

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ANÁLISE DA ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 POR
PEQUENAS E MÉDIAS EMPRESAS DO SETOR DE USINAGEM**

Antonio Arnaldo Baio Junior

SÃO CARLOS

2022

**ANÁLISE DA ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 POR
PEQUENAS E MÉDIAS EMPRESAS DO SETOR DE USINAGEM**

Antonio Arnaldo Baio Junior

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos como um dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo José Carrer

SÃO CARLOS

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Antonio Arnaldo Baio Junior, realizada em 07/06/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Marcelo José Carrer (UFSCar)

Profa. Dra. Fabiane Leticia Lizarelli (UFSCar)

Prof. Dr. Hildo Meirelles de Souza Filho (UFSCar)

Prof. Dr. Kleber Francisco Esposto (USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Arnaldo e Izilda, por tudo o que sempre fizeram por mim, e a quem devo tudo o que sou. Agradeço à minha companheira Flávia, por estar comigo em todos os momentos, com seu amor, carinho e apoio.

Agradeço ao meu orientador, o Professor Doutor Marcelo José Carrer, por toda sua dedicação e paciência, e por todo conhecimento que compartilhou comigo, durante a elaboração desse trabalho.

Agradeço a todos os professores do curso, e ao pessoal do administrativo, Robson e Lucas, pela presteza com a qual sempre me atenderam durante a realização do Mestrado.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo TOE aplicado às decisões de adoção das tecnologias da Indústria 4.0.....	44
Figura 2. Barreiras à adoção das tecnologias.....	46
Figura 3. Municípios de localização das empresas da amostra.....	63
Figura 4. Segmento principal de atuação das empresas da amostra.....	64
Figura 5. Número de funcionários das empresas da amostra.....	65
Figura 6. Tempo de operação no mercado das empresas da amostra.....	65
Figura 7. Percepção do respondente em relação ao nível de qualificação da mão de obra na empresa: 1 – muito baixo a 5 – muito alto.....	66
Figura 8. Funcionários Especializados em Tecnologias da Informação e Comunicação na estrutura organizacional interna das empresas da amostra.....	66
Figura 9. Utilização de Serviços de Consultoria e/ou Assessoria em Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC).....	67
Figura 10. Utilização de Serviços de Consultoria e/ou Assessoria em Gestão.....	67
Figura 11. Adoção de Sistemas em Computador para Organização das Atividades Administrativas, Operacionais e Financeiras da Empresa.....	68
Figura 12. Adoção de ERP e/ou MRP.....	68
Figura 13. Adoção de Sistemas MES (Manufacturing Execution Systems).....	69
Figura 14. Número de Máquinas com Comando Numérico Computadorizado (CNC).....	69
Figura 15. Busca Frequente de Informações pela Alta Gerência da Empresa.....	70
Figura 16. Incentivo aos funcionários da empresa para acesso e compartilhamento de informações sobre novas tecnologias de produção e gestão.....	70
Figura 17. Frequência com que a empresa testa novas tecnologias e práticas organizacionais.....	71
Figura 18. Disponibilidade de Internet com alta velocidade na empresa.....	71
Figura 19. Participação em programas de cooperação com Universidades, Institutos de Ciência e Tecnologia ou Agências de Fomento.....	72
Figura 20. Acesso ao crédito em instituições financeiras.....	72
Figura 21. Adoção das tecnologias da Indústria 4.0 pelas firmas da amostra.....	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Tecnologias da Indústria 4.0.....	34
Quadro 2. Principais barreiras à adoção de tecnologias da Indústria 4.0.....	54
Quadro 3. Barreiras à adoção de tecnologias da Indústria 4.0: índices de percepção das empresas da amostra.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variáveis utilizadas para a comparação das empresas adotantes e não adotantes de tecnologias da Indústria 4.0.....	58
Tabela 2. Comparação das empresas que adotam e não adotam tecnologias da Indústria 4.0.....	75
Tabela 3. Fatores determinantes da intensidade no uso de tecnologias da Indústria 4.0 pelas empresas da amostra.....	78

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS	17
1.2. JUSTIFICATIVAS	18
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
2. REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1. TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0	21
2.1.1. Manufacturing Execution System (MES).....	23
2.1.2. Big Data	24
2.1.3. Simulação	26
2.1.4. Integração de sistemas vertical e horizontal	27
2.1.5. Internet das Coisas Industrial.....	28
2.1.6. Computação em nuvem	29
2.1.7. Manufatura aditiva.....	30
2.1.8. Robôs autônomos.....	31
2.1.9. Realidade Aumentada.....	32
2.1.10. Cibersegurança	33
2.2. ADOÇÃO E DIFUSÃO DE INOVAÇÕES.....	38
2.3. BARREIRAS À ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0	44
2.3.1 Barreiras Econômicas	47
2.3.1.1 <i>Altos investimentos para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0</i>	47
2.3.1.2 <i>Falta de clareza em relação a benefícios econômicos e ganhos de produtividade</i>	47

2.3.2. Barreiras Operacionais.....	48
2.3.2.1 <i>Desafios na integração vertical e horizontal</i>	48
2.3.2.2 <i>Risco de falhas de cibersegurança</i>	48
2.3.2.3 <i>Baixo nível de maturidade de uma tecnologia</i>	49
2.3.2.4 <i>Desafios na garantia da qualidade dos dados</i>	49
2.3.3. Barreiras Culturais	50
2.3.3.1 <i>Falta de conhecimento sobre as tecnologias</i>	50
2.3.3.2 <i>Falta de cultura digital interna e treinamento</i>	50
2.3.3.3 <i>Resistência à mudança</i>	51
2.3.3.4 <i>Falta de uma estratégia digital</i>	51
2.3.4. Barreiras Institucionais	51
2.3.4.1 <i>Falta de padrões regulatórios e normas institucionalizadas</i>	51
2.3.4.2 <i>Ameaça de interrupção dos empregos existentes</i>	52
2.3.4.3 <i>Escassez de capital humano com habilidades digitais</i>	53
2.3.4.4 <i>Falta de infraestrutura</i>	53
3. METODOLOGIA	56
3.1. Pesquisa de Campo	56
3.2. Análise dos dados	58
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS EMPÍRICOS.....	63
4.1. CARACTERÍSTICAS DAS EMPRESAS DA AMOSTRA	63
4.2. ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS 4.0 PELAS EMPRESAS DA AMOSTRA.....	73
4.3. BARREIRAS À ADOÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 NA PERCEPÇÃO DAS EMPRESAS DA AMOSTRA.....	80
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
REFERÊNCIAS	85

ANEXO A. Questionário aplicado na pesquisa de campo..... 104

RESUMO

Novas tecnologias de informação e comunicação, tais como internet das coisas, sensores sem fio em rede, internet móvel, big data, computação em nuvem, sistemas embarcados, manufatura aditiva e robôs autônomos têm sido adotadas por empresas de diferentes setores de atividade econômica. Esse movimento é tratado na literatura como uma quarta revolução tecnológica, também conhecida como “Indústria 4.0”. Em que pese os potenciais benefícios econômicos, sociais e ambientais das tecnologias da Indústria 4.0, o nível de adoção por empresas brasileiras de pequeno e médio porte ainda parece ser baixo. Este trabalho teve os objetivos de analisar o nível de adoção e comparar características de adotantes e não adotantes de tecnologias da Indústria 4.0. Dados primários do ano de 2021 foram coletados por meio de um questionário estruturado aplicado em uma amostra de 30 pequenas e médias empresas do setor metalúrgico, que operam com processos de usinagem, no estado de São Paulo. Os dados foram analisados por meio de medidas de estatística descritiva, testes estatísticos de comparação de médias/frequências e um modelo econométrico de regressão. As tecnologias 4.0 adotadas pelas empresas da amostra foram: Computação em Nuvem (10 empresas), Sistemas de Integração Horizontal e Vertical (5 empresas), Big Data (4 empresas) e Internet das Coisas Industrial (4 empresas). A análise comparativa entre as características das empresas adotantes e não adotantes mostrou que: (1) as adotantes possuem, com frequência muito maior, funcionários com competências em TICs e também contratam mais frequentemente serviços de consultoria em TICs; (2) o uso de sistemas de ERP e MRP é muito maior entre as empresas adotantes de tecnologias da Indústria 4.0; (3) as empresas adotantes participam com mais frequência de programas de cooperação com Universidades, Institutos de Ciência e Tecnologia ou Agências de Fomento à Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico; (4) as empresas que adotam tecnologias 4.0 possuem maior percepção de vantagem relativa e compatibilidade dessas tecnologias. Os resultados do modelo econométrico estimado corroboram a importância da disponibilidade de mão de obra qualificada em TICs, da adoção prévia de outras tecnologias gerenciais e da percepção de compatibilidade das tecnologias 4.0 para determinar a utilização destas tecnologias pelas empresas da amostra. Os resultados do estudo são consistentes com a revisão da literatura empírica e com o modelo teórico TOE.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Tecnologias de Informação e Comunicação; Pequenas Empresas; Adoção de Tecnologias.

ABSTRACT

New information and communication technologies (ICTs), such as internet of things, wireless network sensors, mobile internet, big data, cloud computing, embedded systems, additive manufacturing and autonomous robots have been adopted by companies from different industries. This movement is treated in the literature as a fourth technological revolution, also known as “Industry 4.0”. Despite the economic, social and environmental potential benefits of Industry 4.0 technologies, the level of adoption by small and medium-sized Brazilian companies still appears to be low. This work aimed to analyze the level of adoption and compare characteristics of adopters and non-adopters of Industry 4.0 technologies. Primary data for the year 2021 were collected through a structured questionnaire applied to a sample of 30 small and medium-sized companies in the metallurgical sector, which operate with machining processes, in the state of São Paulo. Data were analyzed using descriptive statistics measures, statistical tests to compare means/frequency and an econometric regression model. The 4.0 technologies adopted by the sample companies were: Cloud Computing (10 companies), Horizontal and Vertical Integration Systems (5 companies), Big Data (4 companies) and Industrial Internet of Things (4 companies). The comparative analysis between the characteristics of adopters and non-adopters showed that: (1) adopters have, much more frequently, employees with ICT skills and also more frequently hire ICT consulting services; (2) the use of ERP and MRP systems is much higher among companies adopting Industry 4.0 technologies; (3) adopters participate more frequently in cooperation programs with Universities, Science and Technology Institutes or Technological Research and Development Promotion Agencies; (4) companies that adopt 4.0 technologies have a greater perception of relative advantage and compatibility of these technologies. The results of the estimated econometric model corroborate the importance of the availability of skilled labor in ICTs, the prior adoption of other management technologies and the perception of compatibility of 4.0 technologies to determine the intensity in use of these technologies by the companies in the sample. The study results are consistent with the empirical literature review and with the theoretical TOE model.

Keywords: Industry 4.0; Information and Communication Technologies; Small Business; Technology Adoption.

1. INTRODUÇÃO

O termo Indústria 4.0 foi adotado pioneiramente em 2011 na feira de Hanover na Alemanha. O desenvolvimento do conceito derivou de uma iniciativa do governo alemão com universidades e empresas privadas daquele país. Tratava-se de um programa estratégico, cujo objetivo era desenvolver e difundir sistemas avançados de produção para aumentar a produtividade e eficiência da indústria alemã (DRATH e HORCH, 2014). A principal ideia consistia em integrar tecnologias emergentes e convergentes, buscando agregar valor a todo o ciclo de vida do produto (KAGERMANN et al., 2011). Para tanto, seria necessária a evolução do papel humano na produção e a difusão de abordagens inteligentes ao longo de toda a cadeia de valor, ambos fundamentados nas tecnologias de informação e comunicação (DALENOGARE et al., 2018; HORVÁT e SZABÓ, 2019).

Estratégias semelhantes também foram propostas por outros países industrializados, como a “Internet Industrial” dos EUA, o “Futuro da Manufatura” do Reino Unido, as “Fábricas do Futuro” da União Europeia e a “Internet +” da China (BUCHI et al., 2020). A Indústria 4.0 parece permear o futuro dos sistemas de produção nos países desenvolvidos, cujos efeitos têm se manifestado nas esferas econômica, organizacional, gerencial, política e social. Ela é considerada uma mudança de paradigma da produção industrial, baseada na digitalização avançada das fábricas, na internet e na inteligência de dispositivos, máquinas e sistemas de produção (CHIARELLO et al., 2018; RAJ et al., 2020; TORTORELLA et al., 2020). Trata-se, para alguns autores, de uma revolução tecnológica do sistema de produção de bens e serviços, denominada quarta revolução industrial (DRATH e HORCH, 2014; SOUSA JABBOUR et al., 2018; DALENOGARE et al., 2018; FRANK et al., 2019; HORVÁT e SZABÓ, 2019; TORTORELLA et al., 2020).

O foco desta revolução está na integração e conectividade de diferentes processos de produção, distribuição e comercialização, cujos objetivos principais são melhorar a performance de empresas e cadeias de valor (DALENOGARE et al., 2018; BUCHI et al., 2020; TORTORELLA et al., 2022). Novas tecnologias de informação e comunicação, tais como Internet das Coisas (IoT), sensores sem fio em rede, internet móvel, big data, computação em nuvem, sistemas embarcados, manufatura aditiva e robôs autônomos têm sido adotadas por empresas de diferentes setores de atividade econômica (LI, 2018; RAGUSEO, 2018; MAROUFKHANI et al., 2020; RAJ et al., 2020;

TORTORELLA et al., 2020). Esse novo paradigma tecnológico tem potencial de afetar a organização das atividades das empresas, as relações comerciais entre empresas, os modelos de negócio, a estrutura de concorrência das indústrias, o ambiente institucional e as demandas do mercado (HORVÁT e SZABÓ, 2019; BUCHI et al., 2020).

Notadamente, as tecnologias de informação e comunicação (TICs) consistem no elemento central da Indústria 4.0 (WANG et al., 2016; LU, 2017; TORTORELLA et al., 2020). Essas tecnologias possibilitam a coleta, processamento, compartilhamento e análise de dados em tempo real, fornecendo informações úteis a todo o sistema produtivo (FRANK et al., 2019). Ademais, as tecnologias da Indústria 4.0 permitem a integração entre sistemas de informação e manufatura, impactando fortemente nas decisões de alocação e uso dos fatores de produção dentro das organizações e também nas relações de mercado entre as organizações e seus *stakeholders* (TASTAN e GONEL, 2017; HORVÁT e SZABÓ, 2019). Otimização de processos, redução de desperdícios, melhor uso dos fatores de produção, maior customização dos produtos e redução nos prazos de produção e entrega são alguns dos potenciais benefícios provenientes da adoção destas tecnologias (HORVÁT e SZABÓ, 2019; BAG et al., 2020; BUCHI et al., 2020; BAG et al., 2021; TORTORELLA et al., 2022).

Posada et al. (2015), Zezulka et al. (2016) e Roblek et al. (2016) definiram seis elementos chave da Indústria 4.0, a saber: (1) digitalização, otimização e customização da produção de bens e serviços; (2) automação e rápida adaptação das cadeias de suprimentos; (3) forte interação homem-máquina; (4) oferta de serviços e produtos com alto valor agregado; (5) compartilhamento automático de dados e informações intra e entre organizações e (6) novos modelos de negócios. Por sua vez, Frank et al. (2019) propuseram uma divisão das tecnologias que caracterizam a Indústria 4.0 em dois grandes grupos: (1) tecnologias de base: internet das coisas, nuvem, big-data e softwares de análise; (2) tecnologias de “*front-end*”: cadeia de suprimentos inteligente (p.e., plataformas digitais com fornecedores, clientes e outras organizações), trabalho inteligente (p.e., monitoramento remoto da produção, operação remota da produção, robôs colaborativos, treinamentos com realidade virtual, etc.), manufatura inteligente (sensores, ERP-*Enterprise Resource Planning*, MRP-*Manufacturing Resource Planning*, rastreabilidade de materiais, máquinas com inteligência artificial, simulação de processos, etc.), e produtos inteligentes (p.e., produtos com interfaces de conectividade com os clientes). As tecnologias digitais do primeiro grupo oferecem conectividade e

“inteligência” para a organização desenvolver as competências e as tecnologias de “*front-end*”. Estas últimas otimizam o processo de tomada de decisão, aumentam a eficiência no uso dos fatores de produção e conferem vantagens competitivas sustentáveis às organizações (FRANK et al., 2019; BAG et al., 2021).

Para que as tecnologias supracitadas sejam difundidas e adotadas de forma eficiente pelas empresas, quatro características principais devem ser consideradas: (1) planejamento integrado de atividades na cadeia de valor; (2) integração horizontal por meio de redes de valor; (3) integração vertical dos sistemas de manufatura em rede; e (4) integração digital de ponta a ponta da engenharia em toda a cadeia de valor (HOFFMAN e RUSCH, 2017; KIEL et al., 2017; HORVÁT e SZABÓ, 2019). O *locus* principal para a integração é a fábrica, que então se tornaria um espaço inteligente, altamente flexível e reconfigurável (WANG et al., 2015).

Apesar dos potenciais benefícios que podem ser obtidos com o uso das tecnologias da Indústria 4.0, um estudo do Fórum Econômico Mundial (WEF, 2019) indica que poucas empresas conseguem efetivamente integrar as tecnologias da Indústria 4.0 de modo a obter vantagens econômicas significativas. Problemas na qualificação e organização dos recursos humanos, falta de capacidades para o gerenciamento de tecnologias digitais, ausência de estratégias para o uso de tecnologias digitais, escassez de recursos financeiros, resistência à mudança, dificuldades na comunicação e integração das atividades e problemas com conectividade e segurança de dados têm sido reportados como barreiras à adoção e ao uso eficiente dessas tecnologias pelas organizações (MCKINSEY e COMPANY, 2016; DALENOGARE et al., 2018; HORVÁT e SZABÓ, 2019; RAJ et al., 2020; TORTORELLA et al., 2020).

Neste sentido, as empresas tidas como referência na adoção de tecnologias da Indústria 4.0 parecem ter algumas características que as diferenciam das demais, a saber: (1) alto nível de investimento em capital humano; (2) redefinição dos *benchmarks*, indo além da melhoria contínua; (3) acesso a recursos físicos e financeiros; (4) alta capacidade de adaptação e mudança; e (5) sistemas de inovação e colaboração aberta, incluindo os negócios, o governo, a sociedade e o ambiente acadêmico (RÍOS et al., 2017; HORVÁT e SZABÓ, 2019; WEF, 2019).

No Brasil, a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) e a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP) criaram, em 2017, um programa

denominado “Rumo à Indústria 4.0” (ABDI, 2017). Esse programa visava difundir os conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 para as empresas locais. Em 2019, os ministérios da Economia e da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações lançaram a Câmara Brasileira da Indústria 4.0, cujos objetivos são alavancar o uso de conceitos e práticas da Indústria 4.0 no Brasil e, com isso, aumentar a competitividade e a produtividade das empresas nacionais (BRASIL, 2019). Mesmo com as iniciativas mencionadas, o nível de adoção das tecnologias de Indústria 4.0 por empresas brasileiras ainda é baixo, sobretudo nas pequenas e médias empresas do setor industrial.

Segundo pesquisa da FIESP e SENAI (2018), o assunto “Indústria 4.0” é pouco conhecido pelas empresas brasileiras. Em uma investigação com uma amostra de 277 empresas, verificou-se que apenas 41% destas adotavam o *lean manufacturing*, importante pré-requisito para as tecnologias de Indústria 4.0. Ademais, 32% das organizações analisadas afirmaram não ter ciência da Quarta Revolução Industrial, Indústria 4.0 ou Manufatura Avançada. Portanto, percebe-se que essa temática carece de investigações empíricas mais profundas. De fato, em uma revisão sistemática de literatura, Bueno et al. (2020) sugerem fortemente que sejam desenvolvidos estudos empíricos para investigar o nível de conhecimento, as barreiras e os determinantes da propensão à adoção das tecnologias da Indústria 4.0 por empresas de manufatura no Brasil.

Neste contexto, podem-se levantar as seguintes questões de pesquisa: (1) Quais são as tecnologias da Indústria 4.0 adotadas por pequenas e médias empresas no Brasil? (2) Quais são as principais características das pequenas e médias empresas brasileiras que adotam as tecnologias da Indústria 4.0? (3) Quais são as principais barreiras à adoção destas tecnologias percebidas pelas pequenas e médias empresas brasileiras?

Este trabalho visa responder empiricamente às questões supracitadas com uma análise da adoção de tecnologias da Indústria 4.0 por uma amostra de 30 pequenas e médias empresas do setor metalúrgico, que operam com processos de usinagem, no estado de São Paulo. O processo de usinagem permite o acabamento de peças fundidas ou conformadas mecanicamente, melhorando aspectos superficiais e possibilitando a obtenção de dimensões mais precisas, de modo a atender especificações de projeto. Conseguem-se então custos mais baixos em fabricação seriada, e também se torna possível a fabricação de uma ou poucas peças, praticamente de qualquer forma, a partir

de um bloco de material metálico. Nesse processo, porções do material da peça são retiradas pela ação das chamadas ferramentas de corte, por meio da utilização destas nas chamadas máquinas operatrizes (CHIAVERINI, 1986).

Apesar de atuarem em segmentos de mercado diferentes, seja produzindo máquinas e equipamentos, ou fornecendo componentes e peças, as empresas da amostra apresentam diversas similaridades técnicas e comerciais. Os mesmos tipos de máquinas operatrizes, como, por exemplo, tornos, fresadores e furadeiras, e o mesmo perfil de profissional, que tem a formação técnica necessária para operar essas máquinas operatrizes, são utilizados por essas empresas. As máquinas apresentam flexibilidade de uso e os conceitos técnicos utilizados acabam sendo os mesmos, independentemente do formato e aplicação final do componente produzido. Existem máquinas dedicadas, que são construídas para um tipo específico de operação, mas estas máquinas acabam sendo utilizadas apenas em fabricação de lotes muito grandes, situação que não ocorre nas empresas da amostra. Portanto, os mesmos tipos de recursos, sejam tecnológicos, financeiros, ou humanos, acabam sendo utilizados por todas as empresas que têm a usinagem como parte de suas operações, claro, levando-se em conta o capital disponível, o tamanho da empresa e os principais clientes destas.

