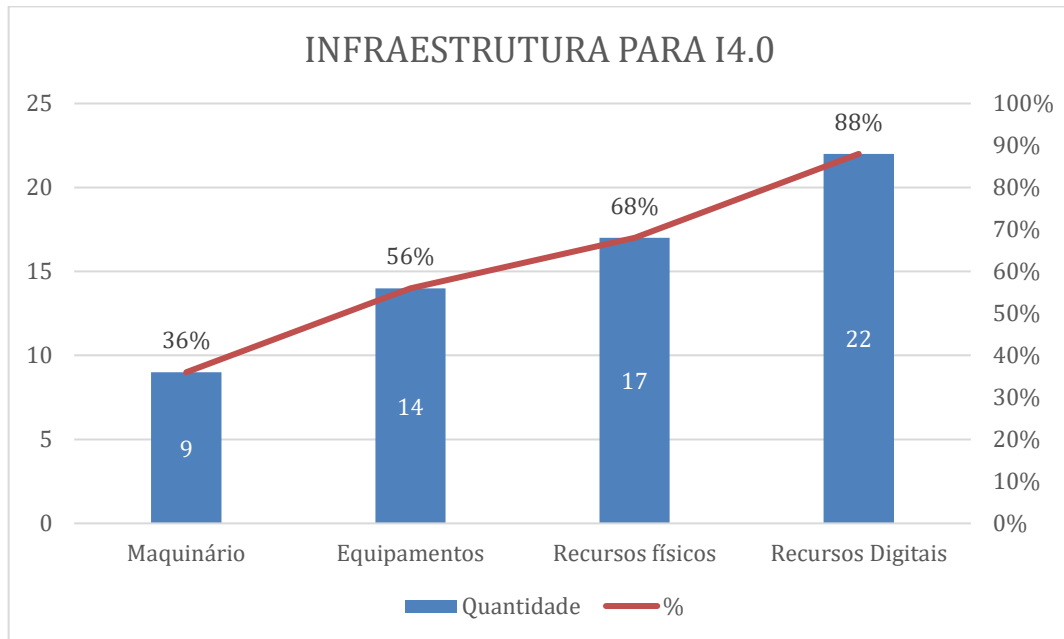
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

As respostas acima demonstram que 72% das empresas apresenta condições para que seus funcionários sugiram mudanças no processo produtivo. Cerca de 24% diz que há abertura parcial e apenas 4% diz que não há abertura. Este aspecto é importante, visto que a I4.0 apresenta-se como um conjunto de tecnologias que estão em constante evolução e que podem, a todo momento, implicar em mudanças nos processos produtivos.

Esta pergunta complementa a anterior, abordando a abertura do trabalhador para criar e inovar. No entanto, as perguntas anteriores mostram que ainda há que se evoluir no processo de treinamento e desenvolvimento dos funcionários, visto que suas capacidades, conhecimentos e habilidades ainda não são maioria nas empresas.

A seguir os resultados sobre a dimensão "Tecnologia" são apresentados. A Figura 22 apresenta os resultados da infraestrutura necessária para implementar a I4.0 nas empresas do ES.

Figura 22 – Infraestrutura para I4.0.

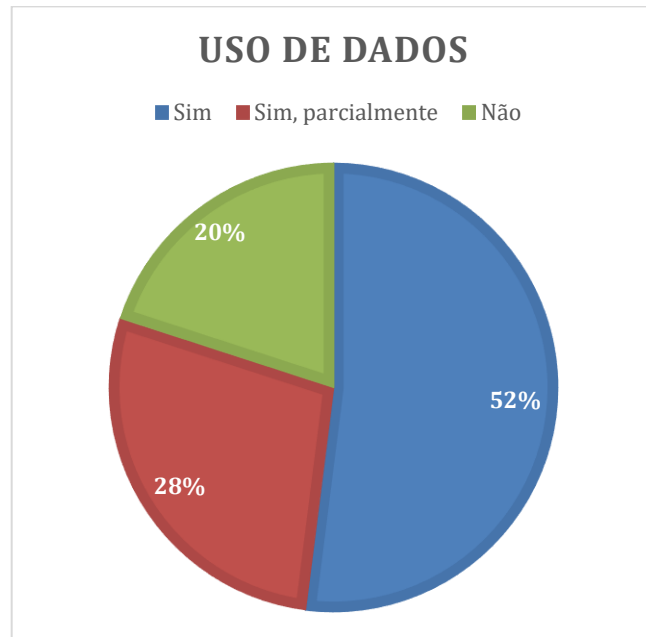


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A infraestrutura necessária para implementar as tecnologias da Indústria 4.0 é composta por maquinário, equipamentos, recursos físicos e digitais. Cerca de 88% dos respondentes diz utilizar recursos digitais na sua empresa. Recursos físicos são utilizados por 68% deles. Equipamentos são necessários para 56% dos respondentes e o maquinário é necessário para 36%. Recursos digitais podem representar a maioria, devido ao seu custo relativamente menor em comparação com a necessidade de maquinários, por exemplo. Além disso, o perfil das tecnologias digitais da I4.0 utiliza, em grande parte, o meio digital como recurso principal.

A Figura 23 apresenta os resultados sobre uso de dados para realizar alterações em tempo real.

Figura 23 – Uso de dados em tempo real.

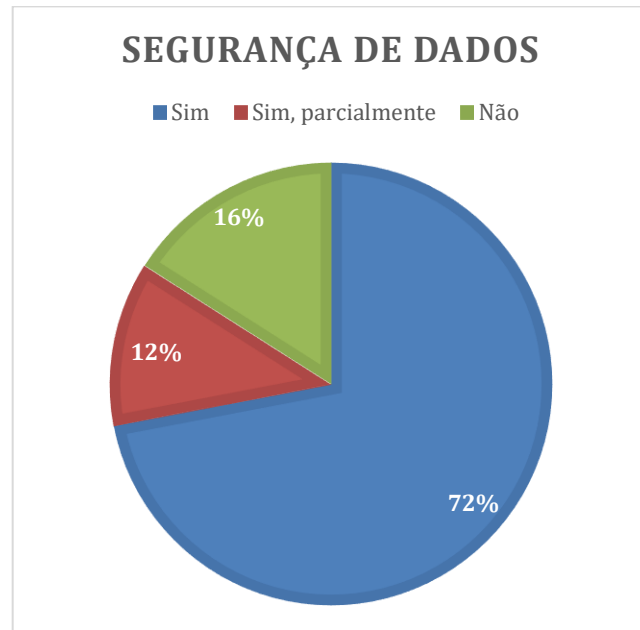


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Assim, 52% das empresas dizem que os dados são utilizados para realizar alterações em tempo real. Cerca de 28% diz que há uso parcial destes dados e 20% diz que não há uso de dados em tempo real na organização. Este resultado é satisfatório e mostra que as empresas estão fazendo uso de seus dados para promover mudanças quando necessário. Este tempo de resposta é importante, pois as organizações devem estar cada vez mais preparadas para lidar com ambientes altamente mutáveis e dinâmicos.

A Figura 24 apresenta os resultados sobre segurança de dados.

Figura 24 – Segurança dos dados.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Assim, 72% das empresas está focada na segurança dos dados gerados no processo produtivo. Já 12% das empresas preocupa-se parcialmente com a proteção dos dados. Já 16% das empresas estudadas não está focada em como proteger os dados gerados no processo produtivo.

Este resultado é importante, pois a segurança dos dados e a privacidade é um desafio técnico citado no Quadro 13. Os resultados apresentados pelos respondentes demonstram que grande parte das empresas está interessada em tratar as questões de segurança, ou seja, as empresas estão se posicionando positivamente para lidar com este desafio.

A Figura 25 apresenta os resultados sobre o uso de dados para personalizar os produtos da empresa com base nas necessidades dos clientes.

Figura 25 – Personalização dos produtos.

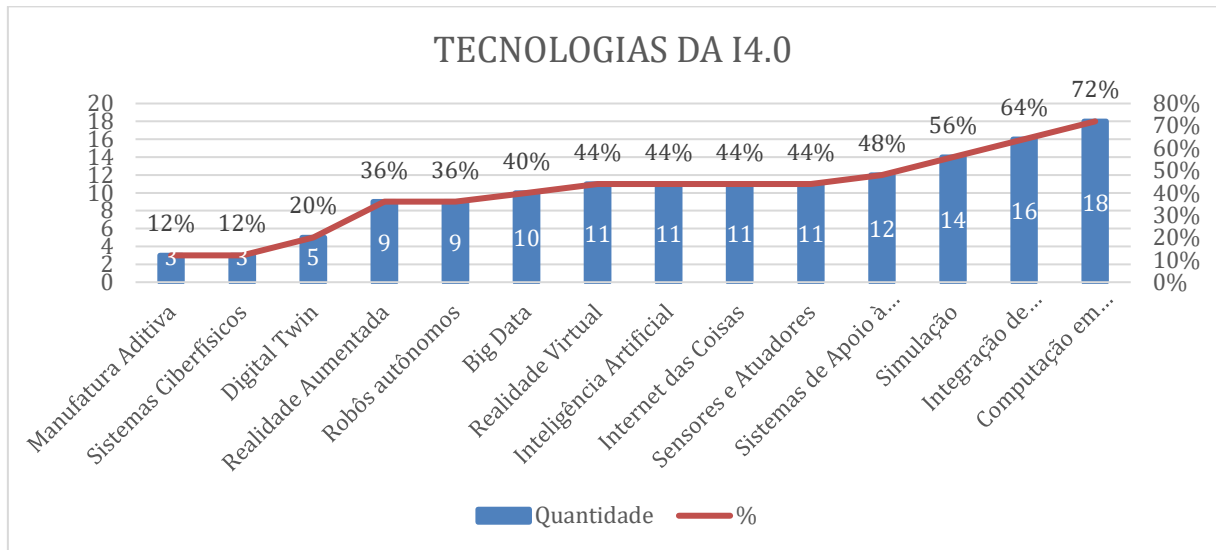


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com base na Figura 25, é possível perceber que 60% das empresas realiza a personalização dos produtos com base nas necessidades dos clientes. Cerca de 36% realiza uma personalização parcial e apenas 4% não se preocupa em personalizar estes produtos com foco nos clientes. Este resultado é importante, visto que os clientes estão cada vez mais focados em produtos personalizados e de alta qualidade, especialmente em ambientes tão competitivos como os atuais.

Abaixo, a Figura 26 apresenta as tecnologias disruptivas utilizadas pelas empresas.

Figura 26 - Tecnologias disruptivas I4.0.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com base na Figura 26, é possível perceber que a Computação em Nuvem é a tecnologia mais utilizada nas organizações, resultando em 72% das empresas estudadas. Em seguida, a Integração de Sistemas apresenta-se com 64% dos dados. Depois, Simulação e Sistemas de Apoio à Decisão se apresentam, com, respectivamente, 56% e 48%. Sensores e Atuadores, Internet das Coisas, Inteligência Artificial e Realidade Virtual aparecem com 44% das respostas. Big Data possui 40% das respostas. Por fim, cita-se os Robôs Autônomos e a Realidade Aumentada com 36%, o Digital Twin com 20%, a Manufatura Aditiva e os Sistemas Ciberfísicos com 12%.

Estes resultados demonstram que a maior parte das tecnologias digitais da Indústria 4.0 ainda apresenta baixa adesão por parte das empresas. As exceções são a Computação em Nuvem, Integração de Sistemas e a Simulação, com mais de 50% de adesão. É possível inferir que alguns motivos podem contribuir para esta baixa adesão, como a dificuldade de implantação destas tecnologias, a falta de pessoal qualificado nas tecnologias, o alto custo envolvido na implantação e outros.

Isto é reforçado por Pompeu e Oliveira (2022), citando como desafios a necessidade de readequação dos processos internos, a definição de novas interfaces de interação homem-máquina, a falta de segurança das informações, a falta de compreensão das tecnologias existentes, além dos fatores financeiros envolvidos.

A partir destas informações, é possível encontrar o índice de maturidade dos elementos, das dimensões e o índice geral de maturidade, respectivamente, no Quadro 22, Quadro 23 e Quadro 24.

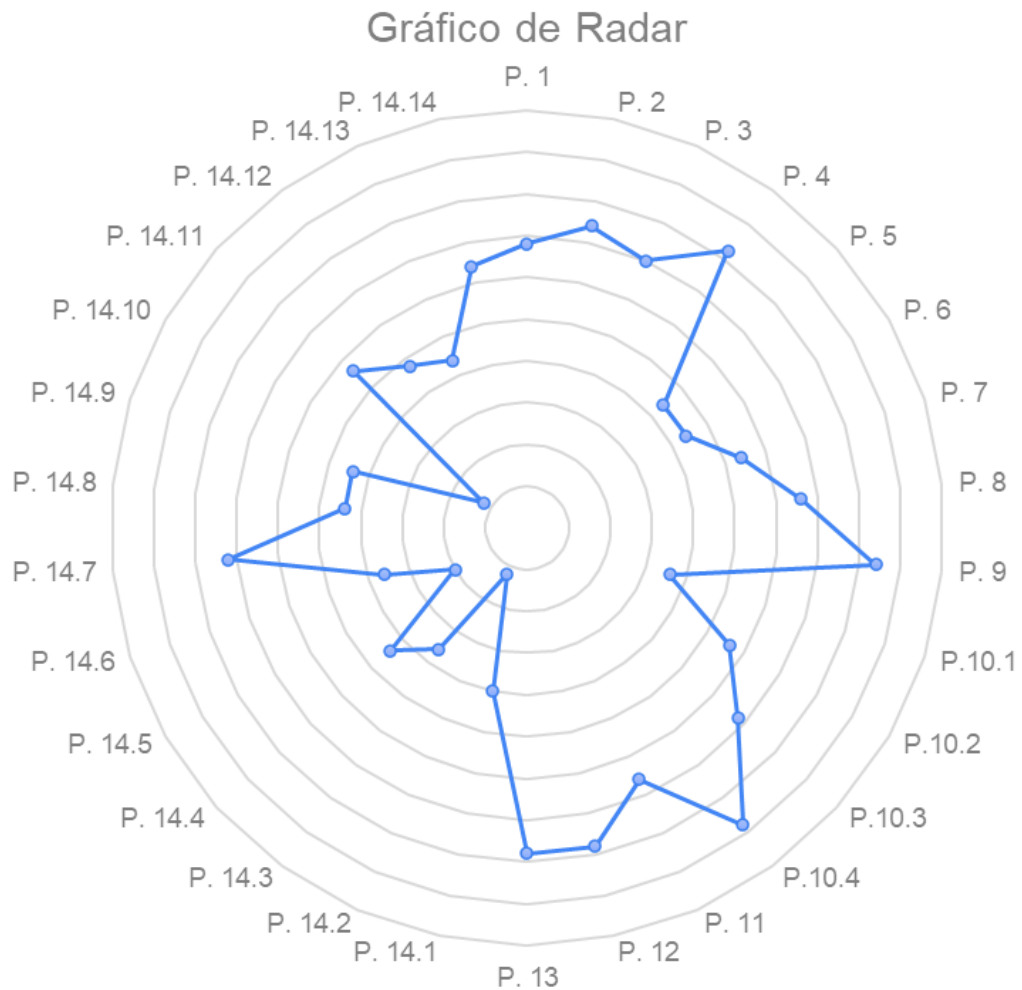
Quadro 22 – Índice local de maturidade dos elementos.

<b>Questão</b>	<b>P. 1</b>	<b>P. 2</b>	<b>P. 3</b>	<b>P. 4</b>	<b>P. 5</b>	<b>P. 6</b>	<b>P. 7</b>	<b>P. 8</b>	<b>P. 9</b>
<b>Índice</b>	68%	74%	70%	82%	44%	44%	54%	66%	84%
<b>Questão</b>	P.10.1	P.10.2	P.10.3	P.10.4	P. 11	P. 12	P. 13	P. 14.1	P. 14.2
<b>Índice</b>	36%	56%	68%	88%	66%	78%	78%	40%	12%
<b>Questão</b>	P. 14.3	P. 14.4	P. 14.5	P. 14.6	P. 14.7	P. 14.8	P. 14.9	P. 14.10	P. 14.11
<b>Índice</b>	36%	44%	20%	36%	72%	44%	44%	12%	56%
<b>Questão</b>	P. 14.12	P. 14.13	P. 14.14						
<b>Índice</b>	48%	44%	64%						

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A partir destes dados, é possível construir um gráfico de radar, apresentando as informações de maneira a compreender os pontos fortes e fracos das dimensões e elementos, representado pela Figura 27.

Figura 27 – Gráfico de radar I4.0.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Este gráfico de radar tem como pontos fortes P.4 - “Promoção da inovação e colaboração para geração de valor”, P.9 – “Flexibilidade para sugerir mudanças”, P.10.4 – “Infraestrutura para implementar a I4.0 - Recursos Digitais”, P.12 – “Segurança dos dados” e P.13 – “Personalização dos produtos”. Os pontos fracos mais destacados são: P.14.2 – “Manufatura Aditiva”, P.14.5 – “Digital Twin” e P.14.10 – “Sistemas Ciberfísicos”. Estes itens serão destrinchados mais fortemente a seguir, com a demonstração do gráfico de radar de cada dimensão, separadamente.

A seguir, o Quadro 23 é apresentado. É importante relembrar a classificação dada pelo Quadro 16, em que as perguntas de 1 a 5 são alocadas à dimensão “Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional”, as perguntas de 6 a 9 são alocadas à dimensão “Equipe de Trabalho” e as perguntas de 10 a 14 são alocadas à dimensão

“Tecnologia”. Desta forma, é possível obter informações acerca de como estas dimensões estão sendo abordadas pelas organizações.