O presente estudo apresenta um esforço de sistematização das características e benefícios das tecnologias da Indústria 4.0, bem como uma análise empírica da adoção de tecnologias da Indústria 4.0 por pequenas e médias empresas localizadas no estado de São Paulo. Esses resultados podem ser particularmente úteis para fomentar a difusão dessas tecnologias e aumentar a competitividade da indústria nacional, sobretudo das pequenas e médias empresas. Os resultados do trabalho são relevantes para preencher uma lacuna na literatura empírica caracterizada pelo pequeno número de estudos de adoção de tecnologias da Indústria 4.0 com base em dados primários de empresas no Brasil.

1.1. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como principais objetivos descrever as tecnologias tidas como base da Indústria 4.0, bem como analisar o nível de adoção e comparar características de empresas adotantes e não adotantes destas tecnologias. Dados primários coletados por meio da aplicação de questionários estruturados em uma amostra de 30

pequenas e médias empresas do setor metalúrgico, que operam com processos de usinagem, são utilizados para atingir os objetivos mencionados.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- 1) Descrever as principais tecnologias de Indústria 4.0 com base em revisão de literatura;
- 2) Identificar o nível de adoção de tecnologias da Indústria 4.0 pelas empresas da amostra;
- 3) Comparar estatisticamente as características das empresas que adotam tecnologias da Indústria 4.0 com aquelas das empresas que não adotam;
- 4) Identificar os fatores que afetam o nível/intensidade de adoção dessas tecnologias pelas empresas da amostra;
- 5) Identificar as principais barreiras à adoção das tecnologias da Indústria 4.0 percebidas pelas empresas.

1.2. JUSTIFICATIVAS

No Brasil, as iniciativas para maior difusão das tecnologias de Indústria 4.0 são incipientes e datam do final da década de 2010. Um estudo publicado em maio de 2018 por FIESP e Senai-SP buscou identificar o grau de conhecimento de uma amostra de empresas a respeito do conceito de Indústria 4.0 e os desafios a serem enfrentados para sua adoção. Considerando 154 empresas que já ouviram falar em Indústria 4.0 (68% da amostra do estudo), os principais resultados foram:

- 90% concordam que a Indústria 4.0 “aumentará a produtividade” e que “é uma oportunidade ao invés de um risco”;
- 67% esperam sentir um impacto mediano com a implementação da Indústria 4.0;
- 30% estão “muito otimistas” quanto à implementação da Indústria 4.0 na própria empresa, e apenas 17% estão “muito otimistas” quanto a essa implementação no setor de atuação da empresa;
- 5% se sentem “muito preparadas” para enfrentar os desafios da Indústria 4.0, enquanto 23% se sentem “nem um pouco preparadas”.

O estudo ainda levantou os principais desafios considerados pelas empresas para a adoção das tecnologias, a saber: problemas com cibersegurança, investimento inicial alto, escala de produção necessária para diluir custos fixos, incertezas em relação a problemas de adaptação, falta de qualificação dos recursos humanos (necessidade de habilidades com programação, gerenciamento de dados e análise preditiva de dados) e falta de conhecimento sobre a relação custo-benefício das tecnologias (FIESP e SENAI, 2018). Dentre as 277 empresas pesquisadas, 30% estavam iniciando ações para implementar o conceito de Indústria 4.0 e 25% estavam planejando a adoção. As principais tecnologias apontadas como alvo pelas empresas foram análise de Big Data (21%), monitoramento e controle remoto da produção (15%), digitalização (12%) e robótica (11%).

Um outro estudo, do Fórum Econômico Mundial (WEF, 2018), indicou que o Brasil possui o 9º maior setor de manufatura no mundo, o qual representou em 2019 aproximadamente 21% do PIB nacional (IBGE, 2020). Entretanto, aponta-se que a estrutura da produção industrial brasileira apresenta um nível de complexidade tecnológica relativamente baixo. O relatório enumera alguns direcionadores de produção, necessários para o avanço rumo à Indústria 4.0:

- Tecnologia e Inovação,
- Capital Humano,
- Comércio Global e Investimento,
- Estrutura Institucional,
- Recursos Sustentáveis,
- Ambiente de Demanda.

Nesse estudo foi constatado que o desempenho do país é misto nesses direcionadores, sendo que os recursos sustentáveis e o ambiente de demanda foram os mais bem classificados. O país também foi considerado um importante destino para investimentos estrangeiros, porém deveria buscar mais parceiros globais para facilitar o conhecimento e a transferência de tecnologia. Foi ainda sugerido que a eficiência regulatória e a governança referente às tecnologias digitais e cibersegurança sejam tratadas como prioridade (WEF, 2018).

As micro e pequenas empresas, foco desta dissertação, são responsáveis por cerca de 30% do valor adicionado à produção de riqueza do país, sendo que esse número

vem crescendo desde 1985, ano em que eram responsáveis por cerca de 21% da riqueza nacional. Entre 2006 e 2019, a geração de empregos nesse grupo ficou perto dos 13,5 milhões de vagas. Neste mesmo período, as médias e grandes empresas fecharam por volta de 1,1 milhão de vagas (FGV e SEBRAE, 2020). Essas empresas de menor porte, por operarem com contingentes de pessoal mais baixos, possuem pouco espaço para demissões e acabam produzindo um efeito “amortecedor” nas crises econômicas, mantendo ou reduzindo muito pouco sua força de trabalho.

Com base nas informações apresentadas anteriormente, que mostram a importância das tecnologias da Indústria 4.0 para o futuro das organizações, este trabalho pode contribuir com a difusão das tecnologias da Indústria 4.0 na população composta por empresas de pequeno e médio portes. Essas empresas ainda possuem pouco conhecimento sobre as tecnologias supracitadas e, se não adotarem tais tecnologias, poderão perder competitividade rapidamente.

O trabalho também pode se justificar com base na importância dessas empresas menores para a economia brasileira, cujo papel na manutenção e geração de empregos e na composição do PIB tem se mostrado crucial. Entre os macroeconomistas existe a ideia de que diferenças tecnológicas são responsáveis pelas diferentes taxas de crescimento do PIB per capita e do salário real de trabalhadores que possuem habilidades semelhantes entre os países (CASELLI e COLEMAN, 2001; COMIN e HOBIJN, 2004). Considerar as diferenças nos níveis tecnológicos entre os países pode melhorar a compreensão a respeito da desigualdade global. A difusão de inovações, tais como as tecnologias da Indústria 4.0, pode ser o caminho para aproximar os países emergentes dos países desenvolvidos. Portanto, se a difusão das tecnologias é o principal caminho a ser traçado pelos países mais pobres em direção ao desenvolvimento, uma possível explicação para o crescimento lento em economias mais pobres seria a adoção incompleta dessas novas tecnologias (FOSTER e ROSENZWEIG, 2010).

Assim, uma análise empírica da adoção das tecnologias de Indústria 4.0 por pequenas e médias empresas brasileiras pode contribuir com o desenvolvimento econômico do país. Com base na identificação das características das empresas que adotam as tecnologias e dos fatores que afetam a utilização das tecnologias é possível estabelecer diretrizes para a difusão das inovações da Indústria 4.0.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além deste capítulo introdutório, a presente dissertação está dividida em mais quatro capítulos. O capítulo 2 apresenta o referencial teórico que fundamenta a pesquisa, onde são apresentadas algumas teorias de inovação e difusão tecnológica, uma revisão das principais tecnologias da Indústria 4.0 e das barreiras à adoção dessas tecnologias por organizações de diferentes países. No terceiro capítulo é apresentada a estratégia metodológica do trabalho. Este capítulo aborda as características da amostra, o instrumento de coleta dos dados e os métodos estatísticos adotados para analisar os dados. O quarto capítulo apresenta e discute os resultados do trabalho empírico de adoção de tecnologias da Indústria 4.0 por uma amostra de pequenas e médias empresas do estado de São Paulo. As considerações finais e implicações dos resultados são apresentadas no quinto capítulo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico dessa dissertação está dividido em três subseções. A primeira apresenta uma revisão das principais tecnologias da Indústria 4.0, caracterizando-as e discutindo seus potenciais benefícios e complexidades à luz da literatura existente. A segunda subseção apresenta os conceitos de inovação, adoção e difusão tecnológica, bem como algumas abordagens teóricas do processo de adoção de tecnologias por firmas. A terceira subseção apresenta uma revisão de estudos que identificaram as barreiras à adoção das tecnologias da Indústria 4.0 por firmas de diferentes países.

2.1. TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0

Os avanços tecnológicos obtidos nas revoluções industriais resultaram em aumentos significativos na produtividade dos fatores de produção, na renda e no bem-estar social. Podem-se mencionar os motores a vapor no século XIX, a eletrificação no início do século XX, e a automatização a partir da década de 1970 (RUBMAN et al., 2015). Com o desenvolvimento das tecnologias de informação e comunicação (TICs), acentuado a partir da década de 1980, novas tecnologias digitais têm sido crescentemente aplicadas aos sistemas de produção industrial. A adoção dessas tecnologias por empresas

industriais de diferentes países foi definida como uma quarta revolução industrial (BUCHI et al., 2020).

O elemento central desta nova revolução industrial é a substancial mudança na conectividade dos sistemas de manufatura, onde se integram as TICs, a internet das coisas, e os sistemas ciber-físicos (DALENOGARE et al., 2018; KAGERMANN et al., 2013; SCHWAB, 2017). A Indústria 4.0, termo adotado para caracterizar essa quarta revolução industrial, pode ser definida como um *cluster* de tecnologias digitais aplicadas às diferentes etapas das cadeias de suprimentos. Essas tecnologias utilizam-se de sistemas conectados pela internet e são coordenadas por líderes tecnológicos, usuários essenciais, integradores de sistemas e políticas governamentais (MARTINELLI et al., 2019).

A expressão “Indústria 4.0” envolve, em última análise, a adoção de sistemas integrados e conectados de automação industrial que auxiliam no gerenciamento de todos os processos nas cadeias de valor e suprimento (YIN et al., 2017; REISCHAUER, 2018). Portanto, tem-se um avanço tecnológico caracterizado pela crescente digitalização e conectividade das atividades de produção de bens e serviços (DALENOGARE et al., 2018). A difusão das novas tecnologias digitais tem contribuído significativamente para aumentar a competitividade e a capacidade de resiliência das empresas (BUCHI et al., 2020; BAG et al., 2021). O potencial de negócios da chamada quarta revolução industrial está tanto na otimização de processos quanto na melhoria dos produtos e serviços (KAGERMANN, 2011).

Por exemplo, o uso de sensores com sistemas integrados e conectados, que monitoram e controlam equipamentos e produtos, enquanto coletam grande quantidade de dados e atualizam os softwares gerenciais com as informações da produção, podem tornar a fábrica inteligente (RUBMANN et al., 2015; DALENOGARE et al., 2018; WANG et al., 2015). A grande quantidade de dados disponíveis para análise em tempo real (Big Data) pode prevenir erros de tomada de decisão, reduzir desperdícios e aumentar a velocidade dos processos de produção, resultando em bens com maior qualidade e custo médio mais baixo (RAGUSEO, 2018). A rede horizontal de sistemas embarcados tem grande potencial de otimização em produção, logística e distribuição, permitindo tempos de respostas mais curtos e otimização na utilização de recursos ao longo das cadeias produtivas. Como resultado, atende-se melhor às demandas econômicas e ambientais da

sociedade, reduzindo-se custos e melhorando a eficiência energética (KAGERMANN et al., 2013; DALENOGARE et al., 2018).

Neste estudo, entende-se que uma empresa caminha na direção da Indústria 4.0 quando adota ou manifesta a pretensão de adotar um conjunto de tecnologias digitais que fazem parte da filosofia da Indústria 4.0. Essas tecnologias, também denominadas por alguns autores “Pilares da Indústria 4.0”, possuem fortes complementariedades. Contudo, o pacote tecnológico da Indústria 4.0 pode ser totalmente ou parcialmente adotado por uma organização. A seguir, são apresentadas as definições, características e potencialidades das principais tecnologias que fazem parte da Indústria 4.0.

2.1.1. Manufacturing Execution System (MES)

O MES (*Manufacturing Execution System*, ou Sistema de Execução da Manufatura) é a única tecnologia apresentada nesta seção que não é classificada necessariamente como uma tecnologia da Indústria 4.0. No entanto, esse sistema é um capacitador para a Indústria 4.0, pois eleva o grau de rastreabilidade, visibilidade, flexibilidade e transparência nos processos operacionais das empresas (MANTRAVADI e MØLLER, 2019). O MES tem por objetivo fazer a ligação entre os sistemas de planejamento e controle da produção por meio de informações obtidas de forma on-line. Assim, a aplicação dos recursos da manufatura, como pessoas, equipamentos e estoques é coordenada e gerenciada (MCCLELLAN, 2001).

Este sistema foi desenvolvido a partir da década de 1970 para o auxílio da execução da produção e para o gerenciamento das atividades desenvolvidas no chão de fábrica. Ele é capaz de integrar sistemas como o ERP (*Enterprise Resource Planning*, que é um Sistema de Gestão Integrado) a sensores e controladores lógicos programáveis (CLP), usando as informações disponíveis para apoiar os processos da manufatura. A exemplo de outras ferramentas de gestão empresarial, o MES vem evoluindo ao integrar novas extensões, aproveitando o desenvolvimento das tecnologias de comunicação e informação (MCCLELLAN, 2001; MANTRAVADI e MØLLER, 2019).

Antes do MES, os departamentos de produção das empresas buscavam soluções específicas para sua realidade no chão de fábrica, sendo que os dados eram obtidos e tratados localmente, o que acabava por dificultar a consolidação destes e a manutenção dos softwares utilizados por estes setores. O MES tem o objetivo de possibilitar a

integração de sistemas a partir de múltiplos pontos, permitindo aos desenvolvedores de software criar ferramentas que englobem vários sistemas de produção (MANTRAVADI e MØLLER, 2019; UGARTE et al., 2009).

A transparência e o acesso à informação são princípios da Indústria 4.0, e o MES torna visíveis dados críticos de produção em tempo real (MANTRAVADI e MØLLER, 2019), atendendo às necessidades dos usuários com respostas mais rápidas para o gerenciamento das complexidades da produção (QIU e ZHOU, 2004). A próxima geração de fábricas, chamadas inteligentes, preconiza melhorias nos processos, visando melhor aproveitamento das tecnologias de automação e redução de trabalho burocrático (ou diminuição do uso do “papel”). Os principais capacitadores para essas mudanças são as tecnologias de informação e comunicação e a internet industrial. O MES tem papel fundamental no processo de digitalização da manufatura (SAUER, 2014; MANTRAVADI e MØLLER, 2019).

O MES traz benefícios percebidos pelos usuários, tais como redução de tempos de fabricação, melhoria de qualidade, melhor previsão de manutenção, visibilidade ao longo do processo, promoção da melhoria contínua e apoio aos conceitos da manufatura enxuta (COTTYN et. al., 2011; MESA INTERNATIONAL, 1997; QIU e ZHOU, 2004). Benefícios financeiros, como maior margem de lucro operacional, também são obtidos. Estes benefícios indicam razões para que empresas invistam na adoção do MES (MANTRAVADI e MØLLER, 2019).

2.1.2. Big Data

Big Data pode ser entendido como a coleta e organização de grande volume de dados com alta velocidade em sistemas informatizados e conectados, permitindo, por exemplo, análises estatísticas descritivas, preditivas e mineração desses dados para a tomada de decisão (GILCHRIST, 2016; RAGUSEO, 2018). Essa tecnologia é impulsionada principalmente pela difusão e adoção dos computadores, dispositivos móveis (p.e. smartphones), sensores, mídias sociais, e tecnologias relacionadas à internet das coisas (p.e. tecnologia RFID - *Radio-Frequency Identification*, ou identificação por radiofrequência). Os dados que alimentam o Big Data podem ser coletados com o uso de sensores, satélites, mídias sociais, fotos, vídeos e sinais de GPS (WAMBA et al. 2014; DAVENPORT, 2014).

Alguns autores denominam as características atribuídas ao Big Data como 5 V's: (1) Volume, que é a enorme quantidade de dados contidos no armazenamento; (2) Velocidade, ou frequência, da geração e entrega dos dados; (3) Variedade dos dados gerados à partir de diversas fontes, e em diversos formatos, incluindo dados estruturados e não estruturados; (4) Valor dos benefícios econômicos que podem ser extraídos dos dados disponíveis; e (5) Veracidade, qualidade e nível de confiança dos dados obtidos de fontes variadas (MCAFEE et al., 2012; WAMBA et al., 2014; HIBA et al., 2015).

A adoção do Big Data possibilita que as organizações colem, armazenem, organizem, gerenciem e analisem grandes quantidades de dados no tempo e velocidade certos, subsidiando o processo de tomada de decisão (RUBMANN et al., 2015; HIBA et al., 2015; WEF, 2019). McAfee et al. (2012) mencionam que, com o Big Data, os empresários podem mensurar e, conseqüentemente, conhecer muito mais a respeito de seus próprios negócios. Por exemplo, os dados armazenados e acessados no Big Data podem ser utilizados para o monitoramento preciso e em tempo real das condições de funcionamento de um equipamento. Como resultados, podem-se obter redução no inventário total, no estoque de ferramentas e nos itens sucateados, aumentando a eficiência do equipamento a partir do gerenciamento e monitoramento digital do mesmo. Em um outro exemplo, a organização pode coletar, organizar e analisar um amplo conjunto de dados sobre o comportamento de seus consumidores. Essas análises podem ser utilizadas para estratificação do mercado, customização do produto e estabelecimento de estratégias ótimas de precificação (p.e., diferenciação de preços).

Em suma, os potenciais benefícios do Big Data são: aumento da flexibilidade da linha de produção, redução nos tempos de ciclo de projetos e usinagem, melhoria da qualidade de produtos e serviços, otimização no uso dos recursos de produção, maior capacidade de compreender demandas do mercado em tempo real e maior customização dos produtos e serviços (RAGUSEO, 2018; WANG et al., 2018; WEF, 2019; MAROUFKHANI et al., 2020). White (2012) ressalta, porém, que se a qualidade dos dados for insuficiente, predições enviesadas podem resultar em análises incorretas das oportunidades e, conseqüentemente, erros de tomada de decisão. Além disso, algumas organizações têm coletado um volume de dados muito maior do que o que realmente seria útil para o processo de tomada de decisão, o que produz ineficiências técnicas e gerenciais (MCAFEE et al., 2012). Portanto, a organização deve desenvolver novas capacidades

tecnológicas e humanas para efetivamente transformar o volume de informações do Big Data em vantagem competitiva sustentável (RAGUSEO, 2018).

2.1.3. Simulação

A simulação de sistemas tem sido utilizada desde a década de 1950 para a compreensão, análise, melhoria e otimização dos processos de produção da manufatura (GUNAL, 2019). Segundo Ehrlich (1985), a simulação é um método empregado para estudar o desempenho de um sistema por meio da formulação de um modelo matemático, o qual deve reproduzir, da maneira mais fiel possível, as características do sistema original. A partir de mudanças em variáveis do sistema simulado, é possível prever resultados esperados. A simulação é uma tecnologia chave para o desenvolvimento de modelos computacionais exploratórios de planejamento que permitam otimizar as decisões, os projetos e a eficiência no uso dos recursos em sistemas de produção complexos e inteligentes (FERREIRA et al., 2020). A simulação tem sido amplamente utilizada para modelar o impacto da adoção de inovações na coordenação, alocação e uso dos fatores de produção de uma organização (CRUZ-MEJÍA et al., 2019).

Tecnologias avançadas de comunicação e sensores permitem a conexão das instalações físicas e das máquinas ao ambiente virtual por meio da internet e aplicativos, permitindo a simulação do ambiente físico em tempo real. Essa simulação pode contemplar trabalhadores, máquinas e produtos, permitindo testes para diferentes formas de coordenação dos recursos, os quais são sempre realizados no ambiente virtual antes da implantação no ambiente físico. A virtualização de uma operação é suportada pelos sensores, que fornecem informações sobre eventos e status destes, e pelos dados disponíveis em Big Data, permitindo a seleção de respostas a eventos diversos (KAGERMANN, 2011; RUBMANN et al., 2015; BABICEANU e SEKER, 2016). Esses sistemas ciber-físicos permitem que a tomada de decisões seja otimizada, tornando mais ágeis as adaptações a vários tipos de eventos, como por exemplo uma parada por quebra em uma linha de produção. Com isso, há ganhos de eficiência no uso dos recursos e reduções nos custos de produção (DALENOGARE et al., 2018).

2.1.4. Integração de sistemas vertical e horizontal

A integração de sistemas intra e entre organizações tem sido facilitada a partir dos avanços nas TICs (Tecnologias de Informação e Comunicação) observados na quarta revolução industrial. As integrações vertical e horizontal dos sistemas, em conjunto com a engenharia de ponta-a-ponta, são fundamentais para as empresas alcançarem os objetivos e resultados propalados pela Indústria 4.0. A troca de dados e informações de maneira mais rápida e eficiente subsidia o processo de tomada de decisão, permitindo ganhos de produtividade, redução de custos e maior coordenação nas cadeias de valor (DALENOGARE et al., 2018; LARA et al., 2020).

Os sistemas verticais são adotados para a coordenação das atividades dentro da empresa, contemplando sua estrutura organizacional, os recursos humanos, o maquinário, o desenvolvimento de novos produtos e a tomada de decisão de alocação e uso dos recursos disponíveis. A integração vertical busca conectar os sistemas de tecnologia de informação e comunicação em diferentes níveis hierárquicos da empresa, integrando, por exemplo, a alta gestão e a produção em uma organização. A interação entre sistemas ERP e MES, por exemplo, conecta a gestão corporativa com a gestão industrial, onde são contabilizadas e compartilhadas informações de quantidades de produção, produtos descartados e nível de desempenho dos equipamentos, evitando retrabalhos e melhorando a tomada de decisão (PÉREZ-LARA et al., 2018; GARROCHO et al., 2020).

Por sua vez, o sistema horizontal refere-se às relações com clientes e fornecedores ao longo da cadeia de valor. A integração horizontal proporciona maior colaboração entre empresas por meio do compartilhamento de recursos e informações em tempo real. Com a maior facilidade para a integração de dados, as cadeias de valor podem se tornar automatizadas, integrando empresas, fornecedores, clientes, departamentos (como engenharia e chão de fábrica), funções e recursos. Plataformas de trabalho comuns podem permitir trocas de dados de produtos, projetos e recursos entre os vários parceiros. A coordenação das cadeias de valor se torna muito mais eficiente a partir da integração horizontal dos sistemas. Já a engenharia de ponta a ponta integra a engenharia ao longo de toda a cadeia de valor de um produto, do desenvolvimento ao pós-venda (DALENOGARE et al., 2018; KAGERMANN et al., 2013; BRETTEL et al., 2014; RUBMANN et al., 2015; GILCHRIST, 2016; LARA et al., 2020).

2.1.5. Internet das Coisas Industrial

A União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunication Union* – ITU, 2012) define a Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*) como uma infraestrutura global ancorada em tecnologias interoperáveis de informação e comunicação que permitem o desenvolvimento de serviços avançados por meio da interconexão, física e virtual, de objetos. Por sua vez, Manavalan e Jayakrishna (2019) definem a IoT como uma tecnologia intuitiva, robusta e escalável que permite a transformação digital do mundo conectado por meio da internet, fornecendo dados relevantes em tempo real para toda a cadeia de valor.

A integração de tecnologias de informação, como hardwares e softwares, e de comunicação, como os sistemas eletrônicos usados na comunicação entre os dispositivos, é a base para as soluções fornecidas pela IoT. Uma das áreas mais proeminentes de aplicação de IoT é a indústria, na qual o desenvolvimento de sistemas de produção inteligentes e locais de produção conectados podem contribuir significativamente com melhorias em processos, produtos e serviços. A combinação de componentes físicos e digitais pode ser utilizada inclusive para o desenvolvimento de novos produtos e modelos de negócios (WORTMANN e FLUCHTER, 2015).

A internet das coisas permite a conexão, a qualquer hora e em qualquer lugar onde haja um ponto de acesso, entre dispositivos eletrônicos, sensores, máquinas e produtos, que podem conter computação embarcada com inteligência artificial. Máquinas, equipamentos e dispositivos inteligentes podem se comunicar e interagir com controladores centralizados em sistemas de manufatura. Decisões autônomas baseadas em parâmetros pré-configurados e em dados coletados por sensores ao longo do processo tornam-se possíveis, resultando em respostas rápidas e ajustes em tempo real. (KAGERMANN, 2011; RUBMANN et al., 2015; RUPASINGHE e MAJEED, 2017).

Por exemplo, a função básica de um silo é fornecer capacidade de armazenamento. Contudo, se o silo for automatizado com a tecnologia IoT (p.e., emissores baseados em LED e receptores óticos para capturar o volume armazenado e alimentar o software de gerenciamento), ele poderá mensurar e monitorar seu próprio peso em tempo real, detectando níveis baixos de estoque e oferecendo o serviço de reposição automática quando atingir o nível de segurança. Outros equipamentos, como máquinas e veículos de transporte de carga, também podem ser programados para

trabalhar conectados e com certa autonomia a partir da adoção da IoT pela empresa (FLEISCH et al., 2014).

2.1.6. Computação em nuvem

A computação em nuvem tem o objetivo de proporcionar serviços de tecnologia da informação (p.e., capacidade de processamento, armazenamento e conectividade) sob demanda e com pagamento baseado no uso (*pay-per-use*). No início dos anos 2000, grandes empresas de tecnologia, como Google e Amazon, criaram imensos parques computacionais baseados no conceito de nuvem para operarem seus próprios negócios. Uma vez tendo desenvolvido essas grandes estruturas, as empresas perceberam que poderiam gerar novos negócios, criando então a oferta de serviços de computação em nuvem para o mercado (TAURION, 2009).

A computação em nuvem possibilita, por exemplo, que grandes quantidades de dados gerados por máquinas e sensores conectados durante o processo de produção sejam armazenados em uma rede de servidores. A computação em nuvem reduz a necessidade de investimento em equipamentos e recursos tecnológicos, pois o espaço de armazenamento e a capacidade de processamento passam a ser contratados sob demanda, aumentando a flexibilidade, agilidade e adaptabilidade. Também permite o acesso aos dados de qualquer localização, a qualquer horário, e a partir de diversos dispositivos e plataformas (XU, 2012; VELASQUEZ et al., 2018).

A conectividade permite a transmissão de dados de forma instantânea. Atualizações de interfaces e aplicativos baseados em nuvem são feitas de forma mais fácil e automática (PORTER e HEPPELMANN, 2014). Essa tecnologia facilita a criação de ecossistemas fabris e aumenta a colaboração cliente-fornecedor. Ao permitir que o cliente participe das etapas do processo produtivo, faz com que sua satisfação seja maximizada (VELASQUEZ et al., 2018). A computação em nuvem facilita ainda a criação de links entre planejamento de recursos de manufatura, planejamento de recursos empresariais, planejamento de recursos de engenharia e gerenciamento de relacionamento com clientes e fornecedores (XU, 2012).

O crescente compartilhamento de dados dentro das empresas e entre empresas tem aumentado a demanda de armazenamento em softwares baseados em nuvem. O avanço da tecnologia possibilita que os dados sejam acessados e os tempos de reação se

reduzam a milissegundos, permitindo que mais serviços e sistemas de controle de processos sejam baseados nesse tipo de armazenamento (RUBMANN et al., 2015).

2.1.7. Manufatura aditiva

Manufatura aditiva pode ser definida como um processo de combinação de materiais para fazer objetos a partir de dados de modelo 3D (CAD 3D), geralmente camada sobre camada (ALCISTO et al., 2011). A manufatura aditiva converte um modelo CAD 3D em camadas. A partir dessa informação, determina a trajetória (linguagem CNC) e os parâmetros de deposição, que posteriormente são processados por quatro componentes básicos: controlador CNC; sistema de movimentação; fonte de energia; e um sistema alimentação do material de adição (GIBSON et al., 2010). Esta definição é amplamente aplicável a todas as classes de materiais, incluindo metais, cerâmicas, polímeros, compostos e sistemas biológicos (FRAZIER, 2014).

A manufatura aditiva, ou impressão 3D, permite a criação de protótipos e componentes individuais. Essa tecnologia possibilita a produção em lotes pequenos e customizados, com vantagens construtivas como complexidade e leveza. Traz, ainda, o benefício da flexibilidade na produção por meio da transformação direta de modelos digitais 3D em produtos físicos utilizando máquinas de fabricação ágeis e versáteis, sem a necessidade de ferramentas específicas ou moldes (RUBMANN et al., 2015; WELLER et al., 2015; DALENOGARE et al., 2018). Essa tecnologia tem sido adotada para a produção de vários componentes em diferentes materiais e em diversos sistemas produtivos, tais como indústria de equipamentos médicos (JAVAID e HALEEM, 2018), defesa nacional (BUSACHI et al. 2016), indústria aeroespacial (NAJMON et al., 2019), agroindústria de alimentos (LIPTON et al., 2015), indústria de implementos agrícolas (JAVAID e HALEEM, 2019) e indústria automotiva (SARVANKAR e YEWALE, 2019).

Sistemas produtivos que adotam a manufatura aditiva descentralizada e de alto desempenho podem reduzir significativamente distâncias de transporte e estoques em decorrência da produção em pequenos lotes e próxima ao ponto de uso. O seu uso também pode reduzir os custos marginais de produção (RUBMANN et al., 2015; WELLER et al., 2015; MACCARTHY et al., 2016). Tempos de ciclo, entrega e chegada ao mercado dos produtos também são reduzidos com a adoção desta tecnologia (WEF 2019).

2.1.8. Robôs autônomos

A robótica, ramo da engenharia que envolve a concepção, projeto, fabricação e operação de robôs, tem desenvolvido um conjunto de novas tecnologias aplicadas à manufatura. Com os rápidos avanços na capacidade de processamento e conexão de computadores e dispositivos móveis, tem sido possível integrar completamente os robôs aos sistemas de produção. De fato, as últimas gerações de robôs podem integrar informações de vários sensores e adaptar seus movimentos, executando diferentes tarefas e fornecendo dados em tempo real para a tomada de decisão (TILLEY, 2017).

Os robôs autônomos são capazes de realizar tarefas manuais e cognitivas não rotineiras, aumentando os perfis de trabalho substituíveis e, eventualmente, compensando a escassez de mão de obra no mercado de trabalho (DECKER et al., 2017). Devido às suas novas capacidades, as áreas de atuação dos robôs foram ampliadas, não necessariamente substituindo o trabalho humano, mas o complementando e o tornando mais produtivo. Robôs autônomos têm sido utilizados para a realização de tarefas complexas e que exigem esforço físico, reduzindo desperdícios e custos de produção. Por exemplo, eles podem usar a análise espectral para verificar a qualidade de uma solda conforme ela está sendo feita, reduzindo drasticamente a quantidade necessária de inspeção pós-fabricação (TILLEY, 2017).

Há estudos mostrando a adoção de robôs autônomos em diferentes atividades econômicas, tais como construção civil (PAN e PAN, 2019), hospitais (HUSSAIN et al., 2014), hotelaria (NAM et al., 2020), produção de autopeças (PILLAI et al., 2021) e indústria alimentícia (GRAY e DAVIS, 2013). De uma forma geral, os robôs desenvolvem um conjunto de tarefas que exigiriam alto esforço humano e podem ser rapidamente ajustados para aumentar a eficiência das operações. Ademais, os robôs autônomos podem reduzir tempo com coleta e envios de itens ao longo de uma cadeia de suprimentos, reduzindo custos logísticos (WEF 2019).

Com a rápida evolução tecnológica, é possível que utilidade, autonomia, flexibilidade e capacidade de colaboração dos robôs seja ainda maior em um futuro próximo, podendo interagir entre si e com os trabalhadores. A relação entre homem e máquina que antes era de substituição passa a ser de complementariedade. Essa mudança

tecnológica traz tanto desafios quanto oportunidades para o trabalho humano (RUBMANN et al., 2015; DECKER et al., 2017; TAN e TAEIHAGH, 2020).

2.1.9. Realidade Aumentada

A Realidade Aumentada (RA) é uma tecnologia que permite sobrepor elementos virtuais à nossa visão da realidade em tempo real. Informações e objetos se sobrepõem ao mundo real, melhorando a percepção de realidade do usuário. Essa tecnologia possui três características fundamentais: (1) combina o mundo real com o virtual, (2) é interativa em tempo real e (3) é registrada em 3D (AZUMA, 1997). As partes essenciais de um sistema de RA utilizam dispositivos eletrônicos, como óculos de RA, câmeras, fones de ouvido, displays, tablets e projetores para combinar o real ao virtual. Qualquer tipo de hardware que apresente interatividade com os sentidos humanos pode ser utilizado com RA (PALMARINI et al., 2016; ALCÁCER e CRUZ-MACHADO, 2019).

Os principais recursos da tecnologia de RA são a capacidade de combinação e alinhamento entre objetos virtuais e ambiente real e a execução interativa de uma tarefa, em três dimensões, e em tempo real (KREVELEN e POELMAN, 2010; SYBERFELDT et al., 2015). Diferentemente da realidade virtual, que transporta o usuário para o ambiente virtual, a realidade aumentada mantém o usuário no seu ambiente físico e transporta o ambiente virtual para o espaço do usuário, permitindo a interação com o mundo virtual, de maneira mais natural e sem necessidade de treinamento ou adaptação (KIRNER e TORI, 2006).

A tecnologia de RA objetiva melhorar o desempenho humano no desenvolvimento de diferentes atividades, podendo ser adotada para treinamentos, manutenções, projetos de desenvolvimento de produtos, atividades de logística, layout de operações, entre outros. Essa tecnologia facilita a resolução de problemas por meio do aumento da percepção da realidade do usuário, combinando elementos virtuais com o ambiente físico, ou seja, a realidade processada digitalmente e a inserção de objetos virtuais, 2D ou 3D, ao mundo real (PALMARINI et al., 2016; ALCÁCER e CRUZ-MACHADO, 2019). Vários serviços são suportados por RA através de informações recebidas por dispositivos móveis, como por exemplo, seleção de itens em um depósito ou instruções de reparo ou montagem. Informações recebidas em tempo real contribuem

para a melhoria na execução de procedimentos e tomadas de decisões (RUBMANN et al., 2015).

2.1.10. Cibersegurança

A adoção de tecnologias da Indústria 4.0, como big data, IoT, computação em nuvem e sistemas de simulação, resulta na criação de uma grande quantidade de dados de enorme valor para a empresa. Esse cenário cria um conjunto de riscos, uma vez que esses dados estratégicos do negócio podem ficar expostos a ataques, assim como toda infraestrutura digital do negócio. A proteção dos dados e da infraestrutura digital a ataques cibernéticos passa a ser um fator crítico para o sucesso da organização (RUBMANN et al., 2015; ALCÁCER e CRUZ-MACHADO, 2019).

Segurança cibernética (ou cibersegurança) é um termo que remete à segurança da informação e que se aplica à internet das coisas, aos sistemas de gerenciamento e aos ambientes industriais conectados. Pode-se definir a cibersegurança como um conjunto de procedimentos, práticas e tecnologias que visam detectar, prevenir, proteger e responder a ataques virtuais ao ciberespaço e aos sistemas informatizados. Ainda, a cibersegurança consiste na coordenação de recursos, processos e pessoas para proteger a infraestrutura digital e os sistemas conectados da empresa (CRAIGEN et al., 2014; KANNUS e ILVONEN, 2018; PIEDRAHITA et al. 2018; ALCÁCER e CRUZ-MACHADO, 2019).

A expansão da conectividade e comunicação traz um aumento drástico na necessidade de investimentos para a proteção de sistemas industriais e de linhas de manufatura. Com isso, comunicações seguras e confiáveis, e gerenciamentos mais sofisticados de identidade e acesso a máquinas e usuários, e a verificação da integridade das fontes de informação se tornam essenciais. A cibersegurança deve garantir essa confiabilidade entre as instalações ao longo da cadeia de valor.

O Quadro 1, apresentado a seguir, sintetiza as tecnologias consideradas “pilares da Indústria 4.0”. Essas tecnologias são complementares e podem ser adotadas total ou parcialmente por uma organização.

Quadro 1. Tecnologias da Indústria 4.0.

Tecnologia	Definição	Impactos	Referências
Big data	Big Data pode ser entendido como a coleta e organização de grande volume de dados com alta velocidade em sistemas informatizados e conectados, permitindo análises preditivas para tomada de decisão. Essa tecnologia é impulsionada principalmente pela difusão dos computadores, dispositivos móveis, mídias sociais e tecnologias relacionadas à internet das coisas (p.e. tecnologia RFID - <i>Radio-Frequency Identification</i> , ou identificação por radiofrequência). Os dados que alimentam o Big Data podem ser coletados com o uso de sensores, satélites, mídias sociais, fotos, vídeos e sinais de GPS.	A adoção do Big Data possibilita que as organizações colem, armazenem, organizem, gerenciem e analisem grandes quantidades de dados no tempo e velocidade certos. Os potenciais benefícios do Big Data são: aumento da flexibilidade da linha de produção, redução nos tempos de ciclo de projetos e usinagem, melhoria da qualidade de produtos e serviços, otimização no uso dos recursos de produção, maior capacidade de compreender demandas do mercado em tempo real e maior customização dos produtos e serviços.	Gilchrist (2016); Raguseo (2018); Wamba et al. (2014); Davenport (2014); Rubmann et al. (2015); Hiba et al. (2015); WEF (2019); Wang et al. (2018); Maroufkhani et al. (2020).
Simulação	A simulação é um método empregado para estudar o desempenho de um sistema por meio da formulação de um modelo matemático, o qual deve reproduzir, da maneira mais fiel possível, as características do sistema original. É uma tecnologia chave para o desenvolvimento de modelos computacionais exploratórios de planejamento que permitam otimizar as decisões, os projetos e a eficiência no uso dos recursos em sistemas de produção complexos e inteligentes.	A simulação pode contemplar trabalhadores, máquinas e produtos, permitindo testes para diferentes formas de coordenação dos recursos, os quais são sempre realizados no ambiente virtual antes da implantação no ambiente físico. A simulação de sistemas ciber-físicos permite que a tomada de decisões seja otimizada, tornando	Ehrlich (1985); Dalenogare et al. (2018); Gunal (2019); Cruz-Mejía et al. (2019).

	<p>Tecnologias avançadas de comunicação e sensores permitem a conexão das instalações físicas e das máquinas ao ambiente virtual por meio da internet e aplicativos, permitindo a simulação do ambiente físico em tempo real.</p>	<p>mais ágeis as adaptações a vários tipos de eventos, como, por exemplo, uma parada por quebra em uma linha de produção. Com isso, há ganhos de eficiência no uso dos recursos e reduções nos custos de produção.</p>	
<p>Integração de sistemas vertical e horizontal</p>	<p>Os sistemas verticais são adotados para a coordenação das atividades dentro da empresa, contemplando sua estrutura organizacional, os recursos humanos, os ativos permanentes, o desenvolvimento de novos produtos, etc. A integração vertical busca conectar os sistemas de tecnologia de informação e comunicação em diferentes níveis hierárquicos da empresa. Por sua vez, a integração do sistema horizontal refere-se às relações com clientes e fornecedores ao longo da cadeia de valor, proporcionando maior colaboração entre empresas por meio do compartilhamento de recursos e informações em tempo real. Com a integração de dados, as cadeias de valor podem se tornar automatizadas, integrando empresas, fornecedores, clientes, departamentos (como engenharia e chão de fábrica), funções e recursos.</p>	<p>A integração de sistemas e troca de dados e informações de maneira rápida e eficiente dentro e entre empresas possibilita ganhos de produtividade, redução de custos, aproveitamento de sinergias, maior coordenação nas cadeias de valor e desenvolvimento mais ágil de projetos, produtos e serviços.</p>	<p>Brettel et al. (2014); Rubmann et al. (2015); Dalenogare et al. (2018); Lara et al. (2020); Pérez-Lara et al. (2018); Garrocho et al. (2020).</p>
<p>Internet das Coisas Industrial (IIoT)</p>	<p>Trata-se de uma infraestrutura global ancorada em tecnologias interoperáveis de informação e comunicação que permitem o desenvolvimento de serviços</p>	<p>Decisões autônomas baseadas em parâmetros pré-configurados e em dados coletados por</p>	<p>Kagermann et al. (2011); Rubmann et al. (2015); Majeed e</p>

	<p>avançados por meio da interconexão física e virtual de objetos. Em outras palavras, a IoT é uma tecnologia intuitiva, robusta e escalável que permite a transformação digital do mundo conectado por meio da internet, fornecendo dados relevantes em tempo real para toda a cadeia de valor. Máquinas, equipamentos e dispositivos inteligentes podem se comunicar e interagir com controladores centralizados em sistemas de manufatura.</p>	<p>sensores se tornam possíveis, resultando em respostas muito mais rápidas e adaptações dos sistemas de produção em tempo real. Ganhos de eficiência no uso de máquinas e redução de desperdícios são benefícios evidentes.</p>	<p>Rupasinghe (2017); Manavalan e Jayakrishna (2019).</p>
<p>Computação em nuvem</p>	<p>A computação em nuvem tem o objetivo de proporcionar serviços de tecnologia da informação (p.e., capacidade de processamento, armazenamento e conectividade) sob demanda e com pagamento baseado no uso. Esta tecnologia permite que grandes quantidades de dados sejam armazenadas em uma rede de servidores. Também permite o acesso aos dados de qualquer localização, a qualquer horário, e a partir de diferentes dispositivos e plataformas. A conectividade permite a transmissão de dados de forma instantânea.</p>	<p>A computação em nuvem leva à redução na necessidade de investimentos em equipamentos e recursos tecnológicos, pois o espaço de armazenamento e a capacidade de processamento passam a ser contratados sob demanda. Ganhos de flexibilidade, agilidade e adaptabilidade no uso e análise de dados também aparecem. Essa tecnologia ainda facilita a colaboração cliente-fornecedor e a comunicação entre diferentes setores da organização.</p>	<p>Taurion (2009); Xu (2012); Porter e Heppelmann (2014); Velasquez et al. (2018); Hadwer et al. (2021).</p>
<p>Manufatura aditiva</p>	<p>Pode ser definida como um processo de combinação de materiais para fabricação de objetos a partir de dados de modelo 3D (CAD 3D), geralmente camada sobre camada. A manufatura aditiva converte um modelo CAD 3D</p>	<p>Permite a criação de protótipos e componentes individuais, e possibilita a produção em lotes pequenos e customizados, com vantagens construtivas</p>	<p>Alcisto et al. (2011); Frazier (2014); Rubmann et al. (2015); Weller et al. (2015);</p>

	<p>em camadas. A partir dessa informação, determina a trajetória (linguagem CNC) e os parâmetros de deposição, que posteriormente são processados por quatro componentes básicos: controlador CNC; sistema de movimentação; fonte de energia; e um sistema alimentação do material de adição. Esta definição é amplamente aplicável a todas as classes de materiais, incluindo metais, cerâmicas, polímeros, compostos e sistemas biológicos.</p>	<p>como complexidade e leveza. Traz, ainda, o benefício da flexibilidade na produção por meio da transformação direta de modelos digitais 3D em produtos físicos utilizando máquinas de fabricação ágeis e versáteis, sem a necessidade de ferramentas específicas ou moldes. O seu uso de forma descentralizada pode reduzir custos com logística e estoques, além dos custos marginais de produção e tempos de ciclo e chegada ao mercado.</p>	<p>Maccarthy et al. (2016); Dalenogare et al. (2018).</p>
<p>Robôs autônomos</p>	<p>Os robôs autônomos são capazes de realizar tarefas manuais e cognitivas não rotineiras, aumentando os perfis de trabalho substituíveis e, eventualmente, compensando a escassez de mão de obra no mercado de trabalho. Robôs autônomos podem ainda integrar informações de vários sensores e adaptar seus movimentos, executando diferentes tarefas e fornecendo dados em tempo real para a tomada de decisão.</p>	<p>Estudos mostram a adoção de robôs autônomos em diferentes atividades econômicas, tais como construção civil, hospitais, hotelaria, produção de autopeças e indústria alimentícia. Reduções no tempo com coleta e envios de itens ao longo de uma cadeia de suprimentos e nos custos logísticos são apontados como benefícios.</p>	<p>Gray e Davis (2013); Decker et al. (2017); Tilley (2017); WEF (2019); Pan e Pan (2019); Hussain et al. (2014); Nam et al. (2020); Pillai et al (2021).</p>
<p>Realidade Aumentada (RA)</p>	<p>A Realidade Aumentada (RA) é uma tecnologia que permite sobrepor elementos virtuais à visão da realidade em tempo real. Informações e objetos se sobrepõem ao mundo real,</p>	<p>A tecnologia de RA objetiva melhorar o desempenho humano no desenvolvimento de diferentes atividades, podendo ser adotada</p>	<p>Azuma (1997); Palmarini et al. (2016); Alcácer e Cruz-</p>

	melhorando a percepção de realidade do usuário. Essa tecnologia combina o mundo real com o virtual, é interativa em tempo real e é registrada em 3D. As partes essenciais de um sistema de RA utilizam dispositivos eletrônicos, como óculos de RA, câmeras, fones de ouvido, displays, tablets e projetores para combinar o real ao virtual. Qualquer tipo de hardware que apresente interatividade com os sentidos humanos pode ser utilizado com RA.	para treinamentos, manutenções, projetos de desenvolvimento de produtos, atividades de logística, layout de operações, entre outros. Essa tecnologia facilita a resolução de problemas por meio do aumento da percepção da realidade do usuário.	Machado (2019).
Cibersegurança	Pode-se definir a cibersegurança como um conjunto de procedimentos, práticas e tecnologias que visam detectar, prevenir, proteger e responder a ataques virtuais ao ciberespaço e aos sistemas informatizados.	A cibersegurança evita enormes prejuízos decorrentes de ataques virtuais e/ou vazamento de dados sigilosos das organizações.	Craiggen et al. (2014); Kannus e Ilvonen (2018); Piedrahita et al. (2018); Alcácer e Cruz-Machado (2019).