Quadro 23 – Índice de maturidade das dimensões.

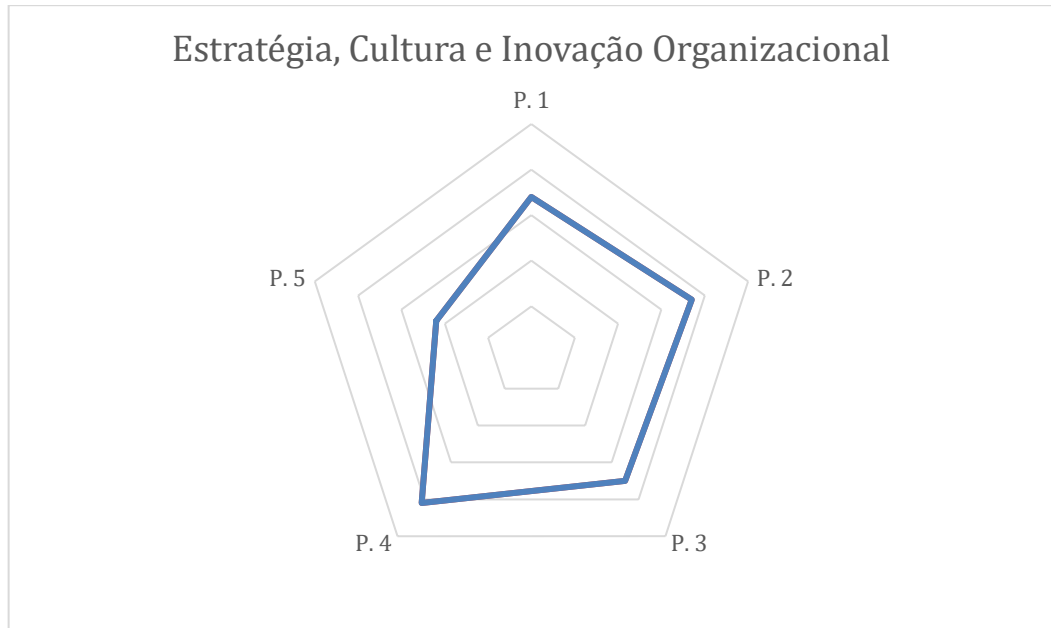
<b>Dimensão</b>	<b>Índice (%)</b>	<b>Nível de Maturidade</b>
Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional	67,6%	Intermediário
Equipe de Trabalho	62,0%	Intermediário
Tecnologia	49,6%	Iniciante

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A partir do Quadro 23, percebe-se que a dimensão “Tecnologia” apresenta o menor valor entre as demais, devido à falta de adesão das tecnologias digitais por parte das empresas. A dimensão de maior valor é a “Estratégia, Cultura e Inovação organizacional”, demonstrando que as empresas têm interesse na implementação da Indústria 4.0 no seu planejamento estratégico. No entanto, o valor ainda é intermediário, ou seja, há interesse, mas as empresas não apresentam muitas ações efetivas.

A seguir, o gráfico de radar das três dimensões é apresentado. Cada ponto do gráfico apresenta o código do elemento pertencente à dimensão. A Figura 28 apresenta o gráfico de radar da primeira dimensão, “Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional”. Buscando destrinchar ainda mais os elementos dos gráficos, discute-se novamente os pontos fortes e fracos de cada dimensão, com maior detalhamento.

Figura 28 – Gráfico de radar da dimensão Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional.

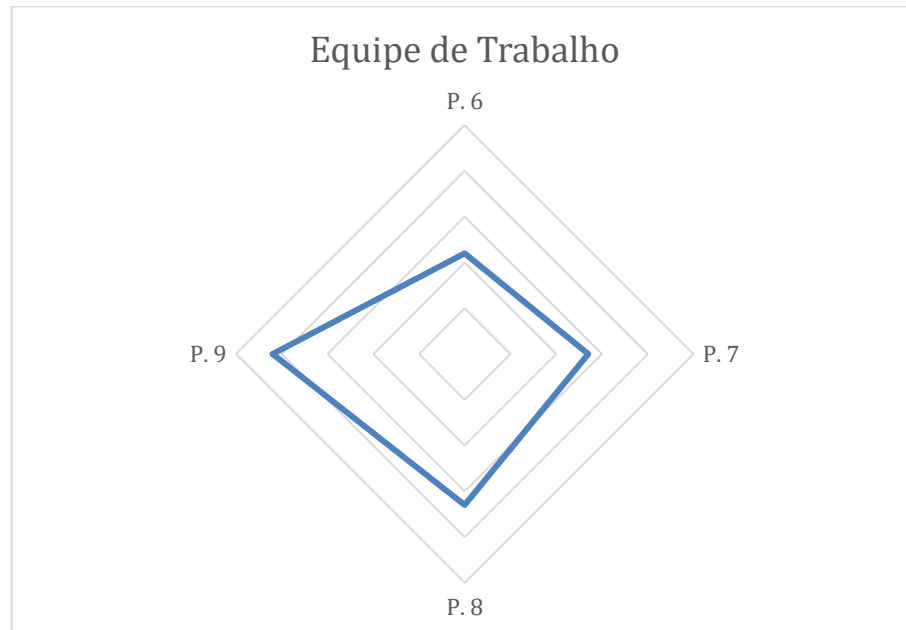


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O gráfico de radar ajuda a entender melhor os pontos fortes e fracos de um tema estudado. No caso da Figura 28, é possível perceber que a P.4 apresenta o maior resultado dos elementos da primeira dimensão e P.5 apresenta o menor resultado, o que pode indicar um ponto que deve ser aprimorado. Analisando o Quadro 15, é possível perceber, a partir dos códigos, que a P.4 representa o elemento de “Promoção da inovação e colaboração para geração de valor”, demonstrando que a inovação e a colaboração são fatores importantes para as organizações estudadas. Em contrapartida, P.5 apresenta o menor resultado, indicando que “Uso de KPIs para acompanhamento da I4.0” não é um item fortalecido para as empresas.

A Figura 29 apresenta o gráfico de radar da segunda dimensão, “Equipe de Trabalho”.

Figura 29 - Gráfico de radar da dimensão Equipe de Trabalho.

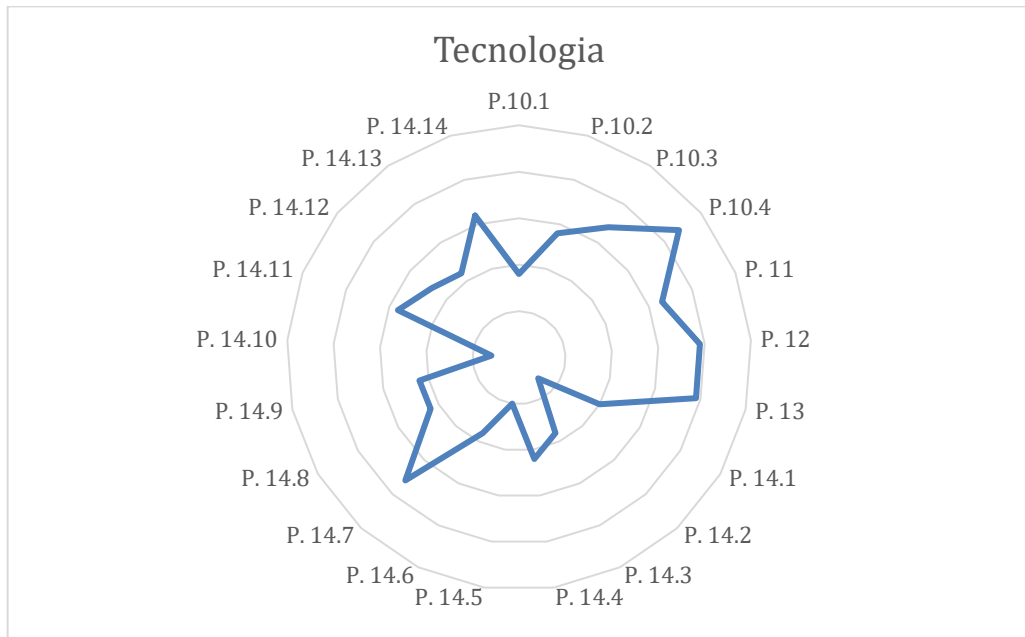


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A Figura 29 apresenta como item de maior destaque a P.9, que representa “Flexibilidade para sugerir mudanças”. Isto significa que a equipe de trabalho não encontra barreiras para apresentar sugestões que impliquem em mudanças na organização. Os itens que apresentam menores indicadores são o P.6 e o P.7, que indicam, respectivamente, “Treinamento dos colaboradores” e “Conhecimento e Habilidades”. Isto significa que a equipe de trabalho ainda não apresenta treinamento e conhecimentos e habilidades necessários para lidar com as transformações da Indústria 4.0. Para estas empresas, estes fatores podem se tornar limitadores na implementação das tecnologias da I4.0, visto que os trabalhadores são parte importante do processo de mudança organizacional rumo à excelência em I4.0.

A Figura 30 apresenta o gráfico de radar da terceira dimensão, “Tecnologia”.

Figura 30 - Gráfico de radar da dimensão Tecnologia.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com base na Figura 30, percebe-se que os itens de maior destaque positivo são o P.10.4, P.12 e P.13. Analisando o Quadro 15, entende-se que o primeiro representa o subitem “Recursos Digitais”, do item “Infraestrutura para implementar a I4.0”. Isto significa que a infraestrutura de que a maior parte das empresas estudadas dispõe está inserida na questão dos recursos digitais, podendo ser recursos de armazenamento na Nuvem, softwares e outros. O segundo representa o item “Segurança de Dados”, mostrando que a organização está preocupada em cuidar da privacidade e da segurança dos dados, visando evitar vazamentos e invasões. O terceiro item é a “Personalização dos produtos”, que mostra uma preocupação em elaborar produtos em conformidade com as especificações e necessidades dos clientes, promovendo uma maior fidelização.

Um item de baixo valor a se destacar é o P.10.1, correspondendo aos “Equipamentos” necessários para a infraestrutura para implementar a I4.0. Isto pode significar que os custos são significativos para as organizações, que não são julgados como necessários ou ainda que as organizações estão mais preocupadas em investir em recursos digitais, pela facilidade de implementação, pouca necessidade de espaços físicos, mão de obra para operar estes equipamentos e custos reduzidos. Outros itens de baixo valor são o P.14.2, P.14.3, o P.14.5, P.14.6 e o P.14.10. Estes itens

representam, respectivamente, “Manufatura Aditiva”, “Realidade Aumentada” “Digital Twin”, “Robôs Autônomos” e “Sistemas Ciberfísicos”. Isto pode significar que estas tecnologias ainda não estão sendo amplamente implementadas por conta da falta de informação sobre a sua utilização, da falta de treinamento sobre a tecnologia, da falta de operadores habilitados, dos custos de implementação serem elevados e outras possibilidades.

Estas respostas devem ser ressaltadas, visto que as tecnologias digitais citadas são essenciais e representam o cerne da Indústria 4.0. Percebe-se que ainda há um uso intermediário de grande parte das tecnologias citadas, com poucos destaques positivos e alguns destaques negativos.

O índice global de maturidade é dado pela média simples das dimensões descritas acima, o que retorna um valor de 59,7%, como descrito no Quadro 24.

Quadro 24 – Índice geral de maturidade.

<b>Item</b>	<b>Índice (%)</b>	<b>Nível de Maturidade</b>
Índice Geral	59,7%	Intermediário

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O nível de maturidade geral, como pode ser visto no Quadro 18, replicado abaixo, é definido como um nível intermediário de maturidade, o que significa que as práticas das tecnologias da Indústria 4.0 são aplicadas parcialmente nas empresas. Este resultado demonstra que ainda há um longo caminho a percorrer para as organizações capixabas, que demonstram ter interesse em agregar as tecnologias e conhecimentos da Indústria 4.0 no seu plano de negócios, mas esbarram em algumas dificuldades como o alto custo de implantação das tecnologias e a falta de conhecimentos e habilidades dos funcionários.

Quadro 18 – Nível de maturidade.

<b>Nível de Maturidade</b>	<b>Processo de implementação</b>	<b>Peso</b>
Especialista	Nível de excelência em implementação da I4.0	91-100%
Experiente	Implementação de grande parte das tecnologias da I4.0	76-90%
Intermediário	Implementação parcial do uso da I4.0	51-75%
Iniciante	Poucas evidências de implementação da I4.0	31-50%
Inexistente	Nenhuma evidência de implementação da I4.0	0-30%

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Desta forma, é possível entender que o conjunto de empresas estudadas no Espírito Santo apresenta, a nível geral, evidências de implementação intermediária das tecnologias da Indústria 4.0. A seguir, as respostas obtidas serão analisadas à nível setorial, avaliando os setores de Mineração, Elétrico, de Tecnologia da Informação, Metalurgia e Siderurgia. Optou-se por avaliar estes setores por conta da importância econômica para o Estado, além de ter obtido um número maior de respostas do questionário.

### 6.3 ESTUDO DO SETOR DE MINERAÇÃO

A seguir, uma uma análise aprofundada dos resultados do questionário para o setor de Mineração é realizada, com objetivo de detalhar a I4.0 no setor. Ao todo, quatro funcionários desta empresa fizeram parte do questionário. No Quadro 25, as funções dos respondentes são detalhadas.

Quadro 25 – Funções dos respondentes.

<b>Função</b>	<b>Quantidade</b>
Analista	2
Engenheiro	1
Coordenador	1

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O Quadro 26 apresenta os dados referentes ao índice local de maturidade dos elementos da empresa do Setor de Mineração.

Quadro 26 – Índice local de maturidade dos elementos – Setor de Mineração.

<b>Questão</b>	<b>P. 1</b>	<b>P. 2</b>	<b>P. 3</b>	<b>P. 4</b>	<b>P. 5</b>	<b>P. 6</b>	<b>P. 7</b>	<b>P. 8</b>	<b>P. 9</b>
<b>Índice</b>	87,5%	87,5%	87,5%	100,0%	75,0%	62,5%	50,0%	50,0%	87,5%
<b>Questão</b>	P.10.1	P.10.2	P.10.3	P.10.4	P. 11	P. 12	P. 13	P. 14.1	P. 14.2
<b>Índice</b>	75,0%	75,0%	75,0%	100,0%	62,5%	75,0%	50,0%	50,0%	25,0%
<b>Questão</b>	P. 14.3	P. 14.4	P. 14.5	P. 14.6	P. 14.7	P. 14.8	P. 14.9	P. 14.10	P. 14.11
<b>Índice</b>	100,0%	100,0%	50,0%	50,0%	75,0%	50,0%	50,0%	0,0%	100,0%
<b>Questão</b>	P. 14.12	P. 14.13	P. 14.14						
<b>Índice</b>	50,0%	50,0%	50,0%						

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com base nestes resultados, foi possível analisar as informações e encontrar um índice de maturidade para as dimensões, descrito no Quadro 27.

Quadro 27 – Índice de maturidade das dimensões – Setor de Mineração.

Dimensão	Índice (%)	Nível de Maturidade
Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional	87,5%	Experiente
Equipe de Trabalho	62,5%	Intermediário
Tecnologia	62,5%	Intermediário

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Estes resultados demonstram valores mais expressivos do que os do caso geral, dando destaque à dimensão “Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional”, que está no nível de maturidade experiente. Isto significa que o setor apresenta grande implementação das tecnologias da I4.0 neste aspecto.

A seguir, o gráfico de radar das dimensões da empresa do Setor de Mineração é apresentado, na Figura 31.

Figura 31 – Gráfico de radar da dimensão Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional – Setor de Mineração.



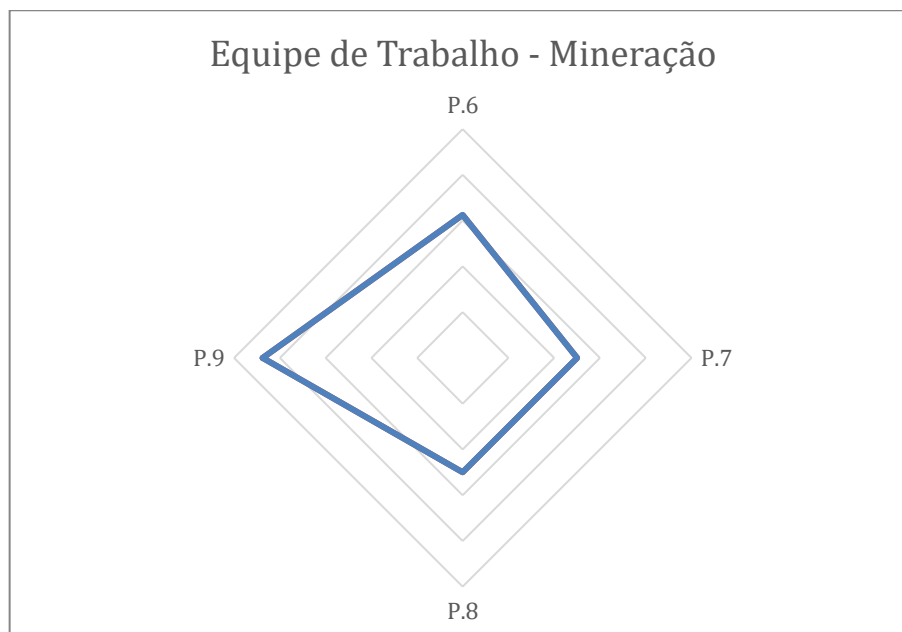
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A partir da Figura 31, é possível perceber que os pontos fortes e fracos são iguais aos do caso geral. No entanto, é possível perceber que os números estão acima do

esperado para o caso geral, o que representa um forte apelo estratégico da organização com foco no estabelecimento de políticas, planos de negócios, investimentos e promoção da inovação e colaboração para as práticas da I4.0.

A Figura 32 apresenta o gráfico de radar da segunda dimensão, “Equipe de Trabalho”.

Figura 32 - Gráfico de radar da dimensão Equipe de Trabalho – Setor de Mineração.

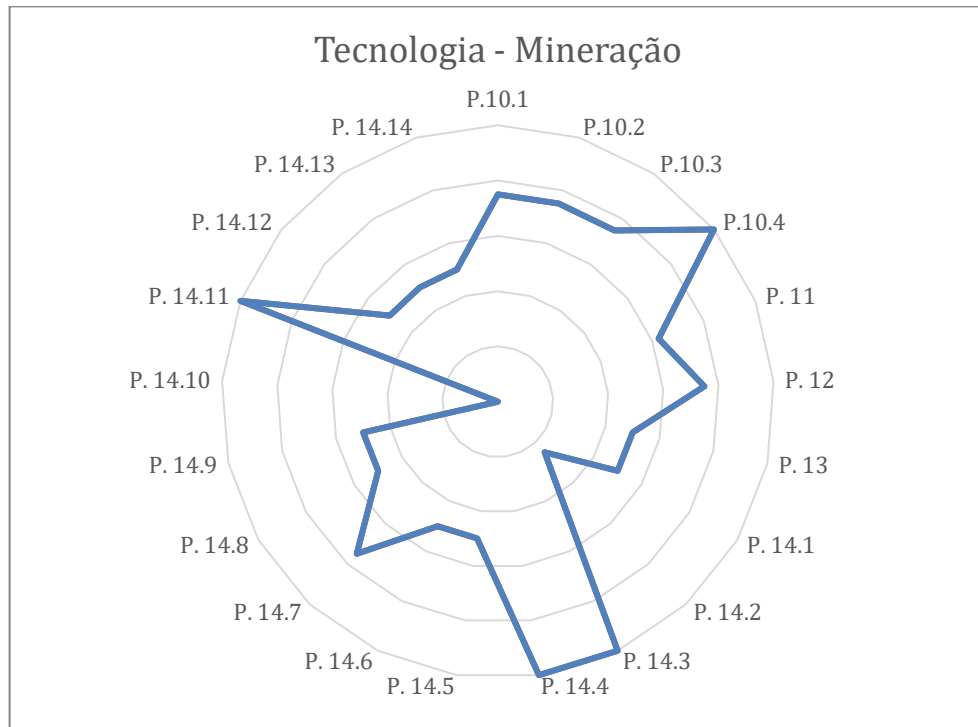


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Da mesma forma, os mesmos pontos fortes e fracos do caso geral são aplicados ao caso da empresa do Setor de Mineração para a dimensão “Equipe de Trabalho”.

A Figura 33 apresenta o gráfico de radar da terceira dimensão, “Tecnologia”.

Figura 33 - Gráfico de radar da dimensão Tecnologia – Setor de Mineração.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com base na Figura 33, percebe-se que os itens de maior destaque positivo são o P.10.4, P.14.3, P.14.4 e P.14.11. No caso de P.10.4, que representa o subitem “Recursos Digitais”, do item “Infraestrutura para implementar a I4.0”, é igual ao caso geral. No entanto, os demais casos citados acima representam os itens “Realidade Aumentada”, “Realidade Virtual” e “Simulação”. Os itens de menor valor são o P.14.2 e o P.14.10. Estes itens representam, respectivamente, “Manufatura Aditiva” e “Sistemas Ciberfísicos”. Diferente do caso geral, a tecnologia de “*Digital Twin*” apresenta uma utilização intermediária na empresa.

O índice de maturidade geral da empresa do Setor de Mineração é dado pelo Quadro 28.

Quadro 28 – Índice geral de maturidade – Setor de Mineração.

Item	Índice (%)	Nível de Maturidade
Índice Geral	70,8%	Intermediário

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Desta forma, percebe-se que, apesar de apresentar um índice geral de maturidade com valor mais alto, o Setor de Mineração ainda está localizado no nível intermediário. A seguir, o setor Elétrico é apresentado e analisado.

#### 6.4 ESTUDO DO SETOR ELÉTRICO

Nesta seção, o setor Elétrico é detalhado, com base nas respostas obtidas no questionário aplicado. Ao todo, seis funcionários que fizeram parte do questionário são do setor Elétrico. No Quadro 29, as funções dos respondentes são detalhadas.

Quadro 29 – Funções dos respondentes.

Função	Quantidade
Analista	2
Engenheiro	3
Assistente	1

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O Quadro 30 apresenta os dados referentes ao índice local de maturidade dos elementos do Setor de Elétrico.

Quadro 30 – Índice local de maturidade dos elementos – Setor Elétrico.

Questão	P. 1	P. 2	P. 3	P. 4	P. 5	P. 6	P. 7	P. 8	P. 9
Índice	75,0%	75,0%	75,0%	58,3%	66,7%	50,0%	50,0%	75,0%	91,7%
Questão	P.10.1	P.10.2	P.10.3	P.10.4	P. 11	P. 12	P. 13	P. 14.1	P. 14.2
Índice	50,0%	16,7%	50,0%	83,3%	83,3%	83,3%	83,3%	33,3%	0,0%
Questão	P. 14.3	P. 14.4	P. 14.5	P. 14.6	P. 14.7	P. 14.8	P. 14.9	P. 14.10	P. 14.11
Índice	33,3%	33,3%	16,7%	50,0%	83,3%	83,3%	66,7%	16,7%	66,7%
Questão	P. 14.12	P. 14.13	P. 14.14						
Índice	83,3%	66,7%	66,7%						

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com base nestes resultados, foi possível analisar as informações e encontrar um índice de maturidade para as dimensões, descrito no Quadro 31.

Quadro 31 – Índice de maturidade das dimensões – Setor Elétrico.

Dimensão	Índice (%)	Nível de Maturidade
Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional	70,0%	Intermediário
Equipe de Trabalho	66,7%	Intermediário
Tecnologia	54,8%	Intermediário

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A seguir, o gráfico de radar das dimensões do Setor Elétrico é apresentado.

Figura 34 – Gráfico de radar da dimensão Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional – Setor Elétrico.

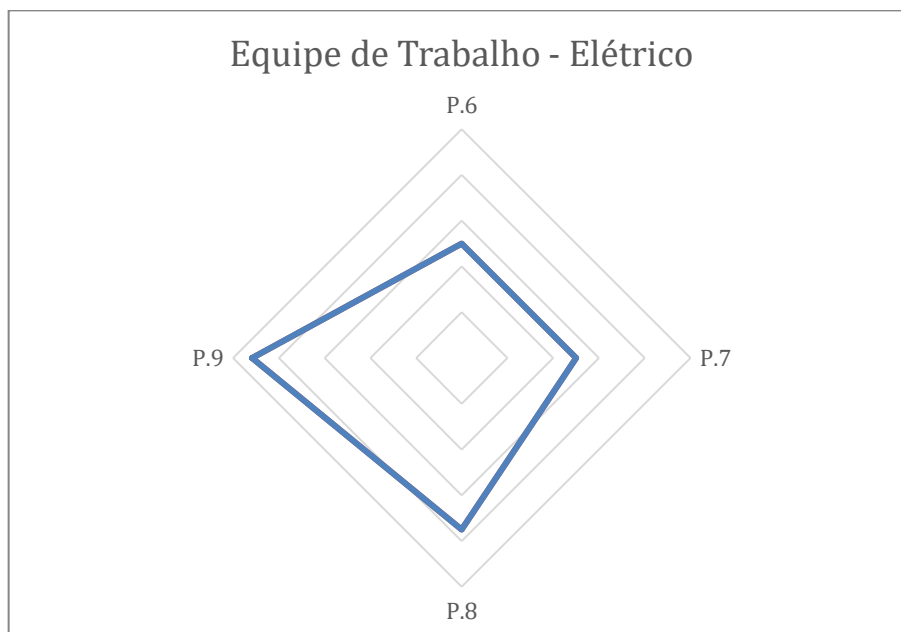


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

No caso da Figura 34, é possível perceber que os números estão levemente acima do esperado para o caso geral, o que representa um maior apelo estratégico da organização com foco no estabelecimento de políticas, planos de negócios, investimentos e promoção da inovação e colaboração para as práticas da I4.0. No entanto, percebe-se que estes valores estão bem abaixo do caso do setor da Mineração.

A Figura 35 apresenta o gráfico de radar da segunda dimensão, “Equipe de Trabalho”.

Figura 35 - Gráfico de radar da dimensão Equipe de Trabalho – Setor Elétrico.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Da mesma forma, os mesmos pontos fortes e fracos do caso geral são aplicados ao caso do Setor Elétrico para a dimensão “Equipe de Trabalho”. Percebe-se, no entanto, uma leve diminuição dos valores em comparação ao setor de Mineração.

A Figura 36 apresenta o gráfico de radar da terceira dimensão, “Tecnologia”.



- O maquinário, como infraestrutura para a I4.0; e
- O uso da Manufatura Aditiva.

O índice de maturidade geral do Setor Elétrico é dado pelo Quadro 32.

Quadro 32 – Índice geral de maturidade – Setor Elétrico.

Item	Índice (%)	Nível de Maturidade
Índice Geral	63,8%	Intermediário

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Desta forma, percebe-se que, apesar de apresentar um índice geral de maturidade com valor um pouco acima do geral, o Setor Elétrico encontra-se no nível intermediário, estando abaixo do setor de Mineração em termos de maturidade da I4.0. A seguir, o setor de TI é avaliado.

## 6.5 ESTUDO DO SETOR DE TI

Nesta seção, o setor de Tecnologia da Informação (TI) será analisado. Ao todo, quatro funcionários fizeram parte do questionário. No Quadro 33, as funções dos respondentes são detalhadas.

Quadro 33 – Funções dos respondentes.

Função	Quantidade
Coordenador	1
Analista	2
Desenvolvedor	1

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O Quadro 34 apresenta os dados referentes ao índice local de maturidade dos elementos do Setor de TI.

Quadro 34 – Índice local de maturidade dos elementos – Setor de TI.

Questão	P. 1	P. 2	P. 3	P. 4	P. 5	P. 6	P. 7	P. 8	P. 9
Índice	37,5%	75,0%	75,0%	75,0%	0%	37,5%	100%	100%	75,0%
Questão	P.10.1	P.10.2	P.10.3	P.10.4	P. 11	P. 12	P. 13	P. 14.1	P. 14.2
Índice	50,0%	25,0%	75,0%	100%	75,0%	87,5%	75,0%	75,0%	0%
Questão	P. 14.3	P. 14.4	P. 14.5	P. 14.6	P. 14.7	P. 14.8	P. 14.9	P. 14.10	P. 14.11
Índice	0%	0%	0%	25,0%	75,0%	25,0%	100%	0%	0%
Questão	P. 14.12	P. 14.13	P. 14.14						
Índice	25,0%	25,0%	100%						

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com base nestes resultados, foi possível analisar as informações e encontrar um índice de maturidade para as dimensões, descrito no Quadro 35.

Quadro 35 – Índice de maturidade das dimensões – Setor de TI.

Dimensão	Índice (%)	Nível de Maturidade
Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional	52,5%	Intermediário
Equipe de Trabalho	78,1%	Experiente
Tecnologia	44,6%	Iniciante

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Diferente dos demais setores, o setor de TI apresenta a “Equipe de Trabalho” com o maior valor de maturidade, no nível experiente. Isto se deve ao alto grau de qualificação já esperado e característico do setor. A seguir, o gráfico de radar das dimensões do setor de TI é apresentado.

Figura 37 – Gráfico de radar da dimensão Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional – Setor de TI.

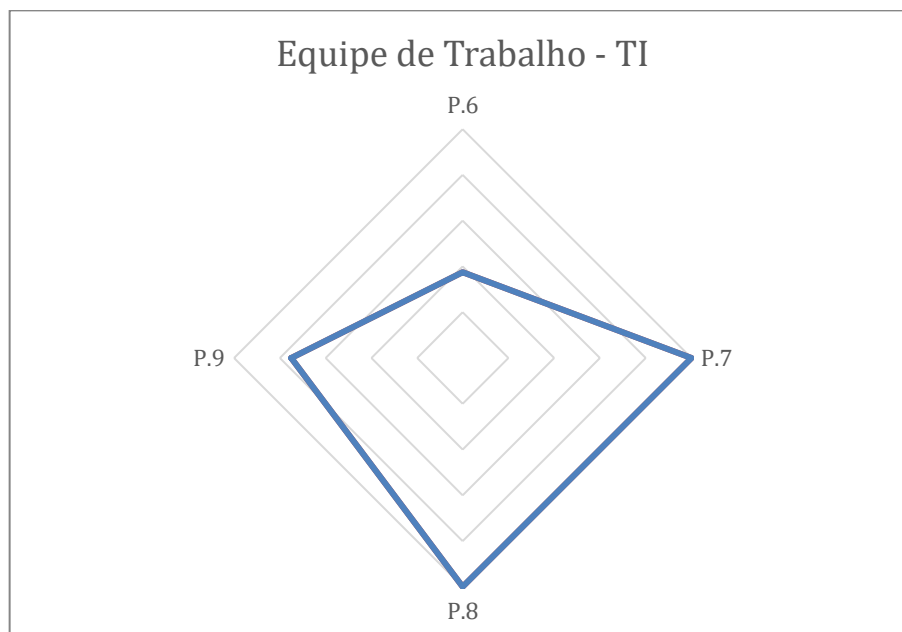


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A partir da Figura 37, percebe-se que os itens P.1 e P.5 são os de menor valor, enquanto os demais representam valores maiores. Estes dois itens são referentes ao alinhamento estratégico com a I4.0 e o uso de KPIs. Estes valores divergem um pouco dos demais setores apresentados anteriormente.

A Figura 38 apresenta o gráfico de radar da segunda dimensão, "Equipe de Trabalho".

Figura 38 - Gráfico de radar da dimensão Equipe de Trabalho – Setor de TI.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os pontos fortes apresentados na Figura 38 são os seguintes: P.7 e P.8. Estes valores são referentes aos conhecimentos e habilidades e a autonomia e criatividade para inovar. Estes valores divergem do caso geral, visto que os conhecimentos e habilidades são considerados um ponto fraco no caso geral. Já o ponto negativo é o P.6, que envolve o treinamento dos colaboradores.

A Figura 39 apresenta o gráfico de radar da terceira dimensão, “Tecnologia”.



- Na infraestrutura, recursos físicos e digitais;
- Capacidade de alterar seus processos em tempo real com base em dados;
- Segurança dos dados;
- Personalização dos produtos;
- Uso do Big Data;
- Computação em Nuvem;
- Internet das Coisas; e
- Integração de Sistemas.

Percebe-se que o conjunto de tecnologias digitais do setor de TI está abaixo do esperado devido ao contexto tecnológico em que se encontra. Por exemplo, o tópico Inteligência Artificial apresenta valor de 25%, com valor considerado inexistente pelo Quadro 18. Esperava-se resultados mais próximos do valor intermediário, o que não aconteceu.

O índice de maturidade geral do Setor de TI é dado pelo Quadro 36.

Quadro 36 – Índice geral de maturidade – Setor de TI.

<b>Item</b>	<b>Índice (%)</b>	<b>Nível de Maturidade</b>
Índice Geral	58,4%	Intermediário

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Assim, com base no Quadro 36, os resultados demonstram um nível intermediário de maturidade para o setor de TI. Ou seja, ainda que a qualificação dos funcionários é notadamente superior aos demais casos, o uso das tecnologias digitais está bem abaixo do esperado para o setor. A seguir, apresenta-se o setor de Metalurgia.

## 6.6 ESTUDO DO SETOR DE METALURGIA

Nesta seção, o setor de Metalurgia será analisado. Ao todo, três funcionários fizeram parte do questionário. No Quadro 37, as funções dos respondentes são detalhadas.

Quadro 37 – Funções dos respondentes.

<b>Função</b>	<b>Quantidade</b>
Gerente de Engenharia	1
Diretor	1
Engenheiro	1

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O Quadro 38 apresenta os dados referentes ao índice local de maturidade dos elementos do Setor de Metalurgia.

Quadro 38 – Índice local de maturidade dos elementos – Setor de Metalurgia.

<b>Questão</b>	<b>P. 1</b>	<b>P. 2</b>	<b>P. 3</b>	<b>P. 4</b>	<b>P. 5</b>	<b>P. 6</b>	<b>P. 7</b>	<b>P. 8</b>	<b>P. 9</b>
<b>Índice</b>	50,0%	66,7%	33,3%	66,7%	0%	16,7%	16,7%	50,0%	66,7%
<b>Questão</b>	P.10.1	P.10.2	P.10.3	P.10.4	P. 11	P. 12	P. 13	P. 14.1	P. 14.2
<b>Índice</b>	33,3%	33,3%	100%	33,3%	0%	50,0%	100%	0%	0%
<b>Questão</b>	P. 14.3	P. 14.4	P. 14.5	P. 14.6	P. 14.7	P. 14.8	P. 14.9	P. 14.10	P. 14.11
<b>Índice</b>	0%	0%	0%	0%	66,7%	0%	33,3%	0%	66,7%
<b>Questão</b>	P. 14.12	P. 14.13	P. 14.14						
<b>Índice</b>	0%	0%	33,3%						

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com base nestes resultados, foi possível analisar as informações e encontrar um índice de maturidade para as dimensões, descrito no Quadro 39.