Fonte: Elaborado pelo autor

2.2. ADOÇÃO E DIFUSÃO DE INOVAÇÕES

Os conceitos de invenção, inovação, adoção e difusão tecnológica são fundamentais para o presente estudo. A invenção pode ser definida como o desenvolvimento de um novo produto ou um novo processo, porém ainda não introduzida no mercado. A inovação, por sua vez, refere-se à invenção colocada em prática e, portanto, disponibilizada no mercado (SCHUMPETER, 1997; TIDD et al., 2005). Uma inovação é uma ideia, prática, método ou produto/serviço percebido como novo por um indivíduo ou firma em um mercado. A novidade percebida pelo indivíduo é o que determina sua reação a esta; se parece nova ao indivíduo, pode ser considerada uma inovação. O aspecto de novidade de uma determinada inovação vai influenciar na difusão

de seu conhecimento, na sua capacidade de persuasão e na decisão de adoção pelos indivíduos (ROGERS, 1983).

Sob a concepção de Schumpeter (1997), produzir consiste em combinar um conjunto de recursos materiais e humanos diante dos métodos que estão disponíveis para a firma. Produzir produtos e serviços com características diferentes, ou os mesmos produtos/serviços de maneiras diferentes, implica, necessariamente, em alterar a forma de combinar os recursos e métodos de produção. Portanto, configuram-se em inovações tecnológicas. As inovações podem originar-se de melhorias marginais na combinação de recursos (inovação incremental) ou de formas completamente novas de combinar os recursos de produção (inovação radical). Em outras palavras, pode-se definir a inovação incremental como uma inovação que incorpora algumas melhorias a produtos/serviços, métodos e processos preexistentes. Por sua vez, a inovação radical, baseada em uma novidade tecnológica ou mercadológica, leva à criação de um novo mercado, podendo acarretar a descontinuidade do mercado existente antes da inovação (TIRONI e CRUZ, 2008).

Na visão de Schumpeter (1997), a inovação, seja ela incremental ou radical, englobaria cinco possibilidades: (1) introdução de um novo bem (novos produtos ou serviços); (2) introdução de novos métodos de produção; (3) abertura de novos mercados; (4) novas fontes de matérias primas e/ou outros recursos de produção; e (5) novas formas de organização em uma empresa ou indústria. Para o mesmo autor, a incorporação dessas inovações no sistema econômico são fundamentais para determinar o crescimento deste sistema no longo prazo.

A adoção da tecnologia, caracterizada pelo uso desta por uma firma ou indivíduo em um dado momento do tempo, é reconhecida como uma etapa separada do processo de inovação. A adoção resulta de um processo decisório individual influenciado por um conjunto de fatores que afetam a percepção do indivíduo sobre a utilidade esperada da tecnologia (SUNDING e ZILBERMAN, 2001; SOUZA FILHO et al., 2011; CARRER et al., 2017). A adoção da inovação por um conjunto de indivíduos ou firmas ao longo do tempo representa a difusão da inovação tecnológica (SCHUMPETER, 1939). E, sem a difusão, os impactos socioeconômicos da inovação seriam bastante limitados (HALL, 2004).

Pode-se ainda compreender a difusão de uma tecnologia como resultado do processo de comunicação entre os indivíduos, no qual uma inovação é levada ao conhecimento dos membros de um determinado sistema econômico ao longo do tempo. A comunicação é um processo em que informações são criadas e compartilhadas entre os agentes envolvidos, buscando um entendimento mútuo sobre a nova tecnologia. Por meio da comunicação, um agente de mudança busca convencer um cliente a adotar uma inovação, ou ainda um cliente pode procurar um agente de mudança com um problema ou necessidade, entendendo a adoção da inovação como possível solução (ROGERS, 1983). Em síntese, a difusão tecnológica pode ser definida como o processo pelo qual inovações, como novos produtos ou serviços, novos processos ou novos métodos de gestão se espalham entre os agentes de um sistema econômico (STONEMAN, 1986).

A difusão das inovações ocorrerá quando a inovação for claramente melhor que o produto, serviço ou processo disponível anteriormente. A difusão também pode retroalimentar o processo de inovação, pois através da aprendizagem, imitação e *feedback*, podem-se melhorar as características da inovação original (HALL, 2004). Os processos de difusão tecnológica podem ser explicados por três abordagens teóricas: (1) abordagem epidêmica; (2) abordagem de classificação; (3) abordagem da ordem de adoção (*order effects*) (SOUZA FILHO et al., 1997; BOCQUET et al., 2007; FOSTER e ROSENZWEIG, 2010; SOUZA FILHO et al., 2011).

A abordagem epidêmica considera a difusão de uma inovação como o resultado da disseminação de informações entre os indivíduos. Nesta abordagem, a velocidade da difusão de uma inovação depende, sobretudo, da frequência dos contatos entre usuários potenciais e usuários reais, e do processo pelo qual os indivíduos são informados sobre a nova tecnologia (GRILICHES, 1957; MANSFIELD, 1961; GEROSKI, 2000). Considera-se que o número de usuários a adquirir uma nova tecnologia está relacionado ao risco de aquisição desta, à rentabilidade esperada, e ao número de potenciais adotantes desta tecnologia. À medida que o número de usuários de uma nova tecnologia aumenta, ocorre uma redução no risco, pois um maior número de adotantes gera mais conhecimento acerca da tecnologia, reduzindo as incertezas a seu respeito (STONEMAN, 1986). A transferência de conhecimento entre usuários e potenciais adotantes de uma inovação é, portanto, fundamental para alavancar a difusão. A difusão de uma nova tecnologia seria análoga à de uma epidemia. A partir do contato entre os indivíduos, o processo de difusão se intensifica e um número cada vez maior de indivíduos adota a tecnologia.

Na abordagem de classificação, as empresas que poderão adotar uma nova tecnologia são classificadas por suas características. O enfoque central desta abordagem é na decisão individual de cada empresa quanto à adoção ou não de uma nova tecnologia. Esta decisão depende de um conjunto de fatores que afetam a utilidade percebida pela firma a partir da adoção (FOSTER e ROSENZWEIG, 2010; CARRER et al., 2017). A maneira pela qual uma inovação será adotada dependerá das características dos adotantes e de atributos percebidos da tecnologia. Rogers (1983) enumera cinco atributos universais percebidos em uma inovação: (1) vantagem relativa: o quanto uma inovação é percebida como melhor que a sua precursora; (2) compatibilidade com os valores existentes, com as necessidades e com as experiências anteriores dos potenciais adotantes; (3) complexidade: facilidade ou dificuldade de utilização da inovação; (4) experimentabilidade: o quanto uma inovação pode ser experimentada antes de sua adoção; e (5) observabilidade: o quanto uma inovação pode ser observada pelos membros da organização.

A experimentabilidade e a observabilidade são características ligadas ao nível de incerteza percebido por um potencial adotante, sendo ainda a observabilidade uma característica chave na escolha de uma nova tecnologia. A complexidade está relacionada às noções de custos e investimentos complementares, sendo que quão maiores forem estes, maior será a complexidade. Por sua vez, a vantagem relativa está relacionada à relação custo-benefício da adoção de uma nova tecnologia (HALL, 2004; ZHANG e AKRAM, 2019).

Rogers (1983) enumera ainda condições externas ou sociais que podem aumentar ou diminuir a velocidade do processo de adoção de uma nova tecnologia: (1) se a tomada de decisão acerca da adoção é individual, coletiva ou vem de uma autoridade central; (2) os canais de comunicação que fornecerão informações sobre uma inovação; (3) a natureza do sistema social no qual estão inseridos os potenciais adotantes, suas normas e grau de interconexão; e (4) a extensão dos esforços dos agentes promotores da mudança (como anunciantes, agências de desenvolvimento, etc.).

Outrossim, são considerados os custos de acesso e transferência de informações, a aversão ao risco do tomador de decisão e um conjunto amplo de características específicas da firma (SOUZA FILHO et al., 2011; CARRER et al., 2017). Neste enfoque, a heterogeneidade dos potenciais adotantes é uma característica fundamental do processo

de adoção e difusão tecnológica. As diferenças na adoção de uma tecnologia se devem a diferentes características das empresas, como tamanho, status, disponibilidade de recursos financeiros e expectativas tecnológicas (BOCQUET et al., 2007).

A terceira abordagem, *order effects*, está baseada na teoria dos jogos. A adoção de uma nova tecnologia depende do número de adotantes anteriores. Para um dado custo de implantação da tecnologia, haverá um número de adotantes além dos quais não será mais lucrativo adotar (KARSHENAS e STONEMAN, 1993), o que significa que o lucro de uma empresa adotante depende da sua posição na ordem de adoção. As primeiras empresas a adotarem uma nova tecnologia obterão lucros maiores devido ao pioneirismo (FUDLUNBERG e TIROLE, 1985). Neste enfoque, a adoção é baseada em interações estratégicas entre as empresas, como na ordem em que as empresas adotam a nova tecnologia, e o número de possíveis outros adotantes (STONEMAN, 1986). Consideram-se os determinantes estratégicos para se entender por que empresas com características de capital similares podem diferir na data da adoção (REINGANUM, 1981). As abordagens de classificação e teoria dos jogos são baseadas no tratamento explícito da decisão de adoção da firma e seus determinantes (BOCQUET et al., 2007).

Alguns autores defendem um modelo de difusão tecnológica que agregue as três abordagens teóricas tradicionais supracitadas. Assim, as características da empresa e da inovação, o número de possíveis adotantes, a ordem de adoção pela empresa, e os efeitos epidêmicos da disseminação de informações explicariam a difusão de uma inovação, sintetizando as três abordagens anteriores (BOCQUET et al., 2007; ALSHAMAILA et al., 2013; PIARALAL et al., 2015; MAROUFKHANI et al., 2020; KIMIAGARI e BAEI, 2021).

De fato, o modelo teórico TOE (*Technology-Organization-Environment*, ou Tecnologia-Organização-Ambiente) integra elementos das diferentes abordagens de difusão de inovações para explicar os determinantes das decisões de adoção pelas firmas. Esse modelo considera simultaneamente três dimensões que impactam nas decisões de adoção de uma inovação pelas firmas de uma indústria: (1) características percebidas da tecnologia; (2) fatores estruturais, estratégicos e organizacionais das firmas; (3) características dos ambientes econômico, tecnológico, institucional e geográfico. Por contemplar aspectos das diversas dimensões que afetam a adoção de inovações, o modelo teórico TOE tem sido empregado para analisar a adoção de tecnologias digitais da

Indústria 4.0, inclusive por pequenas e médias empresas (BAKER, 2012; LIN, 2014; PAN e PAN, 2019; MAROUFKHANI et al., 2020; HADWER et al., 2021; KIMIAGARI e BAEI, 2021). O presente trabalho segue esse caminho e utiliza variáveis que representem as três dimensões do modelo teórico TOE para comparar empresas adotantes e não adotantes de tecnologias da Indústria 4.0.

Em primeiro lugar, consideram-se as características da tecnologia, tais como vantagem relativa, compatibilidade, complexidade e observabilidade. A percepção destas características pela firma é determinante na tomada de decisão de adoção da inovação. Por exemplo, se uma firma percebe que uma inovação é compatível com suas competências e rotinas internas já desenvolvidas, ela tende a adotar essa tecnologia mais rapidamente do que uma firma que não percebe esta compatibilidade na inovação (LEE e SHIM, 2007; RAMDANI et al., 2009).

Em segundo lugar, assume-se que a heterogeneidade entre as organizações é importante para determinar a adoção de inovações. As características internas, estruturais e organizacionais da empresa podem inibir ou facilitar a adoção de inovações. Assim, fatores como tamanho da firma, capacitação dos recursos humanos, habilidades no uso de recursos físicos, fontes de acesso à informação, cultura organizacional, formas de relacionamento com *stakeholders* e capacidade de adaptação seriam determinantes nas decisões de adoção de inovações (WEI et al., 2015; PIARALAL et al., 2015; REYES et al., 2016; PAN e PAN, 2019; MAROUFKHANI et al., 2020; HADWER et al., 2021; KIMIAGARI e BAEI, 2021).

Por último, as características do ambiente em que as firmas se encontram também impactam nas decisões de adoção de uma inovação. Fatores exógenos dos ambientes institucional, econômico e geográfico podem restringir ou facilitar a difusão da tecnologia. Neste caso, consideram-se fatores como condições de acesso às políticas públicas, nível de regulação do mercado, estrutura de concorrência do mercado, condições de infraestrutura e disponibilidade de fatores de produção (THONG, 1999; ZHU et al., 2003; BAKER, 2012; SILA, 2013; RAMDANI et al., 2013; WEI et al., 2015; PIARALAL et al., 2015; REYES et al., 2016; PAN e PAN, 2019; MAROUFKHANI et al., 2020; HADWER et al., 2021; KIMIAGARI e BAEI, 2021).

Como já mencionado, este trabalho utiliza variáveis que representem as três dimensões do modelo teórico TOE para comparar empresas adotantes e não adotantes de

tecnologias da Indústria 4.0, bem como para testar o efeito de alguns fatores sobre a utilização destas tecnologias. A Figura 1 apresenta o modelo teórico TOE aplicado às tecnologias da Indústria 4.0, o qual sustenta as análises empíricas desse estudo.

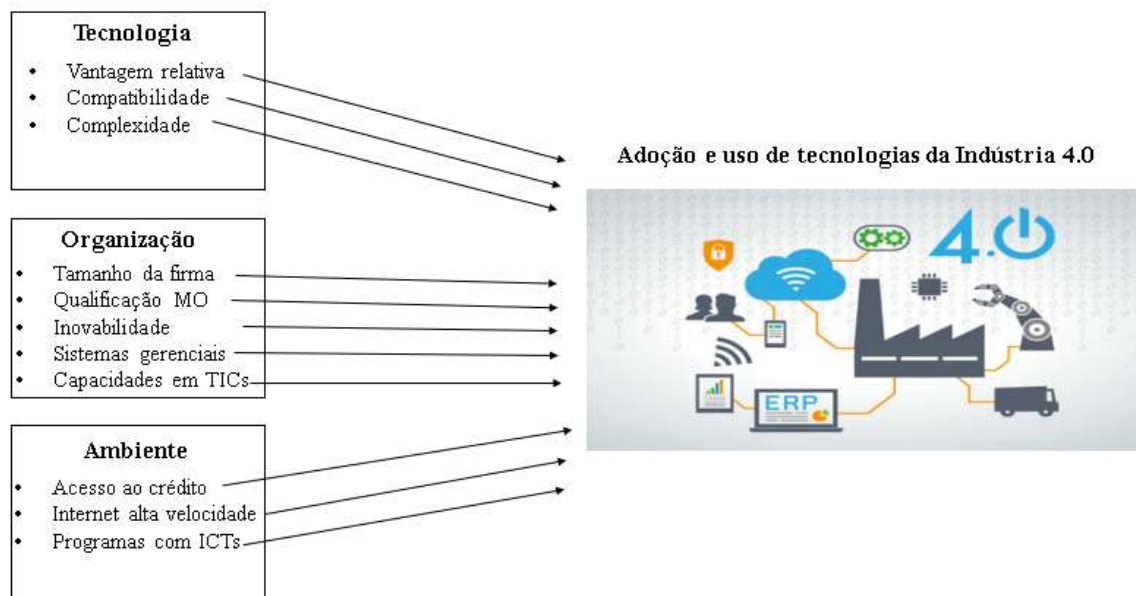


Figura 1: Modelo TOE aplicado às decisões de adoção de tecnologias da Indústria 4.0.
Fonte: Elaborado pelo autor

2.3. BARREIRAS À ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0

As barreiras à adoção de uma inovação são fatores que dificultam ou mesmo inviabilizam o processo de adoção da tecnologia pelos potenciais adotantes. Uma inovação pode trazer grandes mudanças na organização da firma, interrompendo rotinas estabelecidas e, conseqüentemente, causando resistências internas à sua adoção. Inovações que causam mudanças consideráveis na estrutura organizacional da firma são consideradas descontínuas; quanto maior a descontinuidade da nova tecnologia, maior poderá ser a resistência da firma na adoção. A resistência também será maior se a inovação entrar em conflito com crenças e hábitos anteriores fortemente constituídos na organização (RAM e SHETH, 1989). Ademais, diversos outros fatores, internos ou externos à firma, podem se constituir em barreiras à adoção de uma inovação. Esses fatores aumentam os custos de adoção da tecnologia (PARENTE e PRESCOTT, 1994). De uma forma geral, quatro grandes grupos de barreiras ao processo de adoção de uma inovação são considerados na literatura:

(1) Barreiras econômicas: fatores econômicos, como o investimento inicial, o retorno esperado e os custos marginais da adoção são considerados e avaliados pelos potenciais adotantes. A necessidade de elevado investimento inicial e a alta incerteza na composição dos fluxos de caixa podem se constituir em significativas barreiras à adoção de uma inovação pelas firmas. A própria falta de dados e estudos disponíveis sobre os benefícios e custos de uma inovação também é uma barreira econômica à adoção (SOUZA FILHO et al., 2010; CARRER et al., 2017).

(2) Barreiras operacionais: os potenciais adotantes avaliam as características da tecnologia (complexidade no uso, adaptabilidade, estágio de desenvolvimento da tecnologia, etc.), os riscos operacionais (p.e., problemas de cibersegurança) e os impactos destes dois fatores sobre a firma. Tecnologias com alta complexidade de uso e com riscos operacionais consideráveis demandam esforços igualmente consideráveis dos potenciais adotantes, o que muitas vezes pode inviabilizar a adoção. Ademais, a escassez de capital humano com competências e motivações necessárias para operar as novas tecnologias tem sido reportada como importante barreira operacional à adoção de inovações (ALI e MILLER, 2017; STENTOFT et al., 2020; TORTORELLA et al., 2020).

(3) Barreiras culturais/psicológicas: podem surgir conflitos de uma nova tecnologia com crenças, tradições e cultura enraizadas em uma organização. Além disso, desconforto, insegurança e percepções equivocadas/falta de conhecimento sobre a tecnologia podem criar barreiras psicológicas e inviabilizar sua adoção (PARASURAMAN, 2000; SOUZA e LUCE, 2005; PORTER e DONTU, 2006; ANTIOCO e KLEIJNEN, 2010; PIRES et al., 2011). A falta de disposição do tomador de decisão em assumir os riscos com a implantação da tecnologia e o apoio inadequado da alta administração também podem se constituir em barreiras culturais à adoção de inovações.

(4) Barreiras institucionais: o ambiente institucional, definido como o conjunto de leis, normas, costumes e regras que restringem o comportamento dos indivíduos (NORTH, 1994), pode dificultar a adoção de inovações pelas firmas. A ausência de um ambiente regulatório claro, de direitos de propriedade bem definidos e de uma legislação tributária adequada podem aumentar consideravelmente os custos de transação e os riscos de adoção de uma inovação, configurando-se em barreiras à adoção (PARENTE e PRESCOTT, 1994).

A Figura 2 sintetiza as três categorias de barreiras à adoção de tecnologias pelas firmas.

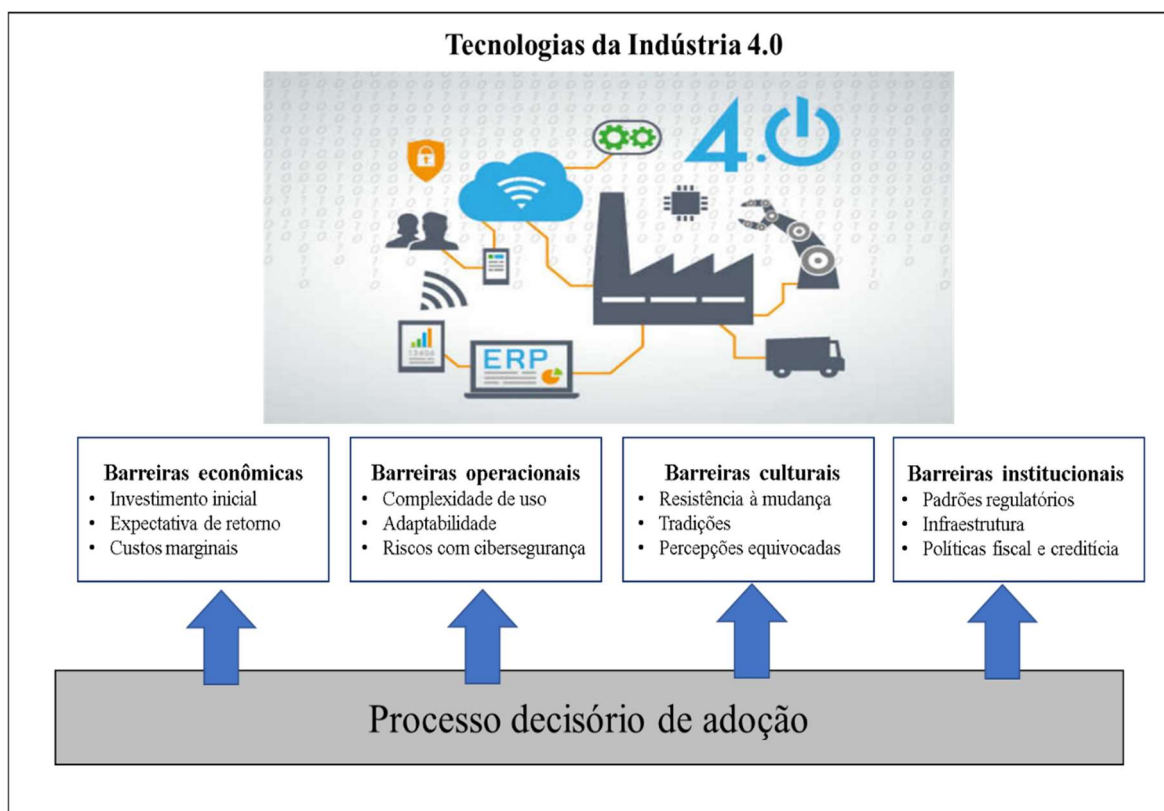


Figura 2: Barreiras à adoção de tecnologias.