Quadro 39 – Índice de maturidade das dimensões – Setor de Metalurgia.

Dimensão	Índice (%)	Nível de Maturidade
Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional	43,3%	Iniciante
Equipe de Trabalho	37,5%	Iniciante
Tecnologia	26,2%	Inexistente

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os valores apresentados pelo setor de Metalurgia estão bem abaixo do caso geral. A seguir, o gráfico de radar das dimensões do Setor de Metalurgia é apresentado.

Figura 40 – Gráfico de radar da dimensão Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional – Setor de Metalurgia.

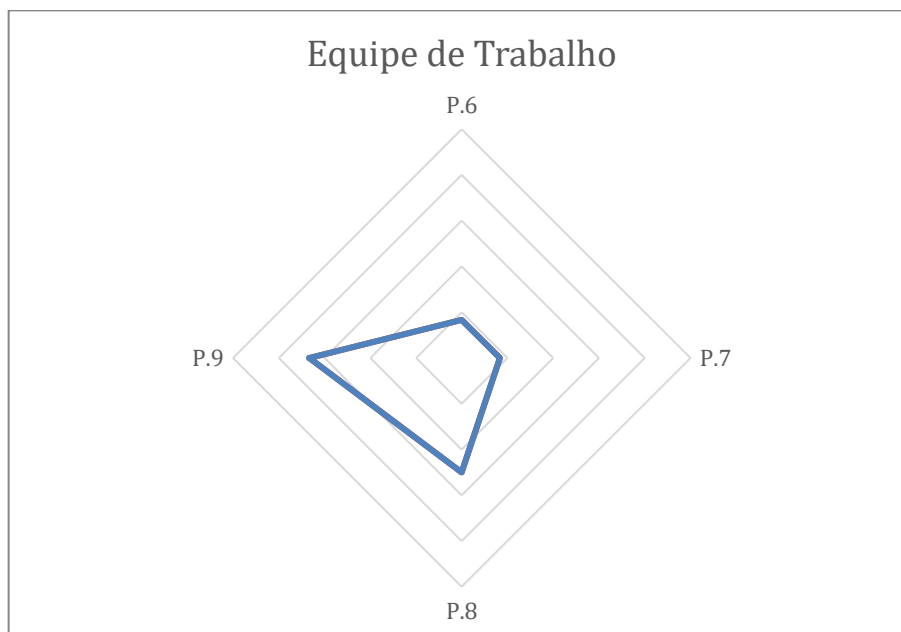


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Na Figura 40, percebe-se que o item P.5, “Uso de KPIs para acompanhamento da I4.0”, é o de menor valor, enquanto o P.2 e o P.4 apresentam os melhores valores. Estes dois itens são referentes à “Composição da I4.0 no plano de negócios” e a “Promoção da inovação e colaboração para geração de valor”.

A Figura 41 apresenta o gráfico de radar da segunda dimensão, “Equipe de Trabalho”.

Figura 41 - Gráfico de radar da dimensão Equipe de Trabalho – Setor de Metalurgia.

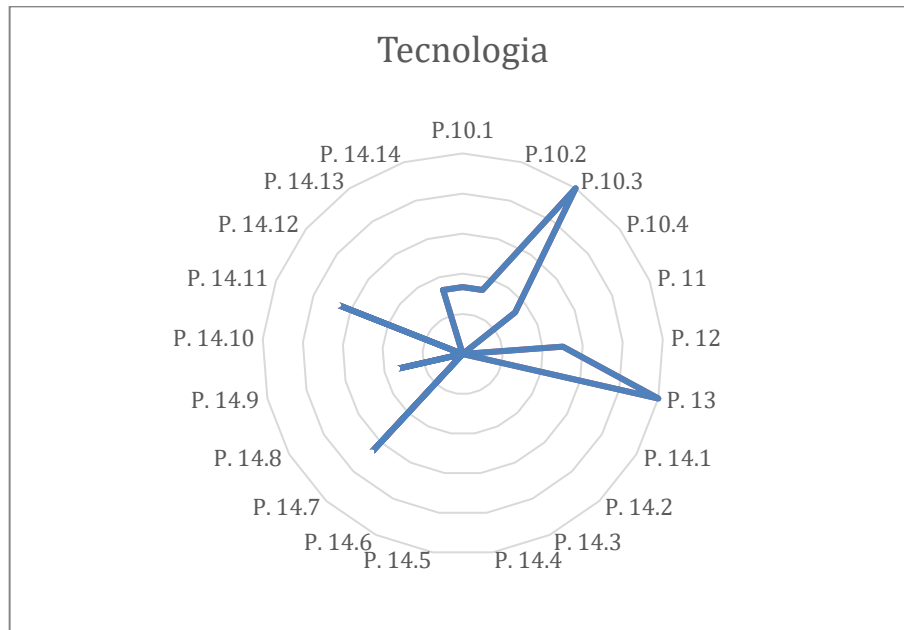


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A partir da Figura 41, percebe-se que P.9. apresenta o maior valor. Este item diz respeito a Flexibilidade para sugerir mudanças. Os dois pontos negativos referem-se aos itens P.6 e P.7. Eles indicam o treinamento dos colaboradores e os conhecimentos e habilidades. Isto demonstra que o treinamento e desenvolvimento dos funcionários no setor de Metalurgia está abaixo do esperado para implementar as tecnologias da I4.0.

A Figura 42 apresenta o gráfico de radar da terceira dimensão, "Tecnologia".

Figura 42 - Gráfico de radar da dimensão Tecnologia – Setor de Metalurgia.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O setor de Metalurgia apresenta vários pontos abaixo do esperado para as tecnologias da I4.0, como:

- Capacidade de alterar seus processos em tempo real com base em dados;
- Uso do Big Data;
- A Manufatura Aditiva;
- Realidade Aumentada;
- Realidade Virtual;
- Digital Twin
- Robôs autônomos;
- Inteligência Artificial;
- Sistemas Ciberfísicos;
- O uso de Sistemas de Apoio à Decisão; e
- Sensores e Atuadores.

Estes pontos fracos são semelhantes ao setor de TI. Já como pontos fortes, cita-se a:

- Na infraestrutura, recursos físicos;
- Personalização dos produtos;
- Computação em Nuvem; e

- Simulação.

A maior parte das tecnologias digitais apresenta valores nulos no setor de Metalurgia. Isto demonstra, com base nos dados das empresas do Espírito Santo, que elas ainda são muito incipientes neste contexto da I4.0.

O índice de maturidade geral do Setor de Metalurgia é dado pelo Quadro 40.

Quadro 40 – Índice geral de maturidade – Setor de Metalurgia.

Item	Índice (%)	Nível de Maturidade
Índice Geral	35,7%	Iniciante

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Assim, com base no Quadro 40, os resultados demonstram um nível de maturidade iniciante para o setor de Metalurgia. A seguir, os resultados do setor de Siderurgia são apresentados.

## 6.7 ESTUDO DO SETOR DE SIDERURGIA

Nesta seção, o setor de Siderurgia será analisado. Ao todo, três funcionários fizeram parte do questionário. No Quadro 41, as funções dos respondentes são detalhadas.

Quadro 41 – Funções dos respondentes.

Função	Quantidade
Gerente	1
Head em Ecossistema de Inovação Digital	1
Estagiário	1

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O Quadro 42 apresenta os dados referentes ao índice local de maturidade dos elementos da empresa do setor de Siderurgia.

Quadro 42 – Índice local de maturidade dos elementos – Setor de Siderurgia.

Questão	P. 1	P. 2	P. 3	P. 4	P. 5	P. 6	P. 7	P. 8	P. 9
Índice	100%	83,3%	83,3%	83,3%	66,7%	50,0%	50,0%	66,7%	83,3%
Questão	P.10.1	P.10.2	P.10.3	P.10.4	P. 11	P. 12	P. 13	P. 14.1	P. 14.2
Índice	100%	66,7%	66,7%	100%	83,3%	100%	66,7%	66,7%	66,7%
Questão	P. 14.3	P. 14.4	P. 14.5	P. 14.6	P. 14.7	P. 14.8	P. 14.9	P. 14.10	P. 14.11
Índice	33,3%	66,7%	33,3%	100%	66,7%	66,7%	66,7%	100%	66,7%
Questão	P. 14.12	P. 14.13	P. 14.14						
Índice	66,7%	100%	66,7%						

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com base nestes resultados, foi possível analisar as informações e encontrar um índice de maturidade para as dimensões, descrito no Quadro 43.

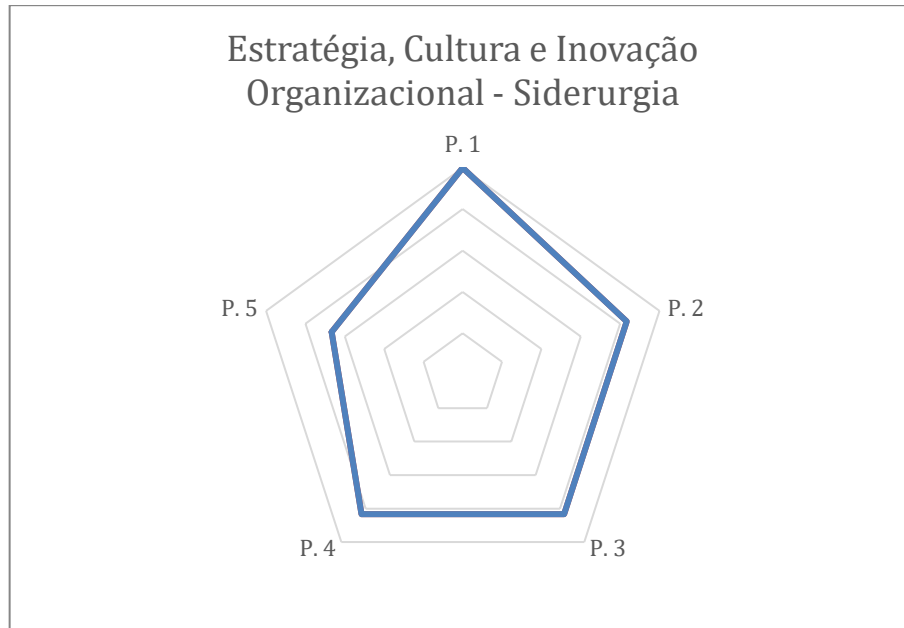
Quadro 43 – Índice de maturidade das dimensões – Setor de Siderurgia.

Dimensão	Índice (%)	Nível de Maturidade
Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional	83,3%	Experiente
Equipe de Trabalho	62,5%	Intermediário
Tecnologia	73,8%	Intermediário

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os resultados apresentados demonstram que as dimensões do setor siderúrgico apresentam valores acima do caso geral para “Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional” e “Tecnologia”. A seguir, o gráfico de radar das dimensões do setor de Siderurgia é apresentado.

Figura 43 – Gráfico de radar da dimensão Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional – Setor de Siderurgia.

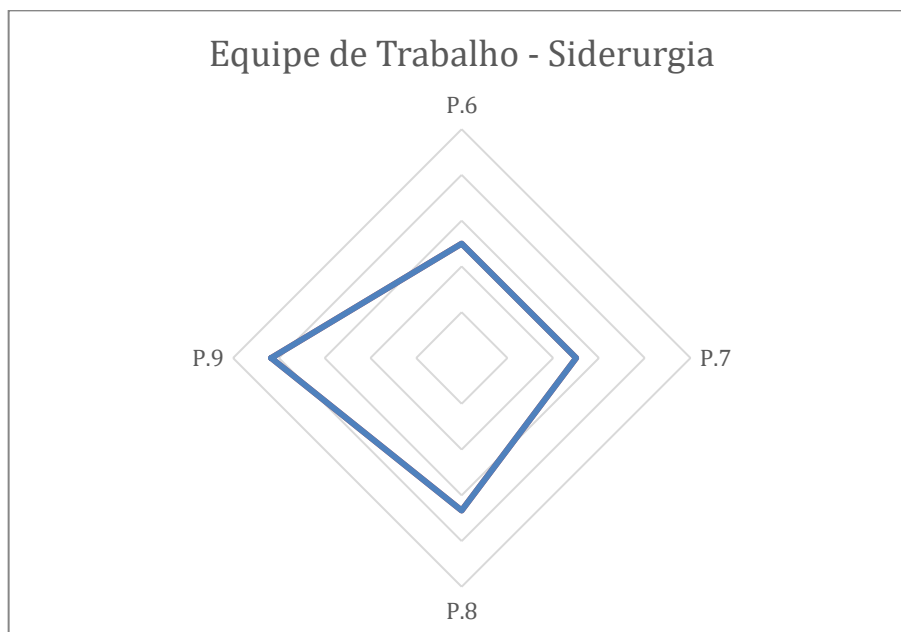


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Na Figura 43, percebe-se que todos os itens apresentam valores acima de 75%, exceto o P.5. Este item diz respeito aos KPIs usados para monitorar a implantação da I4.0. Ainda assim, o valor apresentado por este item está acima dos valores dos outros setores. Os demais valores também estão bem acima dos apresentados pelos demais setores, exceto o do setor de Mineração. Isto demonstra que este setor investe em “Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional” no contexto da I4.0.

A Figura 44 apresenta o gráfico de radar da segunda dimensão, “Equipe de Trabalho”.

Figura 44 - Gráfico de radar da dimensão Equipe de Trabalho – Setor de Siderurgia.

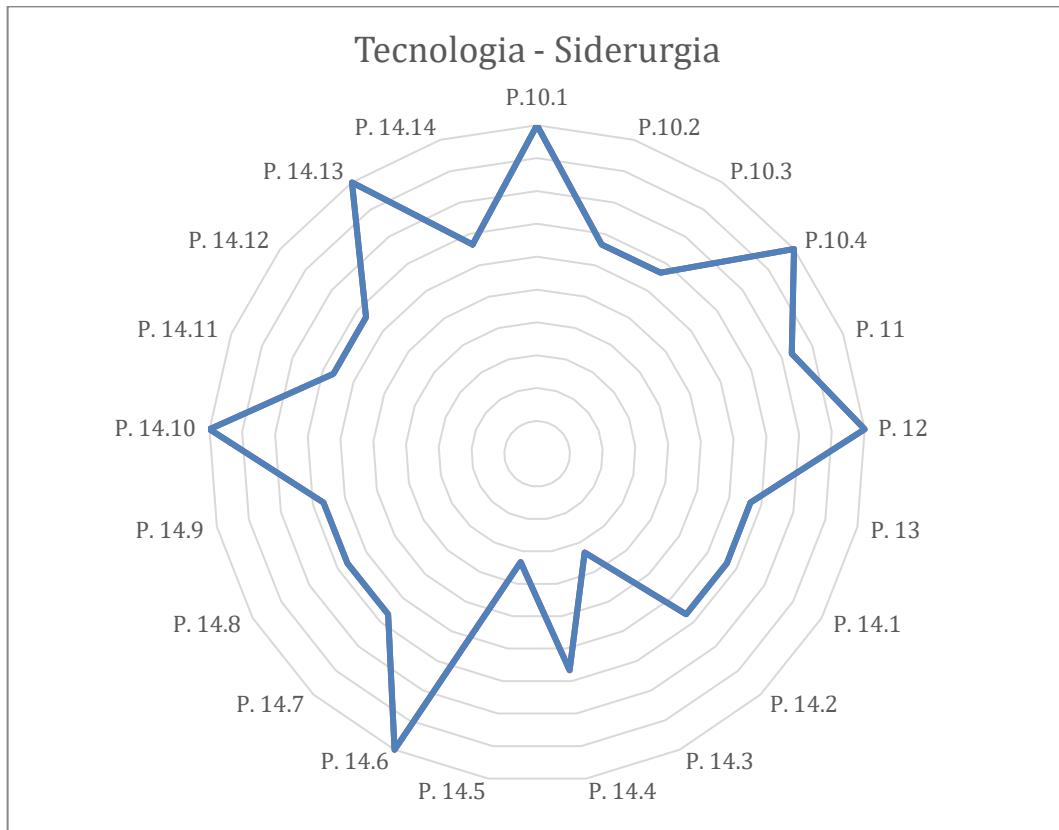


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Na Figura 44, destaca-se o item P.9., que apresenta o maior valor. Este item diz respeito a Flexibilidade para sugerir mudanças. Não foram encontrados pontos abaixo do esperado, com os demais itens estando na média.

A Figura 45 apresenta o gráfico de radar da terceira dimensão, “Tecnologia”.

Figura 45 - Gráfico de radar da dimensão Tecnologia – Setor de Siderurgia.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O setor de Siderurgia não apresenta muitos pontos abaixo do esperado, diferente dos setores anteriormente citados. Assim, com base no gráfico, percebeu-se como menor valor os itens P.14.3 e P.14.5. Ambos representam, respectivamente, Realidade Aumentada e *Digital Twin*.

Já como pontos fortes, cita-se a:

- Na infraestrutura, equipamentos e recursos digitais;
- Capacidade de alterar seus processos em tempo real com base em dados;
- Segurança dos dados;
- Robôs autônomos;
- Sistemas Ciberfísicos; e
- Sensores e Atuadores.

Este resultado demonstra que o setor de Siderurgia, no Espírito Santo, apresenta uma boa quantidade de tecnologias digitais em nível experiente ou intermediário, bem acima dos demais setores.

O índice de maturidade geral da empresa do Setor de Siderurgia é dado pelo Quadro 44.

Quadro 44 – Índice geral de maturidade – Setor de Siderurgia.

Item	Índice (%)	Nível de Maturidade
Índice Geral	73,2%	Intermediário

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Assim, com base no Quadro 44, os resultados demonstram um nível de maturidade intermediário para o setor de Siderurgia, bem próximo do nível experiente.

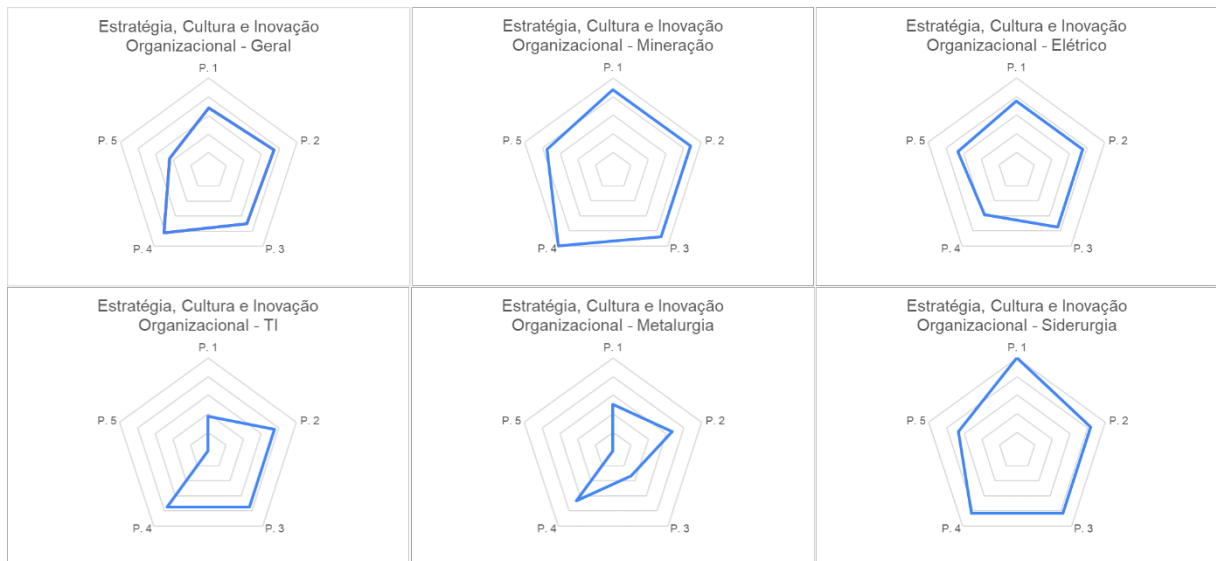
Conclui-se que o nível de maturidade do Estado do Espírito Santo é intermediário, com base no conjunto de respostas dos especialistas das empresas estudadas. Entende-se que o trabalho pode contribuir para o fomento das tecnologias da Indústria 4.0 nas empresas, ao apresentar um diagnóstico inicial da maturidade das empresas do Estado. A Indústria 4.0 pode contribuir para a formação de novos empregos, abertura de novos negócios, além de trazer inúmeros benefícios para a comunidade. Portanto, espera-se que o trabalho seja um ponto de partida para incentivar a adoção e crescimento destas tecnologias nas empresas rumo à excelência em Indústria 4.0.

Optou-se por não analisar os demais setores, como Petróleo e Gás e Serviços, já que eles obtiveram um respondente cada, sendo incluídos apenas no caso geral. A seguir, um resumo comparativo dos setores estudados é apresentado.

## 6.8 COMPARATIVO DOS SETORES

Com base nos resultados apresentados anteriormente, é possível resumir os setores e compará-los com o caso geral. Isto pode ser descrito na Figura 46.

Figura 46 – Comparativo dos setores – Dimensão Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional.



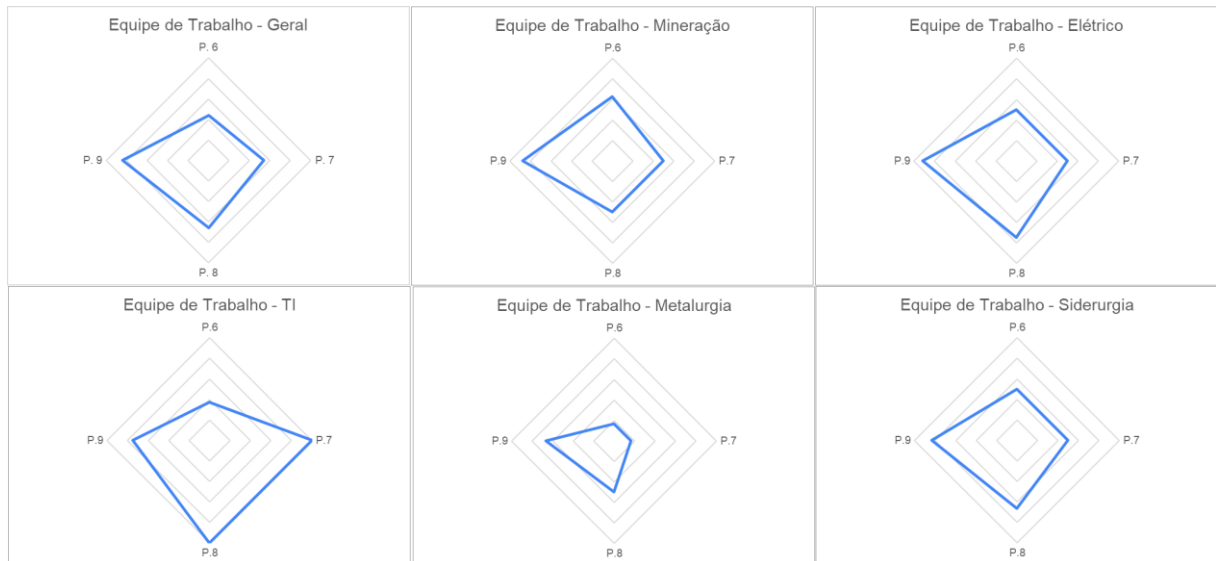
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Com base na Figura, é possível analisar os setores e entender como eles se relacionam na dimensão “Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional”. Percebe-se que:

- P.1 (Alinhamento da Estratégia Organizacional com os conceitos da I4.0) apresenta o maior valor no setor de Siderurgia e o menor valor no setor de TI, seguido do setor de Metalurgia. Os setores de Mineração e Elétrico se aproximam do caso geral.
- P.2 (Composição da I4.0 no plano de negócios) apresenta o maior valor no setor de Mineração e menor valor no setor de Metalurgia. Os demais setores se aproximam do caso geral.
- P.3 (Disponibilização de Recursos financeiros) apresenta o maior valor na Mineração, seguido da Siderurgia e menor valor na Metalurgia. O caso geral se aproxima dos setores TI, Elétrico e Siderurgia.
- P.4 (Promoção da inovação e colaboração para geração de valor) apresenta o maior valor na Mineração e menor valor no setor Elétrico, seguido da Metalurgia. Os demais setores se aproximam do caso geral.
- P5 (Uso de KPIs para acompanhamento da I4.0) apresenta o maior valor nos setores Elétrico e de Siderurgia e menor valor nos setores de TI e Metalurgia.

Para o caso da dimensão “Equipe de Trabalho”, temos a Figura 47.

Figura 47 – Comparativo dos setores – Dimensão Equipe de Trabalho.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

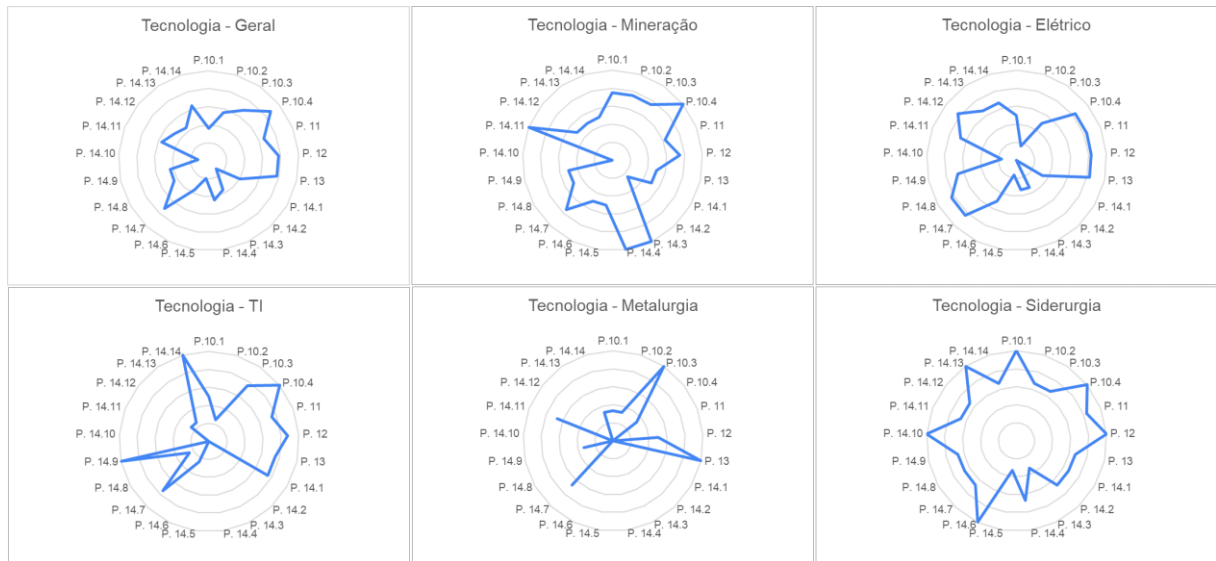
Os setores possuem os seguintes pontos:

- P.6 (Treinamento dos colaboradores) tem maior valor no setor de Mineração e menor valor no setor de Metalurgia. Os demais valores se aproximam do caso geral.
- P.7 (Conhecimentos e habilidades) apresenta maior valor no setor da TI e menor valor no setor de Metalurgia. Os demais valores se aproximam do caso geral.
- P.8 (Autonomia e criatividade para inovar) apresenta maior valor no setor da TI e menor valor na Metalurgia. Os demais valores se aproximam do caso geral.
- P.9 (Flexibilidade para sugerir mudanças) apresentam maior valor no setor Elétrico, seguido da Mineração e menor valor no setor de Metalurgia. Os demais valores se aproximam do caso geral.

Percebeu-se, neste caso, que o setor de Metalurgia se encontra muito abaixo do esperado no quesito “Equipe de Trabalho”. Já o setor de TI está num bom nível de maturidade neste quesito. Isto se deve à qualificação do setor e à dependência da mão de obra para executar de maneira eficiente o trabalho desejado.

Para o caso da dimensão “Tecnologia”, temos a Figura 48.

Figura 48 – Comparativo dos setores – Dimensão Tecnologia.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Como pontos a serem destacados da dimensão “Tecnologia”, temos:

- P.10.1 (Na infraestrutura, Equipamentos) apresenta maior valor no setor de Siderurgia, seguido da Mineração e menor valor no setor de Metalurgia, seguido dos setores de TI e Elétrico.
- P.10.2 (Na infraestrutura, Maquinário) apresenta maior valor de Mineração, seguido da Siderurgia e menor valor no setor Elétrico, seguido da TI e da Metalurgia.
- P.10.3 (Na infraestrutura, Recursos Físicos) apresenta maior valor no setor de Metalurgia, na Mineração e no setor de TI e menor valor no setor Elétrico.
- P.10.4 (Na infraestrutura, Recursos Digitais) apresenta maior valor no setor de Mineração, TI e Siderurgia e menor valor no setor Metalúrgico.
- P.11 (Capacidade de alterar seus processos em tempo real com base em dados) apresenta maior valor no setor de Siderurgia, seguido da TI e menor valor no setor de Metalurgia.
- P.12 (Segurança dos dados) apresenta maior valor no setor de Siderurgia e TI e menor valor no setor Elétrico.
- P.13 (Personalização dos produtos) apresenta maior valor no setor de Metalurgia, seguido do setor Elétrico e menor valor no setor de Mineração. Ainda assim, os menores valores ainda estão próximos do valor intermediário.

- P.14.1 (Uso do Big Data) apresenta maior valor no setor de TI e menor valor no setor de Metalurgia, seguido do setor Elétrico. Os demais valores estão próximos do valor intermediário.
- P.14.2 (Manufatura Aditiva) apresenta maior valor no setor de Siderurgia e menor valor no setor Elétrico, de TI e Metalurgia.
- P.14.3 (Realidade Aumentada) apresenta maior valor no setor de Mineração e menor valor no setor de TI e Metalurgia.
- P.14.4 (Realidade Virtual) apresenta maior valor no setor de Mineração e menor valor no setor de TI e Metalurgia. Os demais valores estão próximos do valor intermediário.
- P.14.5 (*Digital Twin*) apresenta maior valor no setor de Mineração e menor valor no setor de TI e Metalurgia. Estes valores estão bem abaixo, demonstrando que esta tecnologia ainda não é amplamente utilizada nas empresas.
- P.14.6 (Robôs autônomos) apresenta maior valor no setor de Siderurgia e menor valor no setor de TI e Metalurgia.
- P.14.7 (Computação em Nuvem) apresenta maior valor no setor de Elétrico, seguido da Mineração e da TI. Metalurgia e Siderurgia fazem parte do valor intermediário, não possuindo valores baixos.
- P.14.8 (Inteligência Artificial) apresenta maior valor no setor Elétrico e menor valor no setor de TI e Metalurgia. Os valores da Mineração e Siderurgia estão próximos do intermediário.
- P.14.9 (Internet das Coisas) apresenta maior valor no setor de TI e menor valor no setor de Metalurgia. Os demais valores estão próximos do intermediário.
- P.14.10 (Sistemas Ciberfísicos) apresenta maior valor no setor de Siderurgia e menor valor no setor de Metalurgia, Mineração, Elétrico e TI.
- P.14.11 (Simulação) apresenta maior valor no setor de Mineração e menor valor no setor de TI. Os demais valores estão próximos do intermediário.
- P.14.12 (Sistemas de Apoio à Decisão) apresenta maior valor no setor Elétrico e menor valor no setor de Metalurgia e de TI. Os demais valores estão próximos do intermediário.
- P.14.13 (Sensores e Atuadores) apresenta maior valor no setor de Siderurgia e menor valor no setor de Metalurgia e de TI. Os demais valores estão próximos do intermediário.

- P.14.14 (Integração de Sistemas) apresenta maior valor no setor de TI e menor valor no setor de Metalurgia. Os demais valores estão próximos do intermediário.

Estes valores demonstram que a maior parte dos pontos positivos estão no setor de Siderurgia e Mineração e menores valores no setor de TI e Metalurgia. Esperava-se uma maior aderência das tecnologias digitais no setor de TI, devido à proximidade com o fator tecnológico, o que não aconteceu. Compreende-se que a Mineração e a Siderurgia, fortes no Estado do Espírito Santo, estão bem situadas em relação às tecnologias digitais. A Metalurgia apresenta alguns problemas em relação à questão tecnológica, estando muito abaixo dos demais valores. A seguir, um comparativo do resultado geral com relatórios da Indústria 4.0 é apresentado.

## 6.9 COMPARATIVO DO RESULTADO GERAL COM RELATÓRIOS DA INDÚSTRIA 4.0

Esta seção busca realizar uma comparação entre os resultados do contexto geral da amostra de indústrias do Espírito Santo com os demais relatórios que realizaram um estudo da adoção das tecnologias da Indústria 4.0.

### **6.9.1 Relatório “Mapeamento das principais metodologias de aproximação entre o setor produtivo e as tecnologias 4.0”**

Nesta seção, os resultados do questionário aplicado nesta pesquisa são confrontados com o relatório de Cunha Junior (2022), com o objetivo de identificar semelhanças e diferenças entre os resultados. O relatório de Cunha Junior (2022) apresenta um estudo da Câmara Brasileira da Indústria 4.0 em conjunto com Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), visando mapear as metodologias de aproximação entre Indústria e tecnologias da I4.0. Para tanto, um questionário foi aplicado aos associados do Grupo de Trabalho de Desenvolvimento Tecnológico e Inovação da Câmara Brasileira da Indústria 4.0. O foco era de entender o nível de conhecimento sobre as tecnologias da I4.0 e a existência de projetos de implementação delas.

No relatório de Cunha Junior (2022), cerca de 45% dos respondentes está desenvolvendo algum projeto de I4.0 ou está em pleno engajamento, com 35% dos respondentes. Este valor está parcialmente alinhado com os resultados obtidos nesta

pesquisa, com um número maior de estratégias de I4.0 sendo definidas pelas empresas (cerca de 48%) e parcialmente desenvolvidas (cerca de 40%), como pode ser descrito pela Figura 13.

Para Cunha Junior (2022), cerca de 65% dos respondentes considera utilizar Inteligência Artificial, Sensores Inteligentes, Computação em Nuvem e Big Data em suas empresas. Este valor está parcialmente alinhado com os resultados obtidos por esta pesquisa. A Computação em nuvem é, essencialmente, a tecnologia de maior valor para os respondentes, com 75% das respostas. No entanto, Inteligência Artificial, Big Data e Sensores e Atuadores são aplicadas em 42% das empresas dos respondentes, abaixo do valor indicado pela pesquisa no Brasil, descrito pela Figura 26.