Fonte: Elaborado pelo autor

Estudos indicam que a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 é um processo complexo e que muitas empresas em diferentes países estão enfrentando problemas devido a diferentes barreiras (LUTHRA e MANGLA, 2018; DALENOGARE et al., 2018; TORTORELLA et al., 2020). Portanto, a identificação e avaliação das principais barreiras à adoção das tecnologias da Indústria 4.0 tem sido tratada como fundamental para aumentar a difusão destas tecnologias em diferentes países (SCHWAB, 2017; MULLER et al., 2018; XU et al., 2018; HORVÁTH e SZABÓ, 2019; TORTORELLA et al., 2020; RAJ et al., 2020). A seguir, são apresentadas e discutidas as principais barreiras encontradas na revisão de literatura.

2.3.1 Barreiras Econômicas

2.3.1.1 Altos investimentos para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0

As empresas que tem a intenção de adotar as tecnologias pertencentes à Indústria 4.0 precisam aumentar consideravelmente o investimento em equipamentos, processos, pessoas e conhecimento. Esses investimentos devem contemplar todos os níveis hierárquicos da empresa e, eventualmente, da cadeia de valor (GEISSBAUER et al., 2014; KACHE e SEURING, 2017; RAJ et al., 2020). Para que o benefício de algumas tecnologias da Indústria 4.0 seja maximizado, podem ser necessários investimentos adicionais em pesquisa e desenvolvimento (BREUNIG et al., 2016). Por exemplo, os ganhos econômicos decorrentes da adoção de manufatura aditiva (impressão 3D) podem estar fortemente correlacionados com o desenvolvimento de novos produtos. Em países com renda per capita mais baixa, os produtos mais consumidos são geralmente aqueles com menor valor agregado. Esta característica pode, portanto, influir diretamente na propensão a investimentos em tecnologia. As empresas tendem a focar em tecnologias já estabelecidas, e mais baratas, em detrimento de tecnologias avançadas, tais como aquelas provenientes da Indústria 4.0 (NAKATA e WEIDNER, 2012; DALENOGARE et al., 2018). De fato, Dalenogare et al. (2018) relataram que empresas brasileiras tinham expectativa de que seriam necessários altos investimentos em tecnologias digitais para aproveitar-se dos potenciais benefícios da Indústria 4.0.

2.3.1.2 Falta de clareza em relação a benefícios econômicos e ganhos de produtividade

A variação na produtividade é uma medida fundamental da contribuição de uma tecnologia para os potenciais adotantes. Tecnologias com efeito positivo sobre a produtividade dos fatores de produção tendem a gerar benefícios econômicos (redução no custo total médio e aumento no lucro) para as empresas. No entanto, nem sempre esses efeitos estão claramente avaliados e informados para os potenciais adotantes. Brynjolfsson (1993) e Stolarick (1999) apresentam alguns questionamentos sobre a viabilidade econômica dos investimentos em tecnologias da informação. O chamado paradoxo da produtividade, relacionado ao efeito da adoção de tecnologias, acaba trazendo incertezas acerca dos benefícios obtidos a partir do investimento nestas (RAJ et al., 2020). A falta de clareza quanto ao retorno obtido com o investimento nas diferentes

tecnologias disponíveis pode, de fato, ser considerada uma das maiores barreiras à difusão da Indústria 4.0 (LUTHRA e MANGLA, 2018).

2.3.2. Barreiras Operacionais

2.3.2.1 Desafios na integração vertical e horizontal

A dificuldade de integração e coordenação das ações entre departamentos e unidades organizacionais constitui-se em um obstáculo relevante à adoção das tecnologias da Indústria 4.0. Este efeito tende a ser amplificado ao longo de uma cadeia de valor composta por outros participantes, quando é exigida essa integração (BREUNIG et al., 2016; RAJ et al., 2020). A digitalização e integração vertical devem passar pelo pedido digital, desenvolvimento personalizado do produto e transferência automatizada dos dados para sistemas de planejamento e manufatura. Estes dados devem ser integrados horizontalmente com fornecedores, parceiros e clientes ao longo da cadeia de valor (GEISSBAUER et al., 2014). As empresas precisam se tornar mais inteligentes e integradas, porém a maioria falha devido à má integração ao longo da cadeia de valor (MAJEED e RUPASINGHE, 2017), o que pode ser explicado pelo baixo nível de digitalização destas (DALENOGARE et al., 2018).

2.3.2.2 Risco de falhas de cibersegurança

A crescente conectividade cria um aumento da preocupação com os riscos de segurança e compartilhamento de informações entre os diversos atores na cadeia de valor (GEISSBAUER et al., 2014; RAJ et al., 2020; TORTORELLA et al., 2020). À medida em que aumentam o número e a variedade de dispositivos conectados a redes de internet das coisas, aumentam também as ameaças potenciais de ataques de hackers (LEE e LEE, 2015).

Para o funcionamento de sistemas em ambientes digitais, os participantes precisam ter confiança em relação à segurança de seus dados, os quais não poderão ser perdidos ou acessados por pessoas não autorizadas. Essa proteção exige das empresas altos investimentos, servidores protegidos e servidores de backup, visando à prevenção de roubo de ideias de inovação ou outras informações estratégicas (BREUNIG et al., 2016; TURKES et al., 2019). A acessibilidade a sistemas deve ser protegida de ameaças de fontes internas, como funcionários descontentes ou erro humano, e de fontes externas,

como hackers e terroristas cibernéticos, e as empresas devem avaliar o risco e determinar se estes serão aceitos (XU et al., 2018). Em muitos casos, a falta de confiança na segurança dos dados e/ou a necessidade de altos investimentos em cibersegurança se tornam barreiras significativas à adoção das tecnologias da Indústria 4.0 (XU et al., 2018; TURKES et al., 2019; RAJ et al., 2020).

2.3.2.3 Baixo nível de maturidade de uma tecnologia

Há vários níveis que uma nova tecnologia deve superar até fazer parte de sistemas ou subsistemas para ser utilizada com segurança no mercado. Ademais, mesmo depois de disponibilizada no mercado, pode levar um tempo até que todas as funcionalidades da tecnologia estejam devidamente desenvolvidas e se tornem claras para os potenciais usuários. O nível de maturidade de uma tecnologia, portanto, varia ao longo do tempo. As tecnologias da Indústria 4.0 com baixo nível de maturidade podem gerar problemas de padronização de sistemas, segurança de dados e comunicação. Se mal projetados, dispositivos multifuncionais e aplicativos colaborativos podem gerar muitos problemas para os adotantes. Devido à alta conectividade, um erro em uma parte do sistema pode prejudicar todo o seu funcionamento ao gerar uma reação em cadeia (LEE e LEE, 2015).

2.3.2.4 Desafios na garantia da qualidade dos dados

Com a forte interconexão de processos, departamentos e empresas (integrações vertical e horizontal), uma grande quantidade de dados complexos e heterogêneos é gerada na organização. A qualidade e a precisão desses dados são fundamentais para determinar as decisões a serem tomadas. Se os dados forem de baixa qualidade, análises preditivas de baixa consistência poderão produzir decisões equivocadas (LOHR, 2012; RAJ et al., 2020). A integridade, confiabilidade e consistência dos dados é, portanto, um desafio para as organizações que adotam tecnologias da Indústria 4.0 (KHAN, 2014). Problemas com a qualidade dos dados têm se tornado mais evidentes, prejudicando as decisões nas organizações e, conseqüentemente, gerando má alocação de recursos (WANG et al., 2008). Diante dos desafios e dificuldades supracitados, muitas empresas podem ter incertezas quanto à qualidade e confiabilidade dos dados, restringindo a adoção das tecnologias da Indústria 4.0.

2.3.3. Barreiras Culturais

2.3.3.1 *Falta de conhecimento sobre as tecnologias*

A falta de conhecimento sobre as tecnologias da Indústria 4.0 e a baixa compreensão da importância estratégica das tecnologias digitais foram consideradas barreiras proeminentes enfrentadas por pequenas e médias empresas da Romênia (TÜRKEŞ et al., 2019). No Brasil, o panorama não é muito diferente (TORTORELLA et al., 2020). Segundo pesquisa da FIESP e SENAI (2018), o assunto “Indústria 4.0” é pouco conhecido pelas empresas brasileiras. De uma amostra de 277 empresas, 89 afirmaram que não conheciam o conceito e as tecnologias da Indústria 4.0. De fato, algumas das tecnologias apresentadas na seção 2.1 são bastante complexas e não fazem parte da realidade de uma parcela significativa de pequenas e médias empresas nacionais. Bueno et al. (2020) reforçam esse problema e recomendam uma melhor avaliação do nível de conhecimento de empresas brasileiras sobre as tecnologias da Indústria 4.0, o qual pode se constituir em importante barreira à maior difusão destas tecnologias.

2.3.3.2 *Falta de cultura digital interna e treinamento*

A real captura de valor decorrente das tecnologias da Indústria 4.0 se dá por meio do forte desenvolvimento das capacidades internas e do estabelecimento de equipes multifuncionais. Não basta apenas contratar profissionais com as competências necessárias para operar as tecnologias. O treinamento de equipes multifuncionais com alto poder de colaboração e solução de problemas é de grande importância. Para isso, é necessária uma cultura interna aberta à mudança e à experimentação. A mudança da cultura da empresa é determinante para a implementação da transformação digital. Sem o desenvolvimento de uma cultura digital em toda a organização, há sérias dificuldades com o uso das tecnologias da Indústria 4.0 (SCHUH et al., 2017). Ademais, a força de trabalho precisará estar em constante evolução para compreender e gerenciar a crescente complexidade dos sistemas digitais. Para isso, programas internos e externos de orientação, treinamento e avaliação dos funcionários devem ser implantados pelas empresas (RAS et al., 2017).

2.3.3.3 Resistência à mudança

Incorporar novas tecnologias em ambientes, estruturas ou modelos de negócios é um desafio. Funcionários que exercem atividades operacionais e alta administração podem não estar dispostos a mudar suas rotinas e formas de trabalhar, o que gera resistência ao uso de novas tecnologias e às práticas associadas a elas (HADDUD et al., 2017, RAJ et al., 2020). A falta de familiaridade e segurança das empresas com relação à Indústria 4.0 também cria uma resistência à mudança e, por falta de conhecimento em relação ao tema, ocorre relutância à adoção destas novas tecnologias digitais (LUTHRA e MANGLA, 2018). Outra possível resistência pode surgir devido à grande quantidade de dados pessoais coletados e ao risco de violações de privacidade desses dados (LEE e LEE, 2015).

2.3.3.4 Falta de uma estratégia digital

A implantação da digitalização é uma decisão estratégica, que dificilmente terá sucesso sem o apoio da alta administração e da gerência da empresa (RAJ et al., 2020). Os gestores devem estabelecer metas claras, apontar maneiras para atingir-se os objetivos e criar mecanismos para manter o nível de motivação dos funcionários. A atuação dos líderes determinará o sucesso ou não das mudanças. Se na fase de mudanças muito for exigido dos funcionários devido a prazos mal calculados, poderá ser causado estresse dentro da organização, e por consequência, aumento da resistência à mudança (GUPTA, 2018). A restrição de recursos, que ocorre principalmente nas pequenas e médias empresas, se apresenta como um grande desafio em relação à definição de uma boa estratégia digital. Além disso, algumas empresas simplesmente rejeitam o uso da digitalização como um modelo de negócio (SCHRODER, 2016; RAJ et al., 2020).

2.3.4. Barreiras Institucionais

2.3.4.1 Falta de padrões regulatórios e normas institucionalizadas

A cautela das pequenas e médias empresas em relação à mudança para as novas tecnologias e sistemas integrados pode ser atribuída à falta de padrões e normas institucionalizados. Padrões e normas mais seguros são condição necessária para o aumento do número de parceiros em uma rede digital, e conseqüentemente, para o maior desenvolvimento do potencial econômico da Indústria 4.0. A falta de padrões limita a

atuação das pequenas e médias empresas, que acabam, na maior parte dos casos, tendo que adaptar-se ao padrão das grandes empresas das quais são fornecedores (SCHRODER, 2016).

Regras sobre coleta, processamento, direitos de acesso e venda de dados ainda não são bem definidas na maioria dos países. A análise de grandes volumes de dados gera benefícios, mas também preocupações, principalmente com relação à privacidade. O avanço contínuo das tecnologias digitais gera desafios para reguladores e legisladores, que precisam adequar o funcionamento das instituições às novas demandas criadas neste novo paradigma de conectividade industrial (SCHWAB, 2017; BOGOVIZ et al., 2019; RAJ et al., 2020). Raj et al. (2020) ressaltam que a falta de padrões regulatórios e normas bem definidas é uma das barreiras mais relevantes à adoção de tecnologias da Indústria 4.0, sobretudo em países emergentes.

2.3.4.2 Ameaça de interrupção dos empregos existentes

O deslocamento de recursos humanos em decorrência das inovações digitais é um desafio relevante nas esferas social, institucional e organizacional (O'HALLORAN e KVOCHKO, 2015; HADDUD et al., 2017; XU et al., 2018; RAJ et al., 2020). A transformação digital aumenta a discussão acerca do futuro dos empregos. Questões relacionadas às habilidades exigidas, empregos ameaçados, mudanças na legislação trabalhista e novos perfis de trabalho emergentes se tornaram bastante relevantes (COTTONG, 2016). Os avanços da Indústria 4.0 têm o potencial de perturbar o mercado de trabalho (SHWAB, 2017). Empregos pouco qualificados e com baixos salários são os que terão maior chance de substituição, ao contrário dos que exigem mais habilidades e são mais bem pagos (XU et al., 2018). A própria dinâmica do trabalho pode se alterar, gerando pressões para mudanças nas instituições que regulamentam o mercado de trabalho.

Assim, é importante explorar formas de envolver os recursos humanos existentes ao invés de deslocá-los ou substituí-los (IANSITI E LAKHANI, 2014; HADDUD et al., 2017). Ademais, é premente antecipar os novos e diferentes tipos de empregos que serão criados, os quais tendem a demandar criatividade, pensamento crítico e colaboração (O'HALLORAN e KVOCHKO, 2015). A ameaça de interrupção dos empregos existentes pode gerar fortes resistências à mudança nas organizações e pressões

institucionais para frear a dinâmica de difusão das inovações, se constituindo em uma barreira à adoção das tecnologias da Indústria 4.0.

2.3.4.3 Escassez de capital humano com habilidades digitais

A falta de habilidades e conhecimentos em tecnologias digitais é um dos grandes desafios enfrentados na implementação da Indústria 4.0. Essa escassez reduz o potencial de aproveitamento econômico e operacional das tecnologias (BREUNIG et al., 2016; RAJ et al., 2020). A digitalização tem alterado os requisitos da mão de obra em todas as etapas da cadeia de valor, tais como no desenvolvimento de produto, na produção e nos setores de compras e vendas. Novos processos e modelos de negócios exigem novas habilidades, competências e qualificações, como por exemplo, programação em diferentes plataformas, gestão de interfaces digitais modernas, gerenciamento de grandes bases de dados, análise estatística de dados e desenvolvimento de sistemas digitais seguros (GEISSBAUER et al., 2014; GEHRKE et al., 2015; PINZONE et al., 2017). Funcionários com essas capacidades requeridas são bastante demandados no mercado, o que aumenta os valores necessários para contratá-los e mantê-los na organização (BREUNIG et al., 2016). Apesar de a manufatura estar avançando rapidamente para a Indústria 4.0, ainda há uma falta de conhecimento sobre a evolução dos perfis de trabalho, habilidades e competências (PINZONE et al., 2017). Assim, a escassez de mão de obra com as competências requeridas pode ser uma barreira de alta relevância para a adoção das tecnologias da Indústria 4.0, sobretudo para empresas de países em desenvolvimento (RAJ et al., 2020; TORTORELLA et al., 2020).

2.3.4.4 Falta de infraestrutura

Infraestrutura de internet em banda larga e com alta velocidade é primordial para a Indústria 4.0. Dificuldade de acesso a uma banda larga confiável é um problema que atinge principalmente as pequenas e médias empresas; grandes empresas dispõem de mais recursos, e conseqüentemente, melhores tecnologias à sua disposição (SCHRODER, 2016). As tecnologias de integração exigem que todos os membros da cadeia de valor estejam conectados, portanto a infraestrutura digital é um fator importante e que não pode ser ignorado (RAJ et al., 2020).

Apresentado a seguir, o quadro 2 sintetiza as principais barreiras à adoção das tecnologias da Indústria 4.0 apresentadas e discutidas nesta subseção.

Quadro 2: Principais barreiras à adoção de tecnologias da Indústria 4.0

Barreiras Econômicas		
Barreira	Significado	Referências
Alto investimento necessário	A implementação das tecnologias da Indústria 4.0 demanda grande quantidade de capital para que seus benefícios sejam aproveitados.	Nakata e Weidner (2012); Geissbauer et al. (2014); Breunig et al. (2016); Kache e Seuring (2017); Dalenogare et al. (2018); Raj et al. (2020).
Falta de clareza sobre benefícios econômicos	Benefícios econômicos (aumento de produtividade e redução de custo médio, pe.) não são tão claros, e a incerteza quanto aos retornos se configura em uma barreira à adoção.	Brynjofsson (1993); Stolarick (1999); Luthra e Mangla (2018); Raj et al. (2020).
Barreiras Operacionais		
Dificuldade na integração entre departamentos e ao longo da cadeia de valor	Dificuldade na troca de informações/integração entre os diversos departamentos de uma organização, e entre as organizações que compõe as cadeias de valor.	Geissbauer et al. (2014); Breunig et al. (2016); Majeed e Rupasinghe (2017); Dalenogare et al. (2018); Raj et al. (2020).
Risco de falhas na cibersegurança	Sistemas altamente interconectados ficam mais expostos a ataques cibernéticos, aumentando a resistência das empresas em compartilhar dados com terceiros.	Geissbauer et al. (2014); Lee e Lee (2015); Breunig et al. (2016); Xu et al. (2018); Turkes et al. (2019); Raj et al. (2020); Tortorella et al. (2020).
Baixo nível de maturidade de uma tecnologia	Tecnologias que ainda não estão bem desenvolvidas podem causar falhas nos sistemas interligados e nas cadeias de valor	Lee e Lee (2015).

Qualidade do grande volume de dados	Grandes volumes de dados são obtidos a partir das diversas tecnologias utilizadas. Se esses dados forem de baixa qualidade, podem levar a decisões equivocadas. Essa incerteza restringe a adoção das tecnologias.	Wang et al. (2008); Lohr (2012); Khan et al. (2014); Raj et al. (2020).
Barreiras Culturais		
Falta de conhecimento sobre as tecnologias	A falta de conhecimento sobre as tecnologias da Indústria 4.0 e sua importância estratégica podem se constituir em importante barreira à adoção destas	FIESP e SENAI (2018); Turkes et al. (2019); Bueno et al. (2020); Tortorella et al. (2020).
Falta de uma cultura digital e de treinamento	Sem uma cultura digital dentro da empresa, haverá grande dificuldade no uso das tecnologias da Indústria 4.0. A força de trabalho deve estar em constante evolução, caso contrário não conseguirá acompanhar o aumento de complexidade dos sistemas digitais.	Schuh et al. (2017); Ras et al. (2017).
Resistência à mudança	Empresas que tradicionalmente operam da mesma maneira a anos tendem a resistir a mudanças, e a coleta de dados pessoais tende a aumentar essa resistência.	Lee e Lee (2010); Haddud et al. (2017); Luthra e Mangla (2018); Raj et al. (2020).
Falta de uma estratégia digital	Empresas que não tem uma estratégia a seguir para análise, desenvolvimento e execução de novas capacidades, ou que não dispõe de recursos necessários enfrentarão problemas no ambiente da Indústria 4.0.	Schroder (2016); Gupta (2018); Raj et al. (2020).
Barreiras Institucionais		
Falta de padrões regulatórios e normas institucionalizadas	A falta de padrões e normas gera insegurança quanto a dados e privacidade, e acaba por restringir o número de participantes em redes digitais, e o desenvolvimento do potencial econômico das tecnologias.	Schroder (2016); Schwab (2017); Bogoviz et al. (2019); Raj et al. (2020); Tortorella et al. (2020).
Alteração nos empregos	O deslocamento dos recursos humanos é um desafio nas esferas social, institucional e organizacional, e os avanços da Indústria 4.0 tem o potencial de perturbar o mercado de trabalho.	Lansiti e Lakhani (2014); O'Halloran e Kvochko (2015); Cottong (2016); Haddud et al. (2017); Shwab (2017); Xu et al. (2018); Raj et al. (2020).

Falta de capital humano e habilidades digitais	Os funcionários da indústria ainda não possuem as habilidades necessárias para operarem as novas tecnologias, o que mudará a demanda do mercado de trabalho, e a escassez dessas habilidades se torna uma barreira importante.	Geissbauer et al. (2014); Gehrke et al. (2015); Breunig et al. (2016); Pinzone et al. (2017); Raj et al. (2020); Tortorella et al. (2020).
Falta de infraestrutura adequada	A indústria como um todo não possui a infraestrutura tecnológica necessária para a Indústria 4.0. Grandes empresas podem montar essa infraestrutura, mas para médias e pequenas é uma tarefa difícil, comprometendo a cadeia de valor.	Schroder (2016); Raj et al. (2020).