### **6.9.2 Relatório “Sondagem especial: Indústria 4.0 cinco anos depois”**

Este relatório busca fazer uma análise da Indústria 4.0 cinco anos após o primeiro relatório da CNI sobre este tema. A primeira conclusão obtida com base nas respostas das empresas diz respeito à utilização das tecnologias da I4.0. Na classificação da CNI há 18 tecnologias, e cerca de 69% das empresas já faz uso de alguma destas tecnologias em seus processos. No entanto, apenas 7% utilizam 10 ou mais tecnologias, indicando que as empresas se encontram em uma fase inicial do processo de digitalização. Ou seja, a conclusão é que a Indústria brasileira está mais digital, no entanto ainda apresenta baixa maturidade (CNI, 2022).

No caso deste estudo, é possível perceber, pela Figura 26, que 75% dos respondentes faz uso de pelo menos uma tecnologia, neste caso a Computação em Nuvem. No entanto, apenas seis empresas fazem uso de mais de 10 tecnologias digitais da I4.0, o que representa um percentual de 25% do valor total. Estes valores apresentam um resultado maior do que o obtido no relatório da CNI, o que demonstra uma maturidade maior das tecnologias digitais nas empresas do Estado do Espírito Santo.

Outra questão citada no relatório é a automação digital por meio do uso de sensores, que é a principal tecnologia digital em uso, com 46% das respostas (CNI, 2022). No caso deste estudo, o uso de sensores representa 46% das respostas apresentadas, sendo igual ao número do relatório. Isto demonstra um alinhamento do uso desta tecnologia pelas empresas do Espírito Santo com os dados do país.

O uso da prototipagem rápida, impressão 3D e similares (Manufatura Aditiva) ficou em 16% no relatório da CNI. No caso desta pesquisa, 13% fazem uso desta tecnologia. Novamente, estes resultados estão alinhados com a pesquisa realizada no Espírito Santo.

Já as aplicações de Inteligência Artificial para soluções na fábrica, com 9%, e o Design assistido por Inteligência Artificial, com 4% diferem da realidade apresentada no Estado do Espírito Santo, visto que 42% das empresas capixabas faz uso da Inteligência Artificial. Ou seja, no Espírito Santo, o uso da Inteligência Artificial é muito maior do que o apresentado pelas empresas no restante do Brasil, com base na comparação entre a pesquisa desta dissertação e no relatório CNI (2022).

No relatório também consta que 37% dos respondentes considera a falta de trabalhador qualificado como uma barreira à adoção das tecnologias digitais (CNI, 2022). No caso da pesquisa capixaba, cerca de 29% dos respondentes diz que os funcionários não possuem conhecimentos e habilidades para lidar com as tecnologias da I4.0. No entanto, 38% considera que há habilidades suficientes.

Em geral, percebeu-se um alinhamento parcial entre as principais conclusões do relatório CNI (2022) e da pesquisa no Estado do Espírito Santo. Isto pode ser um indicativo da evolução e maturidade das empresas capixabas, que estão apresentando resultados semelhantes, de acordo com os funcionários e gestores destas empresas.

## 7 CONCLUSÃO

A Indústria 4.0 apresenta inúmeras possibilidades para as organizações, incrementando a produção, reduzindo custos e aprimorando a qualidade de seus produtos. Suas tecnologias podem contribuir para que as organizações obtenham vantagens competitivas, apresentando melhores resultados em todos os setores da organização.

Devido à complexidade da implementação da Indústria 4.0, diversas ferramentas podem contribuir para que as empresas implementem estas tecnologias. O modelo de maturidade pode ser uma ferramenta importante neste sentido, pois ajuda as empresas a entender o seu processo de maturidade rumo à excelência em manufatura. Este artigo buscou desenvolver um modelo de maturidade aplicado às empresas do Espírito Santo, de modo a contribuir para o entendimento acerca da Indústria 4.0.

O modelo apresentado foi desenvolvido por meio da metodologia de De Bruin (2005), sendo composto por três dimensões - Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional, Equipe de Trabalho e Tecnologia, 30 elementos e cinco níveis de maturidade - Inexistente, Iniciante, Intermediário, Experiente e Especialista.

O modelo de maturidade serviu de base para a elaboração de um questionário com 14 perguntas, aplicadas para 25 funcionários de 17 empresas do Estado do Espírito Santo, no Brasil. A partir dos dados encontrados, foi possível identificar o nível de maturidade das empresas estudadas como “Intermediário”, de valor 59,7%. As dimensões apresentaram como resultado: “Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional” com 67,6%, “Equipe de trabalho” com 62,0% e dimensão “Tecnologia” com 49,6%. As primeiras dimensões apresentaram a classificação de intermediário, mas a última apresentou resultado de iniciante.

Os valores apresentados demonstram que as empresas do ES apresentam aplicação parcial das tecnologias da I4.0, tendo um longo caminho para chegar à excelência em I4.0. Percebeu-se que há interesse em agregar as tecnologias e conhecimentos da Indústria 4.0 no planejamento estratégico das organizações, mas elas ainda esbarram em algumas dificuldades de implementação como o alto custo de implantação das tecnologias e a falta de conhecimentos e habilidades dos funcionários.

Conclui-se que as empresas devem focar mais nas questões envolvendo o uso de KPIs para acompanhamento da I4.0 no contexto estratégico, além de aprimorar as questões envolvendo treinamento dos colaboradores e o conhecimento e habilidades existentes, no contexto da equipe de trabalho. Ainda, pode-se buscar aprimorar a implementação das tecnologias “Manufatura Aditiva”, “Realidade Aumentada” “Digital Twin”, “Robôs Autônomos” e “Sistemas Ciberfísicos”, pois são as de menor valor no contexto tecnológico.

Percebeu-se também, um ótimo nível relacionado à promoção da inovação e colaboração para gerar valor, no contexto estratégico, além da flexibilidade para sugerir mudanças no contexto da equipe de trabalho. Estes pontos são positivos, ao apresentar a questão da inovação e da flexibilidade nas empresas, demonstrando que estão aptas a buscar e analisar o contexto geral para promover mudanças conforme as necessidades vão surgindo. Além disso, as questões envolvendo a estrutura, com uso de recursos digitais, além da preocupação com a segurança de dados e a personalização de produtos surgem como pontos de destaque no contexto tecnológico. Os resultados demonstram que as organizações estão buscando implementar as tecnologias da I4.0, apresentando um valor intermediário de maturidade, com pontos positivos e negativos em destaque.

Realizou-se ainda um comparativo entre os setores de Mineração, Elétrico, de TI, Siderurgia e Metalurgia. Identificou-se que os setores de Siderurgia e Mineração apresentam os maior valores em termos gerais, com os setores de TI e Metalurgia com os menores valores. A dimensão "Estratégia, Cultura e Inovação Organizacional" é destaque nos setores de Mineração e Siderurgia, apresentando valor "Experiente" em nível de maturidade. A dimensão "Equipe de trabalho" é destaque no setor de TI e a dimensão "Tecnologia" é destaque no setor de Siderurgia. O menor valor está na dimensão "Tecnologia" no setor de Metalurgia, bem abaixo dos demais valores e demonstrando pouca aderência às tecnologias digitais da I4.0.

Estes resultados podem ser explicados devido à grande fatia e importância dos setores de Mineração e Siderurgia no Estado do Espírito Santo, com grandes empresas multinacionais que investem de maneira incisiva nas tecnologias digitais da I4.0.

Esperava-se resultados mais expressivos do setor de TI, devido ao crescimento, nos últimos anos, de startups e empresas focadas nos pilares da I4.0, o que não aconteceu. Apesar de demonstrarem maior capacidade, conhecimento e habilidades dos funcionários, ainda há pouca expressividade em termos de maturidade.

Como limitação, pode-se citar a subjetividade do estudo, inerente ao uso de questionários. Além disso, as relações entre os elementos apresentados no modelo de maturidade não foram estudadas mais à fundo. Como sugestão futura, é possível identificar as relações entre estes elementos, buscando entender como cada item pode influenciar no contexto geral de maturidade, além de realizar um estudo com especialistas para corroborar os elementos encontrados.

Outra limitação do estudo envolve a atribuição de pesos para avaliação dos dados. Uma sugestão é a de realizar o estudo com uma classificação de 0 a 100%, trazendo uma maior precisão na avaliação da maturidade.

Visto que as tecnologias digitais são o cerne da Indústria 4.0 e seus resultados de implementação não foram unanimidade na pesquisa, é possível realizar uma investigação com um enfoque maior nas barreiras à implementação destas tecnologias digitais nas organizações, visando entender o impacto causado por estas barreiras no contexto geral da Indústria 4.0.

Outra sugestão é a de evoluir o modelo para um aplicativo de medição e acompanhamento da implantação da Indústria 4.0 nas empresas, com um conjunto de recomendações e relatórios para que as empresas entendam o seu nível de maturidade e possam efetuar mudanças para alcançar a excelência em Indústria 4.0.

Por fim, conclui-se que o objetivo do estudo, de propor uma ferramenta de avaliação de maturidade para apoiar a implementação da Indústria 4.0 em empresas do estado do Espírito Santo foi alcançado. Foram identificados fatores críticos de sucesso, desafios e benefícios da implementação da Indústria 4.0. Além disso, foi possível apresentar os modelos de maturidade da literatura atual e desenvolver e aplicar uma ferramenta de avaliação de maturidade com uso de questionário em empresas do Espírito Santo. Espera-se que o trabalho possa contribuir para que as empresas realizem novos incentivos às tecnologias digitais da Indústria 4.0.

## REFERÊNCIAS

- AAZAM, Mohammad; ZEADALLY, Sherali; HARRAS, Khaled A. Deploying Fog Computing in Industrial Internet of Things and Industry 4.0. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS**, v. 14, n. 10, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8410462>>. Acesso em 7 de maio 2022.
- ABDUL-HAMID, Asma Qamaliah *et al.* Impeding challenges on industry 4.0 in circular economy: Palm oil industry in Malaysia. **Computers & Operations Research**, v. 123, p. 105052, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305054820301696>>. Acesso em: 7 ago. 2022.
- ADEL, Amr. Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas. **Journal of Cloud Computing**, v. 11, n. 1, p. 1–15, 2022. Disponível em: <https://link-springer-com.ez120.periodicos.capes.gov.br/articles/10.1186/s13677-022-00314-5>. Acesso em: 9 jan. 2023.
- AHMED, Imran *et al.* From Artificial Intelligence to Explainable Artificial Intelligence in Industry 4.0: A Survey on What, How, and Where. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL INFORMATICS**, v. 18, n. 8, p. 5031, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146552>>. Acesso em 2 de jan. 2023.
- AMARAL, Afonso; PEÇAS, Paulo. A Framework for Assessing Manufacturing SMEs Industry 4.0 Maturity. **Applied Sciences**, v. 11, n. 13, p. 6127, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/13/6127/htm>>. Acesso em: 22 jan. 2023.
- ANGRISANI, Leopoldo *et al.* A Wearable Brain-Computer Interface Instrument for Augmented Reality-Based Inspection in Industry 4.0. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 69, n. 4, p. 1530–1539, 2020.
- AOUN, Alain *et al.* A review of Industry 4.0 characteristics and challenges, with potential improvements using blockchain technology. **Computers & Industrial Engineering**, v. 162, p. 107746, 2021.
- ARIFFIN, Khairul Akram Zainol; AHMAD, Faris Hanif. Indicators for maturity and readiness for digital forensic investigation in era of industrial revolution 4.0. **Computers & Security**, v. 105, p. 102237, 2021.
- ÁVILA-BOHÓRQUEZ, John Henry; GIL-HERRERA, Richard de Jesús. Proposal and validation of an industry 4.0 maturity model for SMEs. **Journal of Industrial Engineering and Management**, v. 15, n. 3, p. 433–454, 2022. Disponível em: <<http://www.jiem.org/index.php/jiem/article/view/3673>>. Acesso em: 21 jan. 2023.
- AZADI, Majid *et al.* Assessing the sustainability of cloud computing service providers for Industry 4.0: a state-of-the-art analytical approach. **International Journal of Production Research**, v. 61, n. 12, 2021. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.2021.1959666>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

BATEMAN, Robert E., *et al.* **Simulação de sistemas : aprimorando processos de logística, serviços e manufatura**. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2013. *E-book*. Disponível em: Acesso em: 23 fev. 2023.

BEISEKENOV, Ildar *et al.* Maturity Assessment of Industry 4.0 Implementation in Kazakhstan and Norwegian Oil and Gas Contexts. **Journal of Industrial Integration and Management**, v. 7, n.4, 2022. Disponível em: <<https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S2424862222500191>>. Acesso em: 20 jan. 2023.

BELTRAMI, Mirjam *et al.* Industry 4.0 and sustainability: Towards conceptualization and theory. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, p. 127733, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127733>>. Acesso em: 13 dez. 2022.

BHAT, Vinayambika S.; BHAT, Shreeranga; GIJO, E. v. Simulation-based lean six sigma for Industry 4.0: an action research in the process industry. **International Journal of Quality and Reliability Management**, v. 38, n. 5, p. 1215–1245, 2021. Disponível em: < <https://doi.org/10.1108/IJQRM-05-2020-0167> >. Acesso em: 12 fev. 2023.

BRAVI, Laura; MURMURA, Federica. Industry 4.0 enabling technologies as a tool for the development of a competitive strategy in Italian manufacturing companies. **Journal of Engineering and Technology Management**, v. 60, p. 101629, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0923474821000187>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

BRUNO, Fabio *et al.* An augmented reality tool to detect and annotate design variations in an Industry 4.0 approach. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 105, n. 1–4, p. 875–887, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-04254-4>. Acesso em: 11 fev. 2023.

CAIADO, Rodrigo Goyannes Gusmão *et al.* A fuzzy rule-based industry 4.0 maturity model for operations and supply chain management. **International Journal of Production Economics**, v. 231, p. 107883, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527320302401>>. Acesso em: 7 maio 2022.

CASTELO-BRANCO, Isabel *et al.* Measuring the fourth industrial revolution through the Industry 4.0 lens: The relevance of resources, capabilities and the value chain. **Computers in Industry**, v. 138, p. 103639, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361522000343>>. Acesso em: 16 jun. 2022.

CERUTI, Alessandro *et al.* Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 6, n. 4, p. 516–526, 2019. Disponível em: <https://academic.oup.com/jcde/article/6/4/516/5732347>. Acesso em: 11 fev. 2023.

CHAUHAN, Chetna; SINGH, Amol; LUTHRA, Sunil. Barriers to industry 4.0 adoption and its performance implications: An empirical investigation of emerging economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 285, p. 124809, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620348538>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. 4 ed. São Paulo: Elsevier Brasil, 2014. 320 p.

ÇINAR, Zeki Murat *et al.* A Framework for Industry 4.0 Readiness and Maturity of Smart Manufacturing Enterprises: A Case Study. **Sustainability**, v. 13, n. 12, p. 6659, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/12/6659/htm>. Acesso em: 22 jan. 2023.

COLLI, M. *et al.* A maturity assessment approach for conceiving context-specific roadmaps in the Industry 4.0 era. **Annual Reviews in Control**, v. 48, p. 165–177, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1367578819300409>>. Acesso em: 15 maio 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. (CNI). **A difusão das tecnologias da indústria 4.0 em empresas brasileiras**. Brasília: CNI, 2020b.  
CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. (CNI). **A importância da Indústria para o Brasil**. 2020a. Disponível em: <[https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/importancia-da-industria/#:~:text=A%20import%C3%A2ncia%20da%20Ind%C3%BAstria%20para%20o%20Brasil&text=A%20import%C3%A2ncia%20da%20ind%C3%BAstria%20tamb%C3%A9m,federais%20\(37%2C9%25\)](https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/importancia-da-industria/#:~:text=A%20import%C3%A2ncia%20da%20Ind%C3%BAstria%20para%20o%20Brasil&text=A%20import%C3%A2ncia%20da%20ind%C3%BAstria%20tamb%C3%A9m,federais%20(37%2C9%25))>. Acesso em: 6 jul. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. (CNI). **As invenções da 4ª revolução industrial: Uma análise dos dados de patentes no Brasil**. 2020c. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2020/1/invencoesda-4-revolucao-industrial-uma-analise-dos-dados-de-patentes-no-brasil/>. Acesso em 10 jan. 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. (CNI). **Desafios para a indústria 4.0 no Brasil**. Brasília: CNI, 2016.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. (CNI). Sondagem especial - Ano 21, n. 83 (Abril 2022) / Confederação Nacional da Indústria. – Brasília : CNI, 2022.

CORALLO, Angelo *et al.* Cybersecurity awareness in the context of the Industrial Internet of Things: A systematic literature review. **Computers in Industry**, v. 137, p. 103614, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361522000094>>. Acesso em: 9 jul. 2022.

CORTELETTI, Daniel; SCHREINER, Jaime Cristiano; FURLAN, Lori Luiz; FURLAN, Rodrigo Luis. **Método e dispositivo IOT de monitoramento remoto de bancos de bateria**. Depositante: SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL -

SENAI. (BR/RS) / SERRANA SISTEMAS DE ENERGIA EIRELI (BR/RS). Depósito: 30 jan. 2019. Disponível em: <https://busca.inpi.gov.br/pePI/servlet/PatenteServletController?Action=detail&CodPedido=1501126&SearchParameter=IND%DASTRIA%204.0%20%20%20%20%20%20%20&Resumo=&Titulo=>. Acesso em 12 fev. 2023.

COUTINHO, Robinson Galicia Ferreira. **CNC dedicado para máquinas de corte plasma, oxicorte, laser e router para Indústria 4.0**. Depositante: GALLIBRASIL. Depósito: 23 abr. 2018. Disponível em: <https://busca.inpi.gov.br/pePI/servlet/PatenteServletController?Action=detail&CodPedido=1474087&SearchParameter=IND%DASTRIA%204.0%20%20%20%20%20%20%20&Resumo=&Titulo=>. Acesso em 12 fev. 2023.

CUGNO, Monica; CASTAGNOLI, Rebecca; BÜCHI, Giacomo. Openness to Industry 4.0 and performance: The impact of barriers and incentives. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 168, p. 120756, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162521001888>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

CULOT, Giovanna *et al.* Addressing Industry 4.0 Cybersecurity Challenges. **IEEE Engineering Management Review**, v. 47, n. 3, p. 79–86, 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8758411>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

CUNHA JUNIOR, Luiz Arnaldo Pereira Da *et al.* **Indústria 4.0: Mapeamento das principais metodologias de aproximação entre o setor produtivo e as tecnologias 4.0**. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2022.

CUNHA, Luísa Margarida Antunes da. **Modelos Rasch e Escalas de Likert e Thurstone na medição de atitudes**. 2007. 78 f. Dissertação (Mestrado em em Probabilidades e Estatística) - Departamento de Estatística e Investigação Operacional, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2007.

DANESHMAND, Morteza *et al.* Industry 4.0 and prospects of circular economy: a survey of robotic assembly and disassembly. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 124, n. 9, p. 2973–3000, 2023. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-08389-1>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

DE BRUIN, Tonia; *et al.* Understanding the Main Phases of Developing a Maturity Assessment Model. **16th Australasian Conference on Information Systems**, 2005. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/27482282\\_Understanding\\_the\\_Main\\_Phases\\_of\\_Developing\\_a\\_Maturity\\_Assessment\\_Model](https://www.researchgate.net/publication/27482282_Understanding_the_Main_Phases_of_Developing_a_Maturity_Assessment_Model). Acesso em: 16 maio 2022.

DEVAGIRI, Jeevan S. *et al.* Augmented Reality and Artificial Intelligence in industry: Trends, tools, and future challenges. **Expert Systems with Applications**, v. 207, p. 118002, 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957417422012246>>. Acesso em: 8 jul. 2022.

DIEZ-OLIVAN, Alberto *et al.* Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0. **Information Fusion**, v. 50, p. 92–111, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1566253518304706>>. Acesso em: 7 maio 2022.

DIKHANBAYEVA, Dinara *et al.* sustainability Assessment of Industry 4.0 Maturity Models by Design Principles. **Sustainability**, v. 12, n. 23, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/23/9927>>. Acesso em: 8 maio 2022.

DOTTO, Fabio Romano Lofrano. **Sistema acústico-magnético portátil sem fio para o monitoramento de processos de fabricação em tempo real**. Depositante: FABIO ROMANO LOFRANO DOTTO. Depósito: 12 jul. 2019. Disponível em: <https://busca.inpi.gov.br/pePI/servlet/PatenteServletController?Action=detail&CodPedido=1516402&SearchParameter=IND%DASTRIA%204.0%20%20%20%20%20%20&Resumo=&Titulo=>. Acesso em: 12 fev. 2023.

ELHOONE, Hietam *et al.* Cyber-based design for additive manufacturing using artificial neural networks for Industry 4.0. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 9, p. 2841–2861, 2020. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/336286205\\_Cyber-based\\_design\\_for\\_additive\\_manufacturing\\_using\\_artificial\\_neural\\_networks\\_for\\_Industry\\_40](https://www.researchgate.net/publication/336286205_Cyber-based_design_for_additive_manufacturing_using_artificial_neural_networks_for_Industry_40)>. Acesso em: 11 fev. 2023.

ELHOSENY, Mohamed *et al.* A hybrid model of Internet of Things and cloud computing to manage big data in health services applications. **Future Generation Computer Systems**, v. 86, p. 1383–1394, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167739X17322021>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

ELSISI, Mahmoud *et al.* Deep learning-based industry 4.0 and internet of things towards effective energy management for smart buildings. **Sensors**, v. 21, n. 4, p. 1–19, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1038>>. Acesso em: 3 jul. 2022.

ESTENSORO, Miren *et al.* A resource-based view on SMEs regarding the transition to more sophisticated stages of industry 4.0. **European Management Journal**, v. 40, n. 5, p. 778-792, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263237321001444>>. Acesso em: 26 jun. 2022.

ETZKOWITZ, Henry; ZHOU, Chunyan. Hélice Tríplice: inovação e empreendedorismo universidade-indústria-governo. **Estudos Avançados**, v. 31, n. 90, p. 23–48, 2017. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ea/a/4gMzWdcjVXCMp5XyNbGYDMQ/>>. Acesso em: 17 ago. 2023.

FACCHINI, Francesco *et al.* A Maturity Model for Logistics 4.0: An Empirical Analysis and a Roadmap for Future Research, **Sustainability**, v. 12, n. 1, 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/1/86>>. Acesso em 17 jun. 2023

FERNANDEZ-CARAMES, Tiago M.; FRAGA-LAMAS, Paula. A Review on Human-Centered IoT-Connected Smart Labels for the Industry 4.0. **IEEE Access**, v. 6, p. 25939–25957, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8355491>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

FERREIRA, Duan Vilela. Modelo de maturidade da indústria 4.0 para avaliação de processos têxteis. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/43947>>. Acesso em: 24 jan. 2023.

FERREIRA, William de Paula; ARMELLINI, Fabiano; DE SANTA-EULALIA, Luis Antonio. Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 149, p. 106868, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835220305635>>. Acesso em: 9 jul. 2022.

FERREIRA, Fernando,; DURAES, Wellington,; MANZAN, Renato. **Arquitetura de Soluções IoT: Desenvolva Com Internet das Coisas para o Mundo Real**. Casa do Código, 2022. *E-book*. Disponível em: <[https://www.google.com.br/books/edition/Arquitetura\\_de\\_solu%C3%A7%C3%B5es\\_IoT/pHOVEAAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=Arquitetura+de+Solu%C3%A7%C3%B5es+IoT:+Desenvolva+Com+Internet+das+Coisas+para+o+Mundo+Real&printsec=frontcover](https://www.google.com.br/books/edition/Arquitetura_de_solu%C3%A7%C3%B5es_IoT/pHOVEAAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=Arquitetura+de+Solu%C3%A7%C3%B5es+IoT:+Desenvolva+Com+Internet+das+Coisas+para+o+Mundo+Real&printsec=frontcover)>. Acesso em: 19 fev. 2023.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (FIRJAN). **Industria 4.0 no Brasil : oportunidades, perspectivas e desafios**. Firjan SENAI, Finep. – Rio de Janeiro : [s.n], 2019.

FLORESCU, Adriana; BARABAS, Sorin Adrian. Modeling and Simulation of a Flexible Manufacturing System—A Basic Component of Industry 4.0. **Applied Sciences**, v. 10, n. 22, p. 8300, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/22/8300/htm>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

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. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527319300040>>. Acesso em: 16 jun. 2022.

FRASER, Peter; MOULTRIE, James; GREGORY, Mike. The use of maturity models I grids as a tool in assessing product development capability. **IEEE International Engineering Management Conference**, v.1, 2002, pp. 244-249. Disponível em: <10.1109/IEMC.2002.1038431>. Acesso em 2 de jul 2023.

GAJDZIK, Bożena. Frameworks of the Maturity Model for Industry 4.0 with Assessment of Maturity Levels on the Example of the Segment of Steel Enterprises in Poland. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, v.

8, n. 2, p. 77, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2199-8531/8/2/77/htm>>. Acesso em: 21 jan. 2023.

GHADIMI, Pezhman *et al.* The successful implementation of industry 4.0 in manufacturing: An analysis and prioritization of risks in Irish industry. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 175, p. 121394, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162521008258>>. Acesso em: 8 abr. 2022.

GHOBAKHLOO, Morteza; CHING, Ng Tan. Adoption of digital technologies of smart manufacturing in SMEs. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 16, p. 100107, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452414X19300020>>. Acesso em: 26 jun. 2022.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GIL, Antonio Carlos; REIS NETO, Aline Crespo. Survey de Experiência como Pesquisa Qualitativa Básica em Administração. **Revista de Ciências da Administração**, v. 22, n. 56, p. 125–137, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/adm/article/view/74026>. Acesso em: 28 jun. 2022.

GODINA, Radu *et al.* Impact Assessment of Additive Manufacturing on Sustainable Business Models in Industry 4.0 Context. **Sustainability**, v. 12, n. 17, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/17/7066>>. Acesso em: 30 jun. 2022.

GÖKALP, Ebru; MARTINEZ, Veronica. Digital transformation capability maturity model enabling the assessment of industrial manufacturers. **Computers in Industry**, v. 132, p. 103522, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361521001299>>. Acesso em: 12 jul. 2022.

GÜRDÜR, Didem; EL-KHOURY, Jad; TÖRNGREN, Martin. Digitalizing Swedish industry: What is next?: Data analytics readiness assessment of Swedish industry, according to survey results. **Computers in Industry**, v. 105, p. 153–163, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361518302987>>. Acesso em: 26 jun. 2022.

HAJOARY, Pinosh Kumar. Industry 4.0 Maturity and Readiness Models: A Systematic Literature Review and Future Framework. **International Journal of Innovation and Technology Management**, v. 17, n. 7, 2020. Disponível em: <10.1142/S0219877020300050>. Acesso em: 22 jan. 2023.

HERCEG, Iva Vuksanović *et al.* Challenges and driving forces for industry 4.0 implementation. **Sustainability**, v. 12, n. 10, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/10/4208>>. Acesso em: 16 maio 2022.

HONORATO, Cezar; DE MELO, Francisco Cristóvão Lourenço. Industry 4.0: The Case-Study of a Global Supply Chain Company. **Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems**, 2022. Disponível em: <[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-90700-6\\_55](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-90700-6_55)>. Acesso em: 21 jan. 2023.

HORVÁTH, Dóra; SZABÓ, Roland Zs. Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities?. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 146, p. 119–132, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162518315737>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

HUANG, Sihan *et al.* Industry 5.0 and Society 5.0—Comparison, complementation and co-evolution. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 64, p. 424–428, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612522001224>>. Acesso em: 9 jan. 2023.

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. IFES. **Institucional**. 2023a. Disponível em: <https://ifes.edu.br/o-ifes?showall=1>. Acesso em: 7 set. 2023.

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. IFES. **Institucional**. 2023b. Disponível em: <https://polo.ifes.edu.br/institucional>. Acesso em: 7 set. 2023.

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. IFES. **Cidade da Inovação**. 2023c. Disponível em: <https://ifes.edu.br/cidade-da-inovacao>. Acesso em: 7 set. 2023.

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. IFES. **Nivix**. 2017. Disponível em: <<https://vitoria.ifes.edu.br/incubadora?showall=1>>. Acesso em: 7 set. 2023.

JABBOUR, Ana Beatriz Lopes de Souza *et al.* When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 132, p. 18–25, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162517314877>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

JAFARI, Niloofar; AZARIAN, Mohammad; YU, Hao. Moving from Industry 4.0 to Industry 5.0: What Are the Implications for Smart Logistics?. **Logistics**, v. 6, n. 2, p. 26, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2305-6290/6/2/26/htm>>. Acesso em: 9 jan. 2023.

JANMAIJAYA, Manvendra *et al.* Industry 4.0: Latent Dirichlet Allocation and clustering based theme identification of bibliography. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 103, p. 104280, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197621001275>>. Acesso em: 5 jun. 2022.

JAVOID, Mohd *et al.* Substantial capabilities of robotics in enhancing industry 4.0 implementation. **Cognitive Robotics**, v. 1, p. 58–75, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667241321000057>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

JAYASHREE, Sreenivasan *et al.* Testing an adoption model for Industry 4.0 and sustainability: A Malaysian scenario. **Sustainable Production and Consumption**, v. 31, p. 313–330, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550922000495>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

JERMAN, Andrej; ERENDA, Ivan; BERTONCELJ, Andrej. The Influence of Critical Factors on Business Model at a Smart Factory: A Case Study. **Business Systems Research**, v. 10, n. 1, p. 42–52, 2019. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/332987868\\_The\\_Influence\\_of\\_Critical\\_Factors\\_on\\_Business\\_Model\\_at\\_a\\_Smart\\_Factory\\_A\\_Case\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/332987868_The_Influence_of_Critical_Factors_on_Business_Model_at_a_Smart_Factory_A_Case_Study)>. Acesso em: 13 fev. 2023.

JIN, Guang; MA, Shuai; LI, Zhenghui. Dynamic Simulation Modeling of Industrial Robot Kinematics in Industry 4.0. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, v. 2022, 2022. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/ddns/2022/3217360/>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

KALSOOM, Tahera *et al.* Impact of IoT on Manufacturing Industry 4.0: A New Triangular Systematic Review. **Sustainability**, v. 13, n. 22, p. 12506, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/22/12506/htm>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

KAMBLE, Sachin S.; GUNASEKARAN, Angappa; SHARMA, Rohit. Analysis of the driving and dependence power of barriers to adopt industry 4.0 in Indian manufacturing industry. **Computers in Industry**, v. 101, p. 107–119, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361518301453>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

KELLEHER, John D. **Deep Learning**. Massachusetts: The MIT Press, 2019. *E-book*. Disponível em: <<https://mitpress.mit.edu/9780262537551/deep-learning/>>. Acesso em: 23 fev. 2023.

KHIN, Sabai; KEE, Daisy Mui Hung. Factors influencing Industry 4.0 adoption. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 33, n. 3, p. 448–467, 2022. Disponível em: <<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JMTM-03-2021-0111/full/html>>. Acesso em: 13 fev. 2023.

KUMAR, Saurabh; BHATIA, Manjot Singh. Environmental dynamism, industry 4.0 and performance: Mediating role of organizational and technological factors. **Industrial Marketing Management**, v. 95, p. 54–64, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0019850121000730>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

KUMAR, Ravinder; SINGH, Rajesh Kr; DWIVEDI, Yogesh Kr. Application of industry 4.0 technologies in SMEs for ethical and sustainable operations: Analysis of challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, p. 124063, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620341081>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

KUMAR, Pravin; SINGH, Rajesh Kr; KUMAR, Vikas. Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, p. 105215, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344920305322>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

LEE, Changhun; LIM, Chiehyeon. From technological development to social advance: A review of Industry 4.0 through machine learning. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 167, p. 120653, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162521000858>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

LEZZI, Marianna; LAZOI, Mariangela; CORALLO, Angelo. Cybersecurity for Industry 4.0 in the current literature: A reference framework. **Computers in Industry**, v. 103, p. 97–110, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361518303658>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

LIBERATO, Tatiane Furukawa. Divulgação científica e tecnológica: a propriedade intelectual das universidades e seus aspectos comunicacionais. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 14, n. 33, p. 52–67, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/7340>>. Acesso em: 17 ago. 2023.

LICHTBLAU, K. *et al.* IMPULS - Industrie 4.0- Readiness. Impuls-Stiftung des VDMA, Aachen-Köln. 2015. Disponível em: <<https://www.industrie40-readiness.de/>>. Acesso em 12 jan 2023.

LIEBRECHT, Christoph *et al.* Decision support for the implementation of Industry 4.0 methods: Toolbox, Assessment and Implementation Sequences for Industry 4.0. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 58, p. 412–430, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612520302223>>. Acesso em: 16 jun. 2022.

MADDIKUNTA, Praveen Kumar Reddy *et al.* Industry 5.0: A survey on enabling technologies and potential applications. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 26, p. 100257, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452414X21000558>>. Acesso em: 9 jan. 2023.

MAJUMDAR, Abhijit; GARG, Himanshu; JAIN, Rohan. Managing the barriers of Industry 4.0 adoption and implementation in textile and clothing industry: Interpretive structural model and triple helix framework. **Computers in Industry**, v. 125, p. 103372, 2021. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361520306060>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

MANAVALAN, E.; JAYAKRISHNA, K. A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. **Computers & Industrial Engineering**, v. 127, p. 925–953, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835218305709>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MARINO, Emanuele *et al.* An Augmented Reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments. **Computers in Industry**, v. 127, p. 103412, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361521000191>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

MASOOD, Tariq; EGGER, Johannes. Augmented reality in support of Industry 4.0—Implementation challenges and success factors. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 58, p. 181–195, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584518304101>>. Acesso em: 7 jul. 2022.

MASOOD, Tariq; SONNTAG, Paul. Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. **Computers in Industry**, v. 121, p. 103261, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361520304954>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

MATOS, Dina Vieira *et al.* Análise patentária: uma avaliação sobre as instituições científicas, tecnológicas e de inovação do estado de Sergipe. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 15, n. 37, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/7922>>. Acesso em: 17 ago. 2023.

MIKOSZ, Vinícius Machado; LIMA, Isaura Alberton de. A relação universidade-empresa-governo: mecanismos de cooperação e seus fatores intervenientes em uma universidade pública. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 14, n. 34, p. 215–239, 2018. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/7148>>. Acesso em: 17 ago. 2023.

MOHAMED, Ramuna Binti; HASSAN, Che Rosmani Bin Che; HAMID, Mahar Diana. Developing a risk-based inspection practices maturity model for Malaysian industries. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 56, p. 217–230, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095042301830233X>>. Acesso em: 13 jun. 2022.

MONTE, Lucas Gonçalves. **Escala Likert difusa : um estudo sobre diferentes abordagens**. 2020. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) –

Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Matemática Industrial, Fortaleza, 2020.