Fonte: Elaborado pelo autor

3. METODOLOGIA

3.1. Pesquisa de Campo

A estratégia metodológica de obtenção de dados e informações do presente trabalho pode ser dividida em quatro etapas: (1) revisão de literatura das tecnologias da Indústria 4.0 e das teorias de adoção de inovações; (2) entrevistas semiestruturadas com agentes-chave do sistema de inovação e difusão de tecnologias da Indústria 4.0 do estado de São Paulo; (3) elaboração de um questionário estruturado para a coleta dos dados primários; (4) aplicação de questionários estruturados junto a uma amostra de pequenas e médias empresas do estado de São Paulo para a coleta de dados primários do ano fiscal de 2021 (*cross-sectional survey*).

A revisão de literatura teve o objetivo de apresentar um panorama das publicações envolvendo as características das principais tecnologias da Indústria 4.0. Foram pesquisados trabalhos publicados em periódicos indexados às bases Scopus, Web of Science e Scielo, utilizando-se os termos “Indústria 4.0”, “tecnologias da Indústria 4.0”, e “barreiras à adoção de tecnologias”, tanto em português quanto em inglês. A partir dessa pesquisa inicial de termos, buscou-se também por tecnologias e barreiras de maneira mais específica, como por exemplo, “Big Data”, “Integração Vertical e Horizontal”, “Barreiras Econômicas”, também usando termos em português e inglês.

Foram revisados 114 artigos, o que permitiu a sistematização das características e potenciais benefícios das tecnologias da Indústria 4.0.

Na sequência, foram entrevistados dois agentes chave em desenvolvimento de tecnologias da Indústria 4.0 no Brasil, a saber: (1) o CEO de uma das maiores empresas nacionais especializada em soluções MES (*Manufacturing Execution System*), IoT (*Industrial Internet of Things*) e de Automação Industrial; e (2) o gerente de integração, informação e *Business Intelligence* (BI) de uma empresa especializada em soluções tecnológicas com máquinas e equipamentos inteligentes. As entrevistas semiestruturadas foram realizadas de forma remota por meio da utilização da ferramenta Google Meet para a interação entre entrevistado e entrevistadores. As entrevistas tiveram duração de aproximadamente 2 horas.

A partir da revisão de literatura e das entrevistas semiestruturadas, elaborou-se um questionário estruturado para ser aplicado junto a uma amostra de empresas que operam no setor metalúrgico, com usinagem de peças. O questionário estruturado está dividido em três seções (Anexo A). A primeira aborda um conjunto de características das empresas e do ambiente em que operam, tais como número de funcionários, disponibilidade de funcionários com qualificação em TICs, adoção de softwares de gestão (ERP, p.e.), tempo de operação no mercado, disponibilidade de internet com alta velocidade, cooperação com universidades e institutos de pesquisa, acesso à política de crédito industrial, etc. A segunda seção do questionário aborda o nível de conhecimento, as percepções e a intenção de adoção de algumas tecnologias da Indústria 4.0, quais sejam: Big Data, Internet das Coisas, Sistemas Informatizados para Integração Vertical e Horizontal e Computação em Nuvem. Essas tecnologias foram escolhidas após as entrevistas com os agentes chave e testes piloto do questionário com o objetivo de reduzir o tamanho do questionário. A terceira seção aborda as principais barreiras percebidas pelas empresas para a adoção dessas tecnologias.

A amostra de empresas foi definida a partir da obtenção de uma lista com 170 empresas que operam no setor metalúrgico com processo de usinagem de peças. A lista foi obtida junto a um fornecedor de ferramentas de corte para usinagem, que presta atendimento a essas empresas. Vale ressaltar que, diante da inexistência de listas oficiais com o registro de empresas do setor, essa foi a melhor (e única) estratégia encontrada para coletar os dados. A partir dessa lista, 68 empresas foram contatadas por telefone e

por e-mail, concordando em participar da pesquisa, e 30 destas empresas responderam ao questionário estruturado. O questionário foi aplicado de forma virtual por meio da plataforma *Google Forms* entre setembro e dezembro de 2021, obtendo-se um total de 30 respostas completas. Os dados coletados e analisados referem-se ao ano fiscal de 2021.

3.2. Análise dos dados

A partir das respostas obtidas, os dados foram tabulados, inspecionados e analisados por meio de estatísticas descritivas e um modelo econométrico de regressão de dados de contagem. As estatísticas descritivas são utilizadas para a comparação de variáveis representativas das três dimensões do modelo teórico TOE entre as empresas que adotaram e aquelas que não adotaram as tecnologias da Indústria 4.0. A Tabela 1 apresenta as variáveis utilizadas na análise empírica.

Tabela 1. Variáveis utilizadas para a comparação das empresas adotantes e não adotantes de tecnologias da Indústria 4.0

Variável	Descrição
1. Características organizacionais	
Tempo no mercado	Tempo, em anos, em que a empresa atua no mercado
Número funcionários	Número total de funcionários do quadro de pessoal da empresa
Qualificação funcionários	Variável de escala likert (1 - muito baixo; 5 - muito alto) obtida a partir do questionamento: "Avalie, no geral, o grau de qualificação da mão de obra da empresa"
Funcionários em TIC	Variável binária com valor 1 para empresas que possuem funcionários especializados em tecnologias de informação e comunicação; e 0 caso contrário
Consultoria TI	Variável binária com valor 1 para empresas que contratam serviços de consultoria/assessoria na área de tecnologia da informação; e 0 caso contrário
Máquinas com CNC	Número de máquinas com comando numérico computadorizado (CNC) que a empresa possui
Internet banda larga	Variável binária com valor 1 para empresas que possuem acesso à internet de banda larga; e 0 caso contrário
ERP	Variável binária com valor 1 para empresas que adotam sistemas ERP (<i>Enterprise Resources Planning</i>); e 0 caso contrário
MRP	Variável binária com valor 1 para empresas que adotam sistemas MRP (<i>Material Requirement Planning</i>); e 0 caso contrário

Testa tecnologias Variável de escala likert (1 - discordo totalmente; 5 - concordo totalmente) obtida a partir da seguinte afirmação: “a empresa costuma testar novas tecnologias e práticas organizacionais com frequência”

Acessa informação Variável binária com valor 1 para empresas cuja alta gerência costuma buscar informações de produção, mercado, tecnologias e políticas públicas; e 0 caso contrário

2. Características do ambiente tecnológico

Programas ICT's Variável binária com valor 1 para empresas que participam de programas de cooperação com Universidades, Institutos de Ciência e Tecnologia ou Agências de Fomento à Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico; e 0 caso contrário

Acessa crédito Variável binária com valor 1 para empresas que acessaram crédito para compra de máquinas, equipamentos e novas tecnologias com frequência; e 0 caso contrário

Conhece Câmara 4.0 Variável binária com valor 1 para empresas que têm conhecimento da existência da Câmara Brasileira da Indústria 4.0 ou de outras iniciativas nacionais ou locais para a difusão das Tecnologias da Indústria 4.0; e 0 caso contrário

3. Percepção das tecnologias 4.0

Vantagem Variável de escala likert (1 - discordo totalmente; 5 - concordo totalmente) obtida a partir da seguinte afirmação: “considero que tecnologias 4.0 (p.e., computação em nuvem, IOT e big data) trazem benefícios econômicos (redução de custo e/ou aumento no lucro) para as organizações”.

Compatibilidade Variável de escala likert (1 - discordo totalmente; 5 - concordo totalmente) obtida a partir da seguinte afirmação: “considero que tecnologias 4.0 (p.e., computação em nuvem, IIOT e big data) são compatíveis com as competências da minha organização”.

Complexidade Variável de escala likert (1 - discordo totalmente; 5 - concordo totalmente) obtida a partir da seguinte afirmação: “considero que tecnologias 4.0 (p.e., computação em nuvem, IIOT e big data) são complexas e difíceis de gerenciar”

Fonte: Elaborado pelo autor

O teste de comparação de médias foi adotado para variáveis explicativas contínuas e o teste com frequências para variáveis explicativas binárias. Essa análise descritiva comparativa permite que sejam identificadas as principais características das duas subamostras de empresas: (1) adotantes de alguma(s) da(s) tecnologia(s) da Indústria 4.0 e (2) não adotantes das tecnologias. Esse tipo de teste lida com problemas que se enquadram em duas situações: (1) O teste para amostras não pareadas e (2) o teste para amostras pareadas. O primeiro teste é utilizado para comparar uma variável quantitativa

de duas populações distintas e o segundo para comparar, em pares, diretamente a variável a ser estudada (PINHEIRO et al., 2009).

Neste trabalho adotou-se o teste para amostra não pareadas. Existem diversos testes de hipóteses recomendados para cada caso, sendo o teste “t” de *student* um dos mais adotados. Este teste é recomendado quando o tamanho da amostra não é grande o bastante para formar uma distribuição normal de probabilidade (SCHEAFFER et al., 2010). Dadas duas amostras populacionais distintas e uma determinada característica/variável, denominadas por x_1 e x_2 , são comparadas as médias e as frequências das duas amostras.

Matematicamente, o método assume que as duas populações são normais com média populacional e um desvio padrão próprio. Além disso, é necessário também que haja independência entre as variáveis para ambas populações (PINHEIRO et al., 2009). Originalmente, o teste “t” de *student* assume que o desvio padrão é igual para ambas populações. Neste caso utiliza-se a equação 1 para obter-se o “T” de *student* (SCHEAFFER et al., 2010):

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{sa \cdot \sqrt{(1/n_1) + (1/n_2)}} \quad (1)$$

Por sua vez, a variância agregada (sa) é dada por:

$$sa^2 = \frac{(n_1 - 1)^2 \cdot s_1^2 + (n_2 - 1)^2 \cdot s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (2)$$

As variáveis utilizadas nas equações (1) e (2) podem ser definidas como:

\bar{x}_1 = média da variável X na população 1; \bar{x}_2 = média da variável X na população 2; n_1 = número de elementos na população 1; n_2 = número de elementos na população 2; s_1 = variância de X na população 1; s_2 = variância de X na população 2; gl = graus de liberdade da estatística do teste.

É possível que o desvio padrão das populações seja distinto, e neste caso não há um método exato de solução. Com uma adaptação na equação (1), é possível obter-se uma solução aproximada para o problema:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{(s_1^2/n_1) + (s_2^2/n_2)}} \quad (3)$$

A equação (3) é adotada para calcular o teste t para amostras com variâncias distintas. É necessário ainda estabelecer o grau de confiança (α) para os testes. Este

representa a probabilidade máxima esperada de erro do resultado do teste. No presente estudo, trabalhou-se com confiança de até 10%. O terceiro passo é estabelecer os graus de liberdade. Para tal, utiliza-se da equação (4), no caso de problemas com variâncias iguais, e equação (5), para variâncias diferentes:

$$gl = n1 + n2 - 2 \quad (4)$$

$$gl = \frac{[(s1^2/n1)+(s2^2/n2)]^2}{[(s1^2/n1)^2/(n1-1)]+[(s2^2/n2)^2/(n2-1)]} \quad (5)$$

Além das análises descritivas acima explicadas, foi também estimado um modelo econométrico de regressão de dados de contagem. Antes de apresentar as características do modelo estimado, cabem algumas importantes observações. O pequeno número de empresas na amostra exige bastante parcimônia na interpretação dos resultados da análise econométrica. Esta análise foi feita principalmente para corroborar os achados na análise de comparação dos dois grupos de empresas. Portanto, ao contrário da maioria dos trabalhos que fazem uso de modelos econométricos, neste estudo a análise econométrica não é o aspecto central das análises empíricas. Trata-se apenas de uma análise complementar que busca aumentar a robustez dos resultados da análise descritiva. Ademais, em decorrência do baixo número de graus de liberdade do modelo econométrico e dos potenciais problemas de correlação, não foram utilizadas todas as variáveis da Tabela 1. As variáveis explicativas utilizadas foram selecionadas com base nos resultados da análise de comparação de médias e frequências entre os grupos (adotantes e não adotantes). Buscou-se selecionar variáveis com alta significância estatística e que representassem as três dimensões do modelo teórico TOE. O capítulo 4 se aprofunda na fundamentação desta escolha.

A variável dependente do modelo econométrico estimado (y) é a soma do número de tecnologias da Indústria 4.0 adotadas pelas empresas da amostra. Neste caso, é recomendado o uso de modelos econométricos de dados de contagem, pois a distribuição de probabilidade Poisson é mais adequada para este tipo de variável dependente (GREENE, 2003). Sendo Y uma variável aleatória Poisson, tem-se que sua função densidade de probabilidade pode ser representada como:

$$f(y_i|x_i) = P(Y_i = y_i) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^y}{y!}, \quad y = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

Onde y_i é o número de grupos de tecnologias da Indústria 4.0 adotadas pela empresa i , e x_i são as variáveis independentes do modelo. O parâmetro médio esperado (λ) dessa função de probabilidade é definido como:

$$E(y_i|x_i) = \lambda_i = \exp(x'_i\beta) \quad (7)$$

A equação (7) representa o modelo de regressão Poisson para dados de contagem em que os parâmetros β podem ser estimados por meio de procedimentos de máxima verossimilhança (GREENE, 2003):

$$\ln L(\beta) = \ln \left[\frac{e^{-\lambda} \lambda^{y_i}}{y_i!} \right] = -\lambda + y_i \ln(\lambda) - \ln(y_i!) = -\exp(x'_i\beta) + y_i(x'_i\beta) - \ln(y_i!) \quad (8)$$

O modelo Poisson assume que os dados possuem igual dispersão, ou seja, a média e a variância da variável dependente são iguais: $E(y_i) = \text{var}(y_i) = \lambda$. No entanto, essa suposição pode ser violada dependendo das características dos dados analisados. Assim, pode-se ter uma superdispersão quando a variância é maior do que a média; ou uma subdispersão quando a variância é menor do que a média. Isto irá resultar em superestimação ou subestimação de erros padrão, dando assim estimativas enviesadas e inconsistentes dos parâmetros de regressão de Poisson.

Na maior parte dos casos, os dados de contagem possuem variância maior do que a média (GREENE, 2003). O modelo negativo binomial, no qual a variância aparece em função da média, pode ser utilizado para acomodar o problema da superdispersão. A função de variância para o modelo negativo binomial é especificada como:

$$\text{var}(y_i) = \lambda_i + \alpha \lambda_i^2 \quad (9)$$

Em que α é o parâmetro de dispersão a ser estimado. O modelo negativo binomial se reduz ao modelo Poisson se α for igual a zero. Portanto, pode-se realizar o teste de razão de máxima verossimilhança para testar a existência/ausência de superdispersão nos dados. No presente estudo, o teste indicou a ausência de superdispersão, o que, por sua vez, conduziu à escolha do modelo de regressão de Poisson.¹ Assim, para fins de simplificação, não serão apresentadas aqui as características do modelo negativo binomial.

¹ O qui quadrado tabelado excedeu o qui quadrado calculado com 1% de significância. Assim, aceitou-se a hipótese nula de que $\alpha = 0$ e, portanto, não há superdispersão no modelo Poisson.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS EMPÍRICOS

Este capítulo está dividido em três seções. A primeira apresenta uma descrição geral das empresas da amostra, tal que seja possível melhor compreender as características técnicas e organizacionais das empresas analisadas. Na segunda seção são apresentados os resultados da análise empírica de adoção de tecnologias da Indústria 4.0 pelas empresas da amostra. Essa análise se subdivide em três etapas: (1) investigação das tecnologias adotadas; (2) comparação das características de empresas adotantes e não adotantes e (3) análise dos fatores determinantes do nível/intensidade de adoção das tecnologias 4.0. A terceira seção apresenta uma síntese da percepção das empresas em relação às barreiras à adoção das tecnologias.

4.1. CARACTERÍSTICAS DAS EMPRESAS DA AMOSTRA

O questionário estruturado aplicado permitiu a caracterização das 30 empresas da amostra. Esta subseção faz uma apresentação breve destas características, tal que seja possível melhor compreender a amostra estudada. As empresas respondentes estão distribuídas em 12 municípios do interior do estado de São Paulo, sendo São Carlos e Araraquara os municípios mais citados, com 6 empresas instaladas em cada um destes.

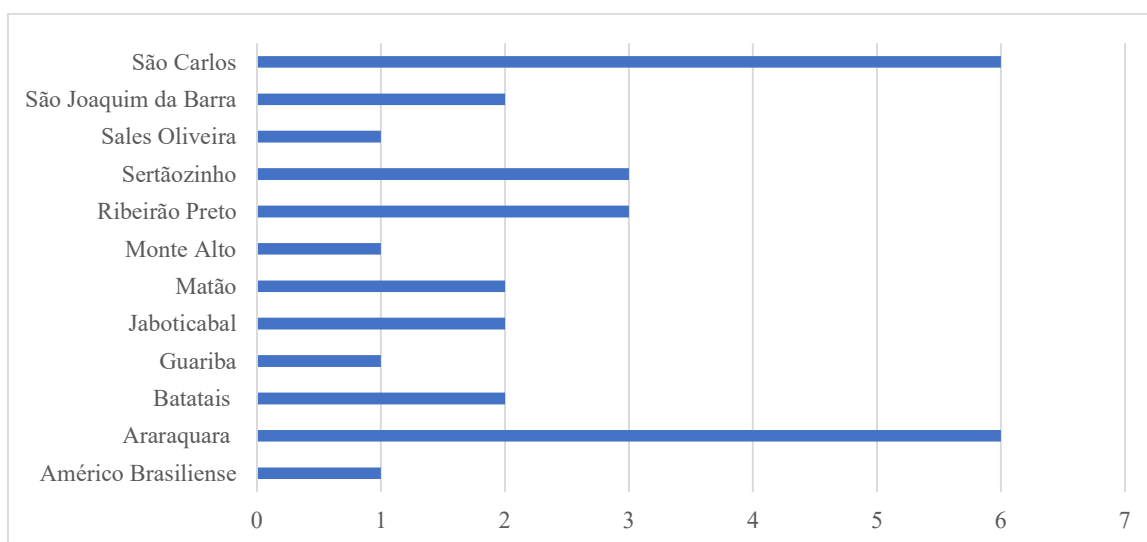


Figura 3. Municípios de localização das empresas da amostra.

Fonte: Resultados da pesquisa.

A Figura 4 mostra os principais segmentos de atuação das empresas. Os segmentos de atuação indicam o principal setor, como por exemplo, agrícola, automotivo ou prestação de serviços, em que as empresas fornecem as máquinas, equipamento ou componentes. Neste caso, a empresa poderia marcar como resposta mais de uma opção, pois é comum que as empresas tenham o chamado produto próprio, como por exemplo os equipamentos ou componentes de sua própria marca, e também forneçam serviços de usinagem para terceiros, por possuírem capacidade e equipamentos na fábrica, gerando assim uma linha adicional de negócio. De fato, a opção mais indicada foi a Prestação de Serviços de Usinagem, que é um modelo de negócio em que muitas pequenas empresas acabam atuando, fornecendo este tipo de serviço para empresas de maior porte. Este serviço dispensa a presença de alguns departamentos dentro da empresa, como desenvolvimento de produtos, engenharia, marketing, sendo o negócio resumido apenas à prestação de serviço de usinagem para outras empresas que desenvolvem todas as especificações e características técnicas demandadas para os equipamentos, peças e componentes.

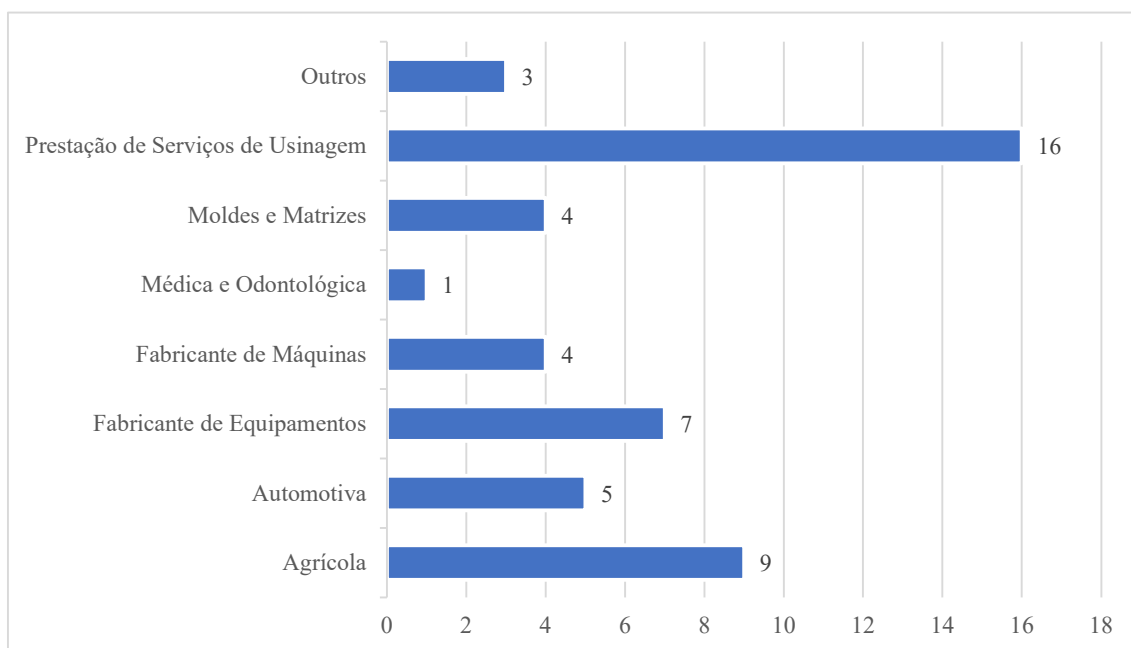


Figura 4. Segmento principal de atuação das empresas da amostra.

Fonte: Resultados da pesquisa

A Figura 5 mostra a quantidade de funcionários que as empresas da amostra empregam em suas operações. A maioria das empresas, 50% da amostra, emprega até 10 funcionários, indicando que majoritariamente as empresas são de pequeno porte. Há, por

outro lado, 10 empresas com mais do que 40 funcionários. No entanto, essas empresas não possuem mais do que 100 funcionários. Portanto, trata-se de uma amostra composta por empresas de pequeno e médio porte.

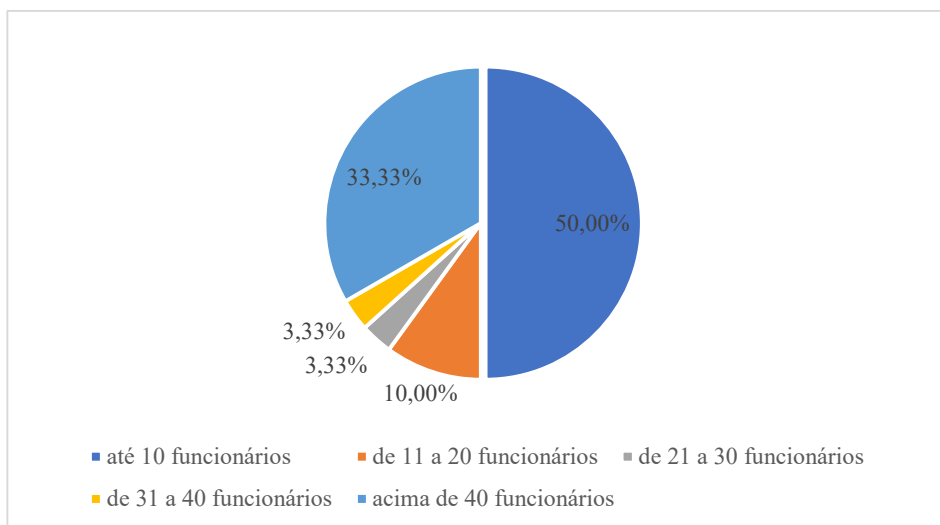


Figura 5. Número de funcionários das empresas da amostra.

Fonte: Resultados da pesquisa

A Figura 6 apresenta o tempo de existência das empresas no mercado. O tempo de operação no mercado tende a ter relação positiva com as experiências e capacidades internas acumuladas na organização. Ademais, a própria reputação de uma empresa tende a ser construída ao longo do tempo de operação. No caso da amostra estudada, a maioria das empresas, 46,67%, têm mais do que 20 anos de atuação no mercado, o que indica que se trata de uma amostra de empresas com um conjunto considerável de experiências e competências acumuladas.

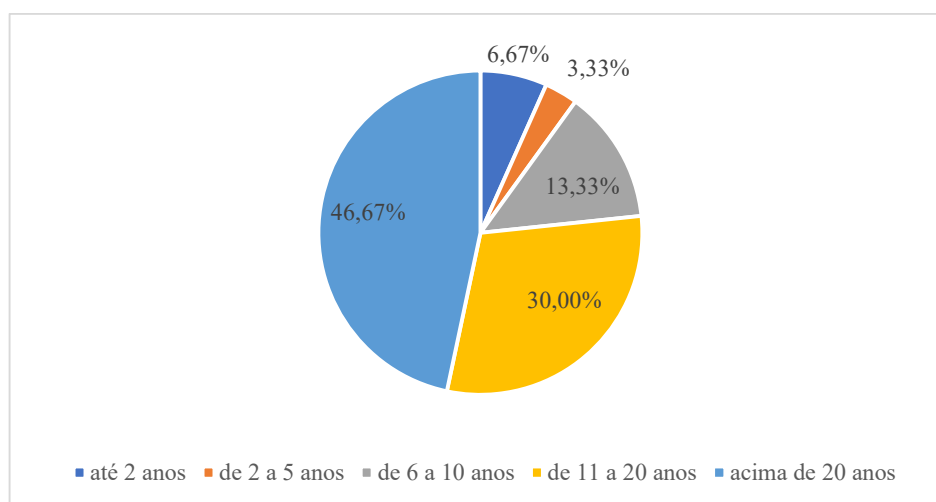


Figura 6. Tempo de operação no mercado das empresas da amostra.

Fonte: Resultados da pesquisa

Outra questão levantada foi a percepção dos respondentes da pesquisa (proprietários, diretores, ou ocupantes de cargos de gestão das empresas) acerca da qualificação da mão de obra disponível na empresa. Utilizou-se uma escala *Likert* para medir essa percepção, de 1 a 5, onde 1 seria um grau de qualificação muito baixo, e 5 um grau de qualificação muito alto, considerando a mão de obra disponível na empresa como um todo. As opções mais marcadas foram a 4, com 40%, e 3, com 33,33%, indicando uma percepção de qualificação entre média e alta (Figura 7). Nota-se, ainda, que nenhum respondente marcou a opção 1.

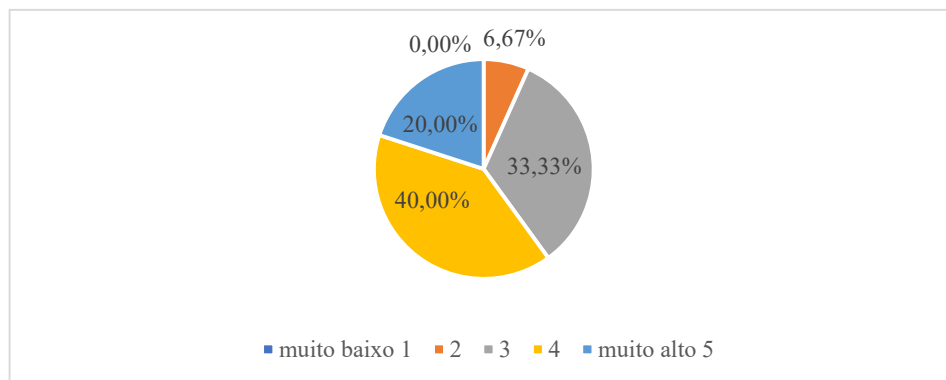


Figura 7. Percepção do respondente em relação ao nível de qualificação da mão de obra na empresa: 1 - muito baixo a 5 - muito alto.

Fonte: Resultados da pesquisa

A disponibilidade de funcionários com competências em TICs é de suma relevância para a adoção e uso das tecnologias da Indústria 4.0 nas empresas. A Figura 8 mostra a existência ou não de funcionários especializados em TICs na estrutura interna das empresas da amostra. Percebe-se que apenas 26,67% das empresas da amostra possuem este tipo de mão de obra qualificada em sua estrutura organizacional interna.

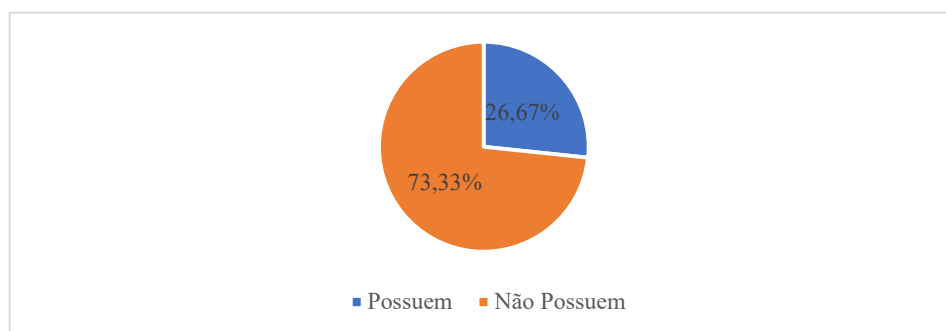


Figura 8. Funcionários Especializados em Tecnologias da Informação e Comunicação na estrutura organizacional interna das empresas da amostra.

Fonte: Resultados da pesquisa

As empresas que não possuem funcionários com competências em TICs podem contratar serviços de consultoria no mercado. A Figura 9 apresenta o percentual de empresas que contratam esse tipo de serviço com frequência. Já a Figura 10 mostra o percentual de empresas que contratam serviços de consultoria e assessoria mais gerais em Gestão. A maior parte das empresas respondeu que não utiliza esses serviços.

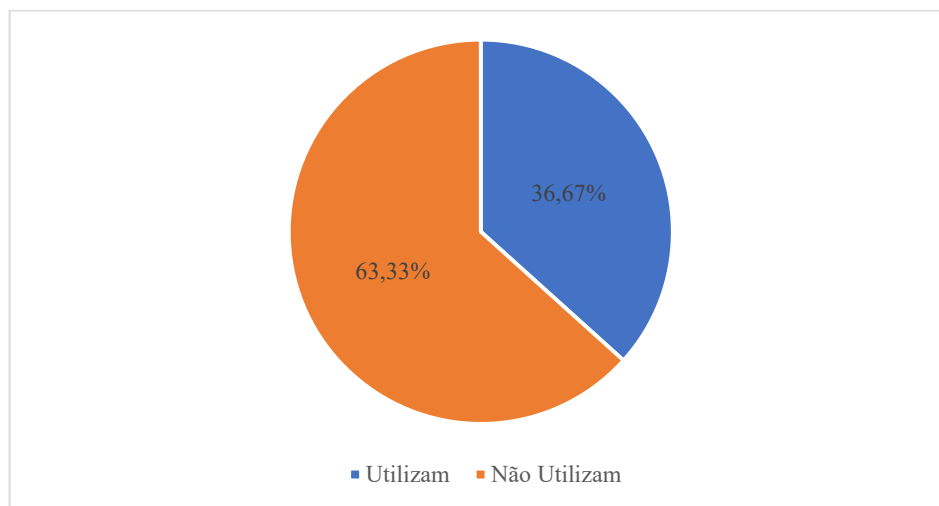


Figura 9. Utilização de Serviços de Consultoria e/ou Assessoria em Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC).

Fonte: Resultados da pesquisa

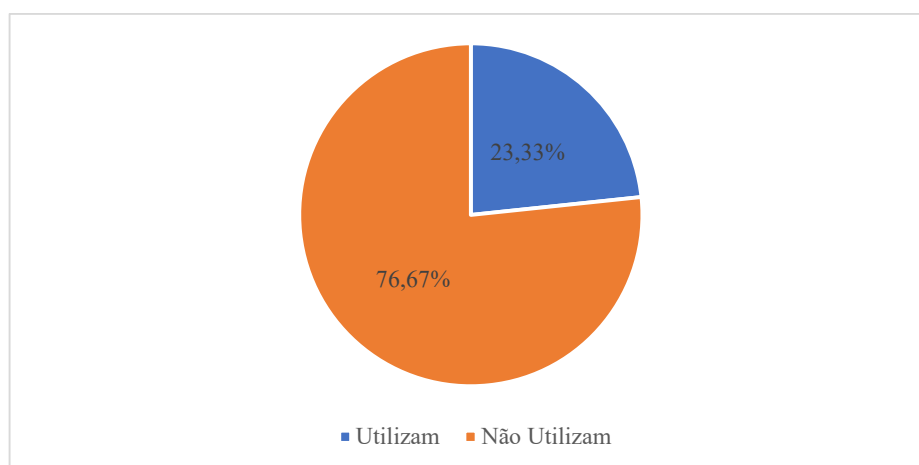


Figura 10. Utilização de Serviços de Consultoria e/ou Assessoria em Gestão.

Fonte: Resultados da pesquisa

A adoção de sistemas informatizados de apoio à tomada de decisão nas empresas também foi investigada na pesquisa de campo. As Figuras 11, 12 e 13 apresentam,

respectivamente, a frequência de adoção de computador para organização das atividades da empresa, softwares ERP (*Enterprise Resource Planning*) e/ou MRP (*Manufacturing Resource Planning*) e MES (*Manufacturing Execution Systems*). Conforme será mais bem discutido na próxima subseção do trabalho, tratam-se de tecnologias precedentes às tecnologias da Indústria 4.0. De qualquer forma, nota-se que a difusão das tecnologias de ERP, MPR e MES ainda é baixa dentre as empresas investigadas.

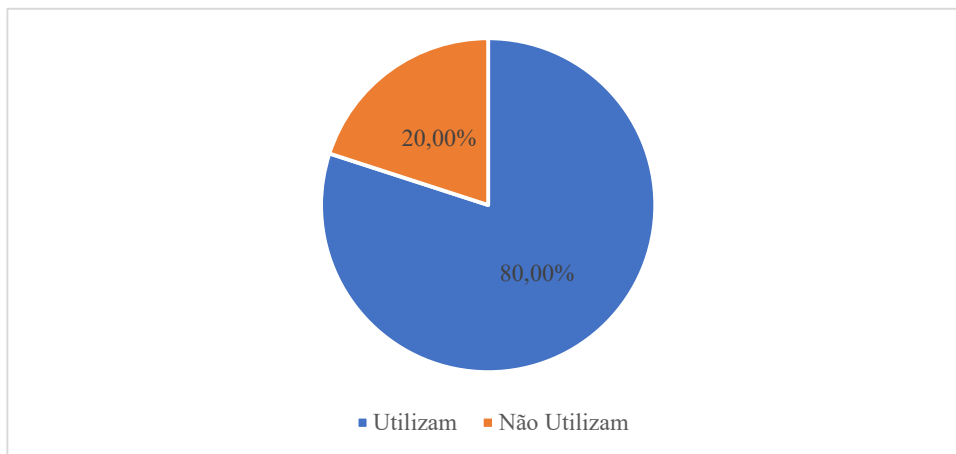


Figura 11. Adoção de Sistemas em Computador para Organização das Atividades Administrativas, Operacionais e Financeiras da Empresa.

Fonte: Resultados da pesquisa

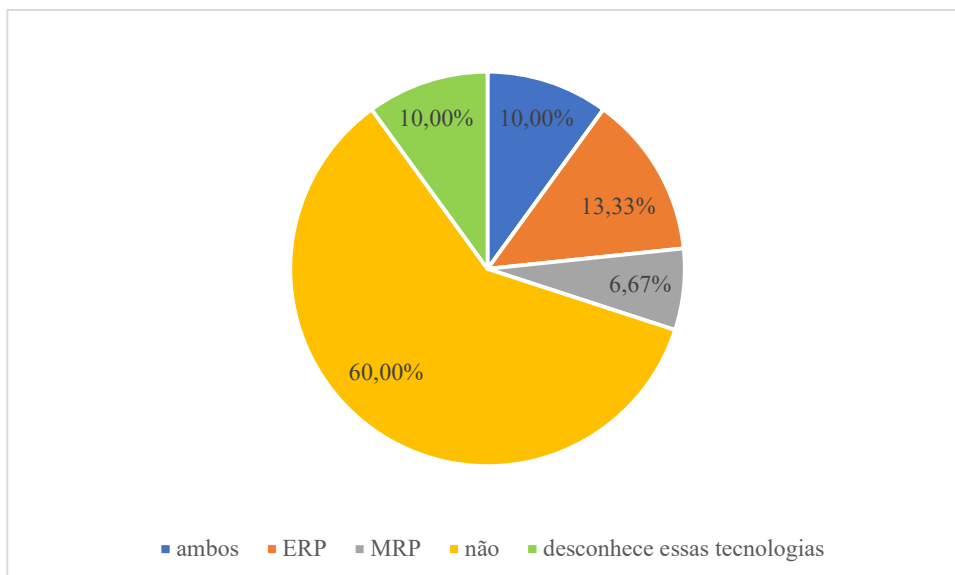


Figura 12. Adoção de ERP e/ou MRP

Fonte: Resultados da pesquisa

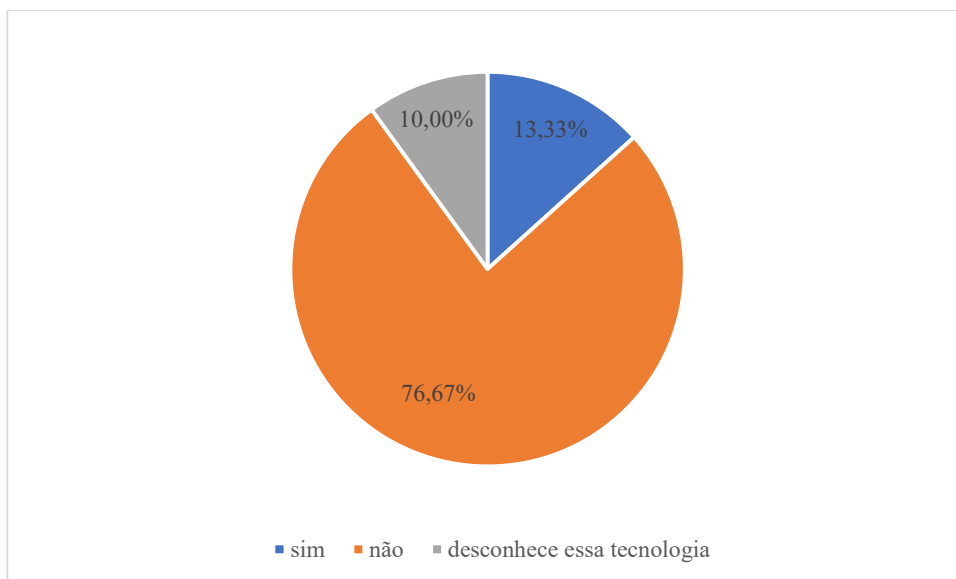


Figura 13. Adoção de Sistemas MES (Manufacturing Execution Systems).

Fonte: Resultados da pesquisa

As máquinas com CNC (Comando Numérico Computadorizado) estão entre os investimentos de maior valor nas empresas que têm a usinagem como parte principal de suas atividades. Tratam-se de equipamentos que propiciam alta produtividade e flexibilidade de utilização nas diversas operações técnicas desenvolvidas pelas empresas. Portanto, é um recurso físico fundamental para a competitividade dessas empresas. A Figura 14 mostra a quantidade de máquinas com CNC que as empresas da amostra possuem. Percebe-se que a maioria das empresas, 36,67%, possui entre 1 e 3 dessas máquinas.

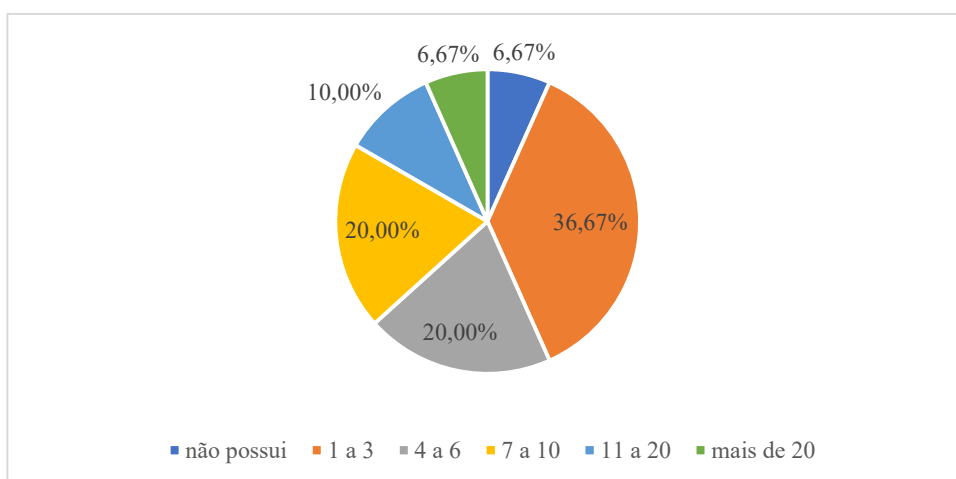


Figura 14. Número de Máquinas com Comando Numérico Computadorizado (CNC)

Fonte: Resultados da pesquisa

As empresas também responderam se a alta gerência busca frequentemente por informações de mercado, novas tecnologias e políticas públicas (Figura 15), e se há incentivos ao acesso e compartilhamento de informações, por parte dos funcionários, sobre novas tecnologias de produção e gestão (Figura 16). Essa busca por informações e esses incentivos ao compartilhamento de informações estão presentes na maioria das empresas da amostra.

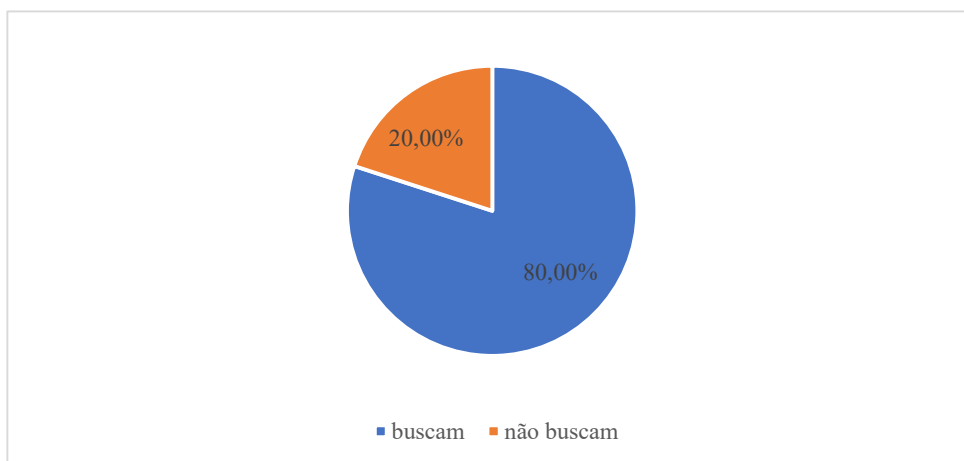


Figura 15. Busca Frequente de Informações pela Alta Gerência da Empresa.

Fonte: Resultados da pesquisa

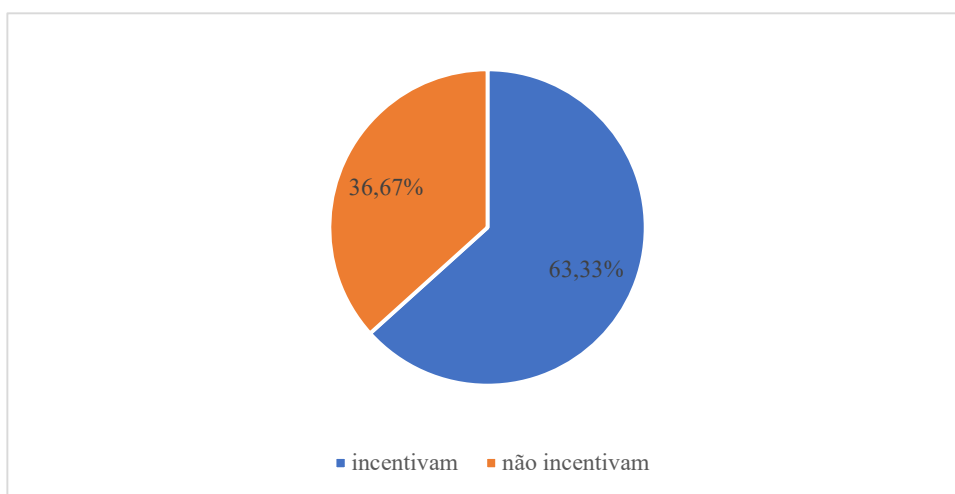


Figura 16. Incentivo aos funcionários da empresa para acesso e compartilhamento de informações sobre novas tecnologias de produção e gestão.