MURAT ÇINAR, Zeki *et al.* A Framework for Industry 4.0 Readiness and Maturity of Smart Manufacturing Enterprises: A Case Study. **Sustainability**, v. 13, n. 12, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su13126659>>. Acesso em 2 ago. 2022.

NAGY, Judit *et al.* The Role and Impact of Industry 4.0 and the Internet of Things on the Business Strategy of the Value Chain-The Case of Hungary. **Sustainability**, v. 10, p. 3491, 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/10/10/3491>>. Acesso em 3 jun 2022.

NAHAVANDI, Saeid. Industry 5.0—A Human-Centric Solution. **Sustainability**, v. 11, n. 16, p. 4371, 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/11/16/4371/htm>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

NAYERI, Sina; SAZVAR, Zeinab; HEYDARI, Jafar. Towards a responsive supply chain based on the industry 5.0 dimensions: A novel decision-making method. **Expert Systems with Applications**, v. 213, p. 119267, 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417422022850>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

OLIVEIRA JÚNIOR, Libório de. **Modelo de maturidade para a indústria 4.0 para PME's brasileiras: um estudo de caso em uma indústria de ração animal**. 2018. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2018.

OOI, Keng Boon *et al.* Cloud computing in manufacturing: The next industrial revolution in Malaysia?. **Expert Systems with Applications**, v. 93, p. 376–394, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417417306838>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/91863-agenda-2030-para-o-desenvolvimento-sustent%C3%A1vel>>. Acesso em 12 jan 2023.

OZKAN-OZEN, Yesim Deniz; KAZANCOGLU, Yigit; KUMAR MANGLA, Sachin. SYNCHRONIZED BARRIERS FOR CIRCULAR SUPPLY CHAINS IN INDUSTRY 3.5/INDUSTRY 4.0 TRANSITION FOR SUSTAINABLE RESOURCE MANAGEMENT. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, p. 104986, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344920303037>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

PARHI, Shreyanshu *et al.* Factors affecting Industry 4.0 adoption – A hybrid SEM-ANN approach. **Computers & Industrial Engineering**, [s. l.], v. 168, p. 108062, 2022a. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835222001322>>. Acesso em: 10 jul. 2022.

PARMAR, Hetal *et al.* Advanced robotics and additive manufacturing of composites: towards a new era in Industry 4.0. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 37, n. 5, p. 483–517, 2021. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426914.2020.1866195>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

PATEL, Pankesh; ALI, Muhammad Intizar; SHETH, Amit. From Raw Data to Smart Manufacturing: AI and Semantic Web of Things for Industry 4.0. **IEEE Intelligent Systems**, v. 33, n. 04, p. 79–86, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8497012>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

PECH, Martin; VRCHOTA, Jaroslav. Classification of small-and medium-sized enterprises based on the level of industry 4.0 implementation. **Applied Sciences**, v. 10, n. 15, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/15/5150>>. Acesso em: 14 maio 2022.

PEDONE, G.; MEZGÁR, I. Model similarity evidence and interoperability affinity in cloud-ready Industry 4.0 technologies. **Computers in Industry**, [s. l.], v. 100, p. 278–286, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361518300800>>. Acesso em: 3 jul. 2022.

PIROLA, Fabiana; CIMINI, Chiara; PINTO, Roberto. Digital readiness assessment of Italian SMEs: a case-study research. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 31, n. 5, p. 1045–1083, 2020. Disponível em: <<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JMTM-09-2018-0305/full/html>>. Acesso em: 22 jan. 2023.

POMPEU, A. M.; OLIVEIRA, A. N. de C. Conceitos da indústria 4.0 e seus principais desafios de implantação nas empresas contemporâneas. **Multitemas**, v. 26, n. 64, p. 5–28, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.20435/multi.v26i64.3355>>. Acesso em 12 jul. 2023.

RAFAEL, Lizarralde Dorronsoro *et al.* An Industry 4.0 maturity model for machine tool companies. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 159, p. 120203, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162520310295>>. Acesso em: 17 jun. 2022.

RAJ, Alok *et al.* Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. **International Journal of Production Economics**, v. 224, p. 107546, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092552731930372X>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

REIMAN, Arto *et al.* Human factors and ergonomics in manufacturing in the industry 4.0 context – A scoping review. **Technology in Society**, v. 65, p. 101572, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X21000476>>. Acesso em: 26 jun. 2022.

REINHARDT, Ingrid Carla; OLIVEIRA, Dr Jorge C.; RING, Dr Denis T. Current Perspectives on the Development of Industry 4.0 in the Pharmaceutical Sector. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 18, p. 100131, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452414X20300066>>. Acesso em: 9 jan. 2023.

SAHAL, Radhya; BRESLIN, John G.; ALI, Muhammad Intizar. Big data and stream processing platforms for Industry 4.0 requirements mapping for a predictive maintenance use case. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 54, p. 138–151, 2020a. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612519300937>>. Acesso em: 5 jun. 2022.

SANTOS, Maribel Yasmina *et al.* A Big Data system supporting Bosch Braga Industry 4.0 strategy. **International Journal of Information Management**, v. 37, n. 6, p. 750–760, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268401217306023>>. Acesso em: 5 jun. 2022.

SANTOS, Reginaldo Carreiro. **Proposta de modelo de avaliação de maturidade da indústria 4.0**. 2018. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2018. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.26/25346>>. Acesso em 12 jan. 2023.

SANTOS, Reginaldo Carreiro; MARTINHO, José Luís. An Industry 4.0 maturity model proposal. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 31, n. 5, p. 1023–1043, 2020. Disponível em: <<https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JMTM-09-2018-0284/full/html>>. Acesso em: 7 maio 2022.

SAWIK, Tadeusz. A linear model for optimal cybersecurity investment in Industry 4.0 supply chains. **International Journal of Production Research**, v. 60, n. 4, p. 1368–1385, 2020. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.2020.1856442>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

SCHMALSTIEG, Dieter; HOELLERER, Tobias. **Augmented reality : principles and practice**. Boston: Pearson Education, 2016. *E-book*. Disponível em: <[https://librarysearch.gold.ac.uk/primo-explore/fulldisplay?docid=44GOL\\_ALEPH000480824&context=L&vid=44GOL\\_VU1&lang=en\\_US&search\\_scope=Physical&adaptor=Local Search Engine&tab=default\\_tab&query=any,contains,augmented reality&offset=0%0Ahttps://sslgate.uni->](https://librarysearch.gold.ac.uk/primo-explore/fulldisplay?docid=44GOL_ALEPH000480824&context=L&vid=44GOL_VU1&lang=en_US&search_scope=Physical&adaptor=Local Search Engine&tab=default_tab&query=any,contains,augmented reality&offset=0%0Ahttps://sslgate.uni->)>. Acesso em: 23 fev. 2023.

SCHUH, G *et al.* **Industrie 4.0 maturity index managing the digital transformation of companies (acatech STUDY)**. Munich: Herbert Utz Verlag, 2017.

SENNA, Pedro P. *et al.* Prioritizing barriers for the adoption of Industry 4.0 technologies. **Computers & Industrial Engineering**, v. 171, p. 108428, 2022.

Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360835222004661>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

SEPASGOZAR, Samad M.E. *et al.* Additive Manufacturing Applications for Industry 4.0: A Systematic Critical Review. **Buildings**, v. 10, n. 12, p. 231, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2075-5309/10/12/231/htm>>. Acesso em: 11 fev. 2023.

SHARMA, Arun Kumar *et al.* A study of trends and industrial prospects of Industry 4.0. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. 2364–2369, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785321032417>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

SHÖDIN, David R. *et al.* Smart Factory Implementation and Process Innovation. **Research-Technology Management**, v. 61, n. 5, p. 22–31, 2018. Disponível em: <<https://www-tandfonline.ez120.periodicos.capes.gov.br/doi/abs/10.1080/08956308.2018.1471277>>. Acesso em: 24 jan. 2023.

SONY, Michael *et al.* An empirical examination of benefits, challenges, and critical success factors of industry 4.0 in manufacturing and service sector. **Technology in Society**, v. 67, p. 101754, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160791X21002293>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

SOOD, Sandeep Kumar; RAWAT, Keshav Singh; KUMAR, Dheeraj. A visual review of artificial intelligence and Industry 4.0 in healthcare. **Computers and Electrical Engineering**, v. 101, p. 107948, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790622002269>>. Acesso em: 12 fev. 2023.

SUKMONO, Filosa Gita; JUNAEDI, Fajar. Towards industry 5.0 in disaster mitigation in Lombok island, Indonesia. **Jurnal Studi Komunikasi**, v. 4, n. 3, p. 553–564, 2020. Disponível em: <<https://ejournal.unitomo.ac.id/index.php/jsk/article/view/2424>>. Acesso em: 9 jan. 2023.

TAULLI, Tom. **Introdução à Inteligência Artificial: Uma abordagem não técnica**. São Paulo: Novatec, 2020. *E-book*. Disponível em: <[https://www.google.com.br/books/edition/Introdu%C3%A7%C3%A3o\\_%C3%A0\\_Intelig%C3%A2ncia\\_Artificial/ON3FDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=0](https://www.google.com.br/books/edition/Introdu%C3%A7%C3%A3o_%C3%A0_Intelig%C3%A2ncia_Artificial/ON3FDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=0)>. Acesso em: 23 fev. 2023.

TAY, S. I.; ALIPAL, J.; LEE, T. C. Industry 4.0: Current practice and challenges in Malaysian manufacturing firms. **Technology in Society**, v. 67, p. 101749, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0160791X21002244>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

THOBEN, Klaus Dieter; WIESNER, Stefan Alexander; WUEST, Thorsten. “Industrie 4.0” and smart manufacturing—a review of research issues and application examples.

**International Journal of Automation Technology**, v. 11, n. 1, p. 4–16, 2017. Disponível em: <[10.20965/ijat.2017.p0004](https://doi.org/10.20965/ijat.2017.p0004)>. Acesso em: 14 maio 2022.

ÜNAL, Cihan; SUNGUR, Cemil; YILDIRIM, Hakan. Application of the Maturity Model in Industrial Corporations. **Sustainability**, v. 14, n. 15, p. 9478, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/14/15/9478/htm>>. Acesso em: 21 jan. 2023.

VARELLA, Walter Augusto. **Implementação e migração para computação em nuvem**. São Paulo: SENAC, 2019. *E-book*. Disponível em: <[https://www.google.com.br/books/edition/Implementa%C3%A7%C3%A3o\\_e\\_migra%C3%A7%C3%A3o\\_para\\_comput/YhmsDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=0&kptab=overview](https://www.google.com.br/books/edition/Implementa%C3%A7%C3%A3o_e_migra%C3%A7%C3%A3o_para_comput/YhmsDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=0&kptab=overview)>. Acesso em: 19 fev. 2023.

VERAS, Manoel. **Cloud Computing: nova Arquitetura da TI**. Rio de Janeiro: Brasport, 2012. *E-book*. Disponível em: <[https://www.google.com.br/books/edition/Cloud\\_Computing\\_nova\\_Arquitetura\\_da\\_TI/yiggoX2aoC8C?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=cloud+computing&printsec=frontcover](https://www.google.com.br/books/edition/Cloud_Computing_nova_Arquitetura_da_TI/yiggoX2aoC8C?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=cloud+computing&printsec=frontcover)>. Acesso em: 20 fev. 2023.

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva : tecnologias e aplicações da impressão 3D**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2017. *E-book*. Disponível em: <[https://www.google.com.br/books/edition/Manufatura\\_aditiva/ni9dDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=Manufatura+aditiva+:+tecnologias+e+aplicac%CC%A7o%CC%83e+s+da+impress%C3%A3o+3D&printsec=frontcover](https://www.google.com.br/books/edition/Manufatura_aditiva/ni9dDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&dq=Manufatura+aditiva+:+tecnologias+e+aplicac%CC%A7o%CC%83e+s+da+impress%C3%A3o+3D&printsec=frontcover)>. Acesso em: 20 fev. 2023.

WAGIRE, Aniruddha Anil *et al.* Development of maturity model for assessing the implementation of Industry 4.0: learning from theory and practice. **Production Planning & Control**, v. 32, n. 8, p. 603–622, 2020. Disponível em: <<https://www.tandfonline.ez120.periodicos.capes.gov.br/doi/abs/10.1080/09537287.2020.1744763>>. Acesso em: 22 jan. 2023.

WANKHEDE, Vishal Ashok; VINODH, S. Analysis of Industry 4.0 challenges using best worst method: A case study. **Computers & Industrial Engineering**, v. 159, p. 107487, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835221003910>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

WEKING, Jörg *et al.* Leveraging industry 4.0 – A business model pattern framework. **International Journal of Production Economics**, v. 225, p. 107588, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092552731930427X>>. Acesso em: 8 abr. 2022.

XU, Xun *et al.* Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 61, p. 530–535, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612521002119>>. Acesso em: 9 jan. 2023.

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. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207543.2018.1444806>>. Acesso em: 14 maio 2022.

YAN, Jihong *et al.* Industrial Big Data in an Industry 4.0 Environment: Challenges, Schemes, and Applications for Predictive Maintenance. **IEEE Access**, v. 5, 2017a. Disponível em: <[http://www.ieee.org/publications\\_standards/publications/rights/index.html](http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html)>.

YILMAZ, Aysegul *et al.* Lean and industry 4.0: Mapping determinants and barriers from a social, environmental, and operational perspective. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 175, p. 121320, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040162521007514>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

YU, Fei; SCHWEISFURTH, Tim. Industry 4.0 technology implementation in SMEs – A survey in the Danish-German border region. **International Journal of Innovation Studies**, v. 4, n. 3, p. 76–84, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096248720300229>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

ZIZEK, Simona; NEDELKO, Zlatko; MULEJ, Matjaz; ČIČ, Živa Veingerl. Key Performance Indicators and Industry 4.0 – A Socially Responsible Perspective. **Naše gospodarstvo/Our economy**, v. 66, n. 3, p. 22-35, 2020. Disponível em: <[10.2478/ngoe-2020-0015](https://doi.org/10.2478/ngoe-2020-0015)>. Acesso em: 7 ago. 2022.

ZOUBEK, Michal *et al.* Industry 4.0 Maturity Model Assessing Environmental Attributes of Manufacturing Company. **Applied Sciences**, v. 11, n. 11, p. 5151, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/11/5151/htm>>. Acesso em: 22 jan. 2023.

## APÊNDICE A - Questionário

### **Pesquisa de Maturidade da Indústria 4.0**

O senhor(a) está sendo convidado(a) para participar da pesquisa “Avaliação da maturidade da Indústria 4.0 em empresas do Espírito Santo” sob a responsabilidade do Prof. Dr. Mário Mestria e da mestranda Raianny Souza Fernandes. Este convite se deve ao fato de que o senhor(a) faz parte de uma empresa que utiliza tecnologias da Indústria 4.0 e pode contribuir para melhorar o grau de entendimento sobre a maturidade das empresas na adoção destas tecnologias. É importante ressaltar que as respostas pessoais do respondente serão resguardadas e mantidas em sigilo.

E-mail:

Nome:

Cargo:

Empresa:

### **ESTRATÉGIA, CULTURA E INOVAÇÃO 4.0**

1. A empresa tem alguma estratégia/plano para implementar as tecnologias da indústria 4.0.

- a) Sim
- b) Sim, parcialmente
- c) Não

2. A Indústria 4.0 faz parte da estratégia de negócios da empresa.

- a) Sim
- b) Sim, parcialmente
- c) Não

3. A empresa investe nas tecnologias da Indústria 4.0.

- a) Sim
- b) Sim, parcialmente
- c) Não

4. A empresa promove a inovação na sua estratégia para geração de valor.

- a) Sim
- b) Sim, parcialmente
- c) Não

5. A empresa possui KPIs voltados ao acompanhamento das tecnologias da Indústria 4.0 nos seus processos produtivos.

- a) Sim
- b) Sim, parcialmente
- c) Não

**EQUIPE DE TRABALHO**

6. A equipe de trabalho recebeu treinamento para as mudanças geradas pela Indústria 4.0 na sua empresa.

- a) Sim
- b) Sim, parcialmente
- c) Não

7. A equipe de trabalho tem conhecimentos e habilidades para implementar as tecnologias da Indústria 4.0.

- a) Sim
- b) Sim, parcialmente
- c) Não

8. A equipe de trabalho tem autonomia e criatividade para trabalhar com a Indústria 4.0.

- a) Sim
- b) Sim, parcialmente
- c) Não

9. A equipe de trabalho tem abertura para sugerir mudanças no processo produtivo para estimular a inovação.

- a) Sim
- b) Sim, parcialmente
- c) Não

**TECNOLOGIA 4.0**

10. A empresa dispõe de infraestrutura para implementar as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0?

- Equipamentos
- Maquinário
- Recursos físicos
- Recursos Digitais

11. A empresa utiliza dados para realizar alterações em tempo real.

- a) Sim
- b) Sim, parcialmente
- c) Não

12. A empresa tem foco na segurança dos dados obtidos em seu processo produtivo.

- a) Sim
- b) Sim, parcialmente
- c) Não

13. A empresa personaliza os produtos conforme as necessidades dos clientes.

- a) Sim
- b) Sim, parcialmente
- c) Não

14. A empresa implementa as tecnologias:

- Big Data
- Manufatura Aditiva
- Realidade Aumentada
- Realidade Virtual
- Digital Twin
- Robôs autônomos
- Computação em Nuvem
- Inteligência Artificial
- Internet das Coisas
- Sistemas Ciberfísicos
- Simulação
- Sistemas de Apoio à Decisão
- Sensores e Atuadores
- Integração de Sistemas