Fonte: Resultados da pesquisa

Uma escala *Likert* de 1 a 5 foi utilizada para indicar a frequência com que as empresas costumam testar novas tecnologias e práticas organizacionais, sendo 1 uma frequência baixa, e 5 uma frequência muito alta. As respostas mais indicadas foram a 3, por 43,33% das empresas, seguido da 4, indicada por 36,67%.

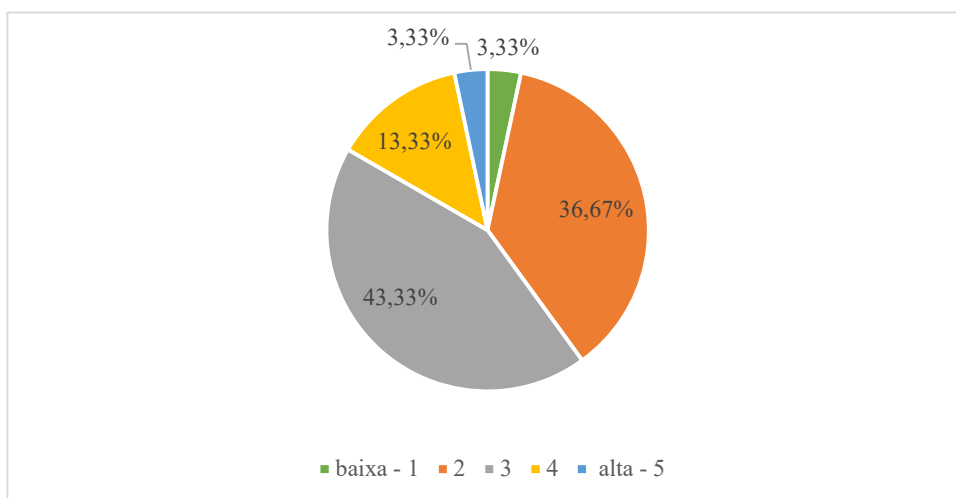


Figura 17. Frequência com que a empresa testa novas tecnologias e práticas organizacionais.

Fonte: Resultados da pesquisa

A disponibilidade de internet da alta velocidade (p.e., fibra ótica), condição necessária para utilização das tecnologias da Indústria 4.0, foi indicada por 93,33% dos respondentes (Figura 18). Nota-se, portanto, que a disponibilidade de internet de alta velocidade não parece ser um problema para as empresas da amostra.

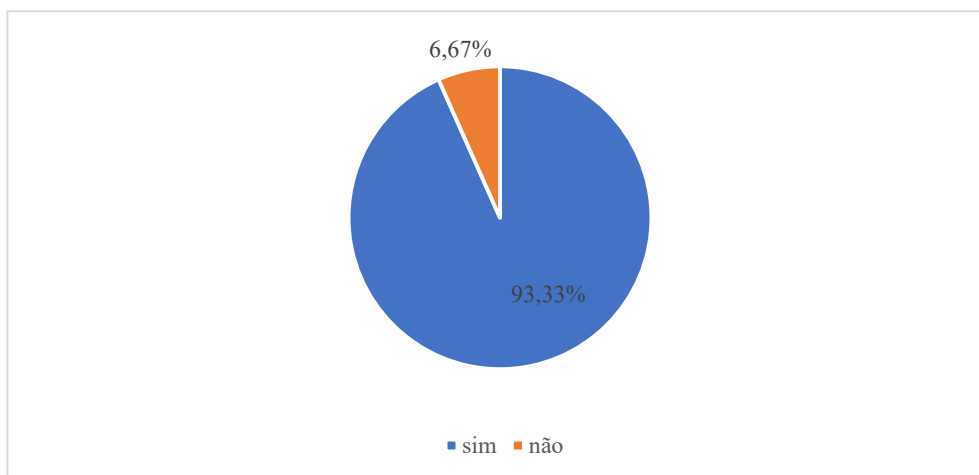


Figura 18. Disponibilidade de Internet com alta velocidade na empresa.

Fonte: Resultados da pesquisa

As empresas puderam ainda informar se participam de programas de cooperação com Universidades, Institutos de Ciência e Tecnologia, ou Agências de Fomento, o que

possibilitaria a troca de conhecimentos entre mercado e academia. A maioria das empresas, 80%, afirmou não participar de nenhum programa (Figura 19).

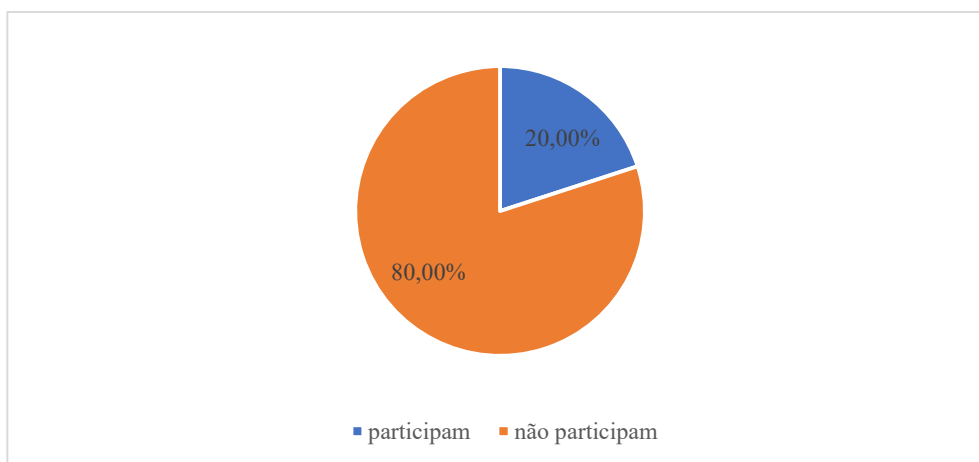


Figura 19. Participação em programas de cooperação com Universidades, Institutos de Ciência e Tecnologia ou Agências de Fomento.

Fonte: Resultados da pesquisa

Por fim, foi questionado se as empresas acessam linhas de crédito, como por exemplo, as linhas do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), ou de outras instituições financeiras, para a compra de máquinas, equipamentos e/ou novas tecnologias. A maioria das empresas, 63,33%, acessa crédito em instituições financeiras com frequência (Figura 20), indicativo da importância do mercado financeiro para as empresas estudadas.

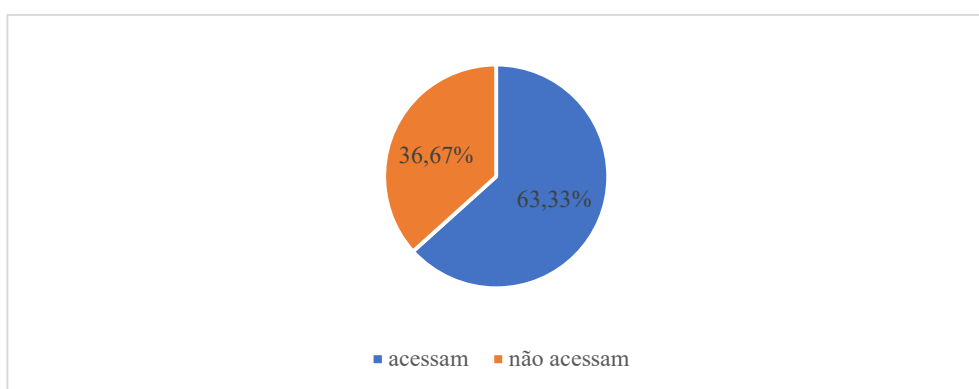


Figura 20. Acesso ao crédito em instituições financeiras.

Fonte: Resultados da pesquisa

4.2. ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS 4.0 PELAS EMPRESAS DA AMOSTRA

A Figura 21 apresenta as tecnologias adotadas pelas empresas e o número de adotantes de cada tecnologia. As tecnologias adotadas pelas firmas da amostra deste estudo são: Computação em Nuvem (10 empresas), Sistemas de Integração Horizontal e Vertical (5 empresas), Big Data (4 empresas) e Internet das Coisas Industrial (4 empresas).

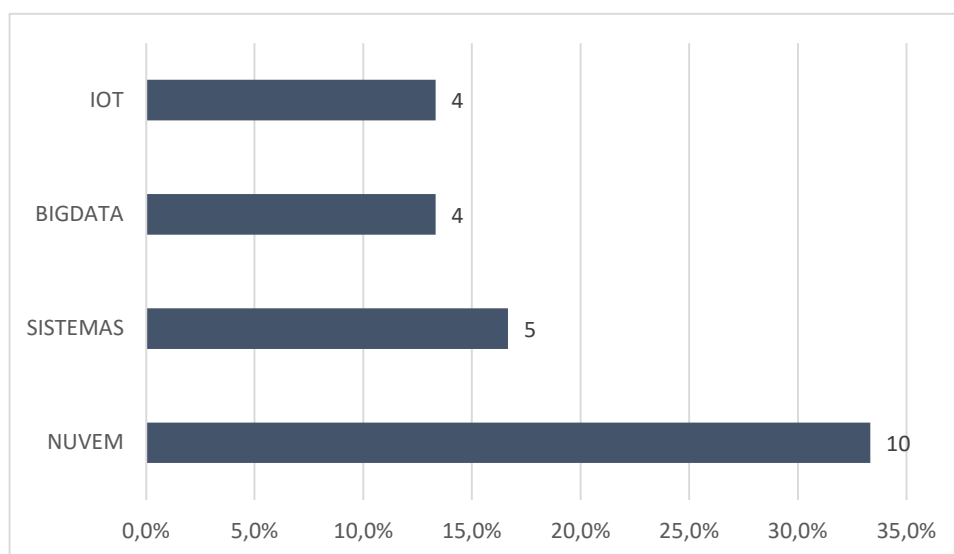


Figura 21. Adoção das tecnologias da Indústria 4.0 pelas firmas da amostra.

Fonte: Resultados da pesquisa

Percebe-se que a adoção, mesmo que de uma única tecnologia, ainda é baixa, sendo que 60% da amostra (18 empresas) não adotam tecnologias da Indústria 4.0. A tecnologia com maior taxa de adoção foi a Computação em Nuvem (33,3% de adotantes). De fato, trata-se de tecnologia com investimento inicial e custo de uso relativamente baixos, gerenciamento pouco complexo, e aplicável a diferentes tarefas e em diferentes escalas de produção. Pode-se, por exemplo, utilizar essa tecnologia simplesmente para conferir maior segurança a algumas informações estratégicas da organização ou até mesmo para aumentar a capacidade de integração, monitoramento e controle de diversos processos organizacionais. As empresas relataram ainda a redução de custos com equipamentos, manutenção de servidores e pessoal como potenciais benefícios da computação em nuvem.

A segunda tecnologia com maior taxa de adoção foram os sistemas informatizados para a integração horizontal e vertical de atividades (5 adotantes). Trata-se de importante tecnologia para aumentar a coordenação dos sistemas gerenciais e dos processos dentro da empresa e também entre empresas na cadeia de valor. Importante ressaltar que todas essas empresas também adotam algum tipo de sistema ERP ou MRP, o que indica que se tratam de tecnologias complementares. Já as tecnologias de Big Data e IoT foram adotadas por quatro firmas da amostra. Essas tecnologias possuem maior complexidade de uso, demandam investimentos mais elevados e são aplicáveis a tarefas mais específicas. Tratam-se de tecnologias que exigem um conjunto de capacidades de programação, organização e análise preditiva de dados e sistemas.

A literatura mostra que as outras tecnologias da Indústria 4.0 (Manufatura Aditiva, Robôs Autônomos, Simulação, Realidade Aumentada e Cibersegurança) são as que possuem menores níveis de adoção por empresas de países em desenvolvimento (TORTORELLA et al., 2020; TORTORELLA et al., 2022). De fato, nas entrevistas iniciais com os agentes chave e na validação do questionário estruturado percebeu-se que essas tecnologias ainda estão distantes da realidade para as pequenas e médias empresas da indústria metalúrgica que possuem processos de usinagem no estado de São Paulo.

Importante reforçar que a mesma empresa pode adotar duas ou mais tecnologias, sendo que um número maior de tecnologias adotadas indica uma maior intensidade no uso de tecnologias da Indústria 4.0. Neste sentido, duas empresas da amostra adotaram as quatro tecnologias, duas adotaram três tecnologias (Nuvem + Sistemas de Integração + Big Data), uma empresa adotou duas tecnologias (Nuvem + IoT) e sete empresas adotaram apenas uma tecnologia (5 Nuvem, 1 Sistemas de Integração e 1 IoT).

A Tabela 2 apresenta uma análise comparativa entre as empresas que adotam tecnologias da Indústria 4.0 com aquelas que não adotam essas tecnologias. Foram consideradas adotantes aquelas empresas que adotaram ao menos uma tecnologia da Indústria 4.0. Pressupõe-se que a adoção de pelo menos uma das tecnologias investigadas já indica que a empresa esteja no caminho da “filosofia 4.0”.

Tabela 2. Comparação das empresas que adotam e não adotam tecnologias da Indústria 4.0.

	Adotantes		Não Adotantes		Valor P
	12 empresas		18 empresas		
	Média	D.P.	Média	D.P.	
<i>Tempo no mercado</i>	19,083	8,229	16,333	8,160	0,189
<i>Número funcionários</i>	27,083	20,277	23,889	17,868	0,332
<i>Qualificação funcionários</i>	3,917	0,900	3,611	0,850	0,181
<i>Funcionários em TIC**</i>	0,500	0,522	0,111	0,323	0,017
<i>Consultoria TI***</i>	0,667	0,492	0,167	0,383	0,004
<i>Máquinas com CNC</i>	6,333	6,372	6,278	5,859	0,490
<i>Internet banda larga*</i>	1,000	0,000	0,889	0,323	0,082
<i>ERP***</i>	0,500	0,522	0,056	0,236	0,008
<i>MRP**</i>	0,333	0,492	0,056	0,236	0,045
<i>Testa tecnologias</i>	2,833	0,718	2,556	0,984	0,190
<i>Acesso informação*</i>	0,917	0,288	0,722	0,461	0,083
<i>Programas ICTs**</i>	0,417	0,515	0,056	0,236	0,020
<i>Acessa crédito</i>	0,750	0,452	0,556	0,511	0,142
<i>Conhece Câmara 4.0***</i>	0,667	0,492	0,222	0,428	0,009
<i>Vantagem***</i>	4,333	0,887	2,889	1,078	0,000
<i>Compatibilidade***</i>	4,500	0,674	2,333	1,283	0,000
<i>Complexidade</i>	2,583	1,505	2,611	1,037	0,478

*** média/frequência com diferença estatisticamente significativa a 1%;

** média/frequência com diferença estatisticamente significativa a 5%;

* média/frequência com diferença estatisticamente significativa a 10%

Fonte: Resultados da pesquisa

A análise comparativa apresentada na Tabela 2 permite que sejam feitas algumas constatações relevantes. Em primeiro lugar, nota-se, claramente, a importância da disponibilidade de mão de obra qualificada em tecnologias de informação e comunicação para a adoção e uso das tecnologias de Indústria 4.0. Dentre as empresas que adotam essas tecnologias, 50% possuem funcionários especializados em TICs e 66,7% contratam serviços de consultoria e assessoria em TI com frequência. Já dentre as empresas que não adotam, apenas 11% possuem funcionários especializados em TICs e 16,7% contratam serviços de consultoria em TI. As diferenças entre as frequências das variáveis “*Funcionários em TIC*” e “*Consultoria TP*” para adotantes e não adotantes das tecnologias

as Indústria 4.0 são estatisticamente significativas a 2% e 1%, respectivamente. Esse resultado corrobora com a literatura que mostra que a disponibilidade de mão de obra qualificada para operar as tecnologias 4.0 é uma das principais barreiras à maior difusão dessas tecnologias (ALI e MILLER, 2017; STENTOFT et al., 2020; RAJ et al., 2020). O gerenciamento dessas tecnologias não é trivial. Portanto, a existência de mão de obra qualificada é um recurso indispensável para que as empresas consigam efetivamente aproveitar-se dos benefícios organizacionais, técnicos e financeiros proporcionados pelas tecnologias da Indústria 4.0.

Conforme esperado, todas as firmas que adotam tecnologias 4.0 possuem disponibilidade de internet de banda larga em suas instalações. A disponibilidade de internet é fundamental para que as tecnologias sejam utilizadas de forma eficaz. Em que pese a diferença estatisticamente significativa de frequências ao nível de 10% para adotantes e não adotantes, o acesso à internet de banda larga não parece ser um problema para as firmas da amostra, tendo em vista que 89% dos não adotantes também possuem disponibilidade de internet de banda larga em suas instalações.

As diferenças entre as taxas de adoção de ERP e MRP são bastante significativas para os dois grupos de empresas. Dentre as empresas que adotam tecnologias da Indústria 4.0, 50% também adotam ERP e 33,3% possuem MRP. Dentre as não adotantes de tecnologias 4.0, apenas 5,6% adotam ERP e MRP. Esses resultados revelam algumas questões interessantes. Por um lado, indicam que as empresas que adotam tecnologias da Indústria 4.0 já possuem, *a priori*, um nível de intensidade no uso de tecnologias de gestão mais alto. Por outro lado, mostram sinergias e ganhos de aprendizagem no uso de tecnologias gerenciais complementares. Os sistemas ERP e MRP podem ser considerados como tecnologias “precedentes” às inovações da Indústria 4.0. Não obstante, percebe-se que a adoção de tecnologias mais tradicionais de gerenciamento da produção ainda é bastante incipiente entre as firmas da amostra, sobretudo entre aquelas que não adotam tecnologias 4.0. Assim, a maior difusão de tecnologias da Indústria 4.0 entre pequenas e médias empresas no Brasil parece perpassar, necessariamente, por barreiras à difusão de outras tecnologias que antecedem a revolução da Indústria 4.0. Esse resultado não deixa de ser um indicativo de defasagem no uso de tecnologias de gerenciamento pelas pequenas e médias empresas analisadas.

No que tange à busca por informações (*Acesso Informação*), 91,7% das empresas que adotam tecnologias da Indústria 4.0 afirmaram que a alta gerência busca informações de tecnologias, produção, mercado e políticas públicas com frequência. Dentre as não adotantes, 72,2% afirmaram que a alta gerência procura frequentemente por esse tipo de informação. Esse resultado mostra que, de uma forma geral, a alta gerência das empresas estudadas tem procurado informações para subsidiar o processo de tomada de decisão.

A participação em programas de cooperação com Universidades, Institutos de Ciência e Tecnologia, ou Agências de Fomento à Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (variável *Programas ICTs*) é bem mais alta entre as empresas que adotam tecnologias da Indústria 4.0: 41,7% das adotantes participam desses programas enquanto apenas 5,6% das não adotantes participam, sendo a diferença entre as frequências estatisticamente significativa ao nível de 3%. Esse resultado corrobora a importância de parcerias entre empresas e Universidades/Institutos de Ciência e Tecnologia para o desenvolvimento e difusão de novas tecnologias e práticas organizacionais. As empresas que participam desses programas estão mais conectadas ao processo de desenvolvimento científico e tecnológico, o que resulta em ganhos de aprendizagem e possibilidades de fomento à inovação tecnológica.

Bueno et al. (2020) identificaram a falta de conhecimento sobre as tecnologias 4.0 e as iniciativas de difusão dessas tecnologias como potenciais barreiras à adoção pelas firmas no Brasil. No presente estudo, constatou-se que o nível de conhecimento das não adotantes sobre a existência da Câmara Brasileira da Indústria 4.0 ou de outras iniciativas nacionais ou locais para a difusão das tecnologias da Indústria 4.0 (variável *Conhece Câmara 4.0*) é consideravelmente baixo (22,2%). Esse resultado corrobora que a não adoção dessas tecnologias está associada à própria falta de conhecimento das tecnologias e iniciativas para a difusão destas (TORTORELLA et al., 2020). A falta de conhecimento sobre as tecnologias da Indústria 4.0 e a baixa compreensão da importância estratégica das tecnologias digitais também foram consideradas barreiras proeminentes enfrentadas por pequenas e médias empresas da Romênia (TURKES et al., 2019).

As empresas adotantes concordam em maior intensidade que a adoção de tecnologias 4.0 aumenta lucro e/ou reduz custos de produção (variável *Vantagem*). Ademais, as adotantes também possuem maior percepção de que tecnologias 4.0 são compatíveis com as competências internas já desenvolvidas na organização, o que pode

ser considerado um indicativo de que as empresas adotantes percebem *ex ante* que os custos de adaptação com as tecnologias são mais baixos (variável *Compatibilidade*). Esses resultados são interessantes e corroboram com a importância da percepção das empresas em relação às vantagens econômicas e compatibilidades das inovações.

Para complementar as análises empíricas deste trabalho foi estimado um modelo econométrico de regressão de dados de contagem (Poisson), cuja variável dependente é o número de tecnologias da Indústria 4.0 adotado pelas empresas (Tabela 3). Em decorrência do baixo número de graus de liberdade, o modelo foi estimado com apenas quatro variáveis explicativas, quais sejam: *Funcionários em TIC*, *ERP*, *Programas ICTs* e *Compatibilidade*. Essas variáveis foram escolhidas por contemplarem os três aspectos do modelo TOE (tecnologia, organização e ambiente) e por terem apresentado alta significância estatística nos testes de comparação de médias/frequências entre adotantes e não adotantes.

Cabe reforçar ao leitor que o baixo número de observações na amostra exige bastante parcimônia na interpretação dos resultados da análise econométrica. Esta análise foi feita principalmente para corroborar e complementar os achados na análise de comparação dos dois grupos de empresas. Isto é, busca-se maior robustez para confirmar as constatações de que a disponibilidade de mão de obra qualificada em TICs, a adoção prévia de outras tecnologias gerenciais, a participação em programas com ICTs e a percepção sobre as tecnologias da Indústria 4.0 são fatores que levam à maior adoção e uso destas tecnologias pelas empresas. Portanto, pode-se considerar que a análise econométrica não é aspecto central das análises empíricas desta dissertação, mas sim uma análise complementar.

Tabela 3. Fatores determinantes da intensidade no uso de tecnologias da Indústria 4.0 pelas empresas da amostra.

	Modelo Poisson (y=número de tecnologias)	
	Coefficiente	Erro padrão
<i>Constante</i>	-3,28464***	1,08993
<i>Funcionários em TIC</i>	1,19462**	0,48660
<i>ERP</i>	0,88139*	0,49449
<i>Programas ICTs</i>	0,04918	0,43656
<i>Compatibilidade</i>	0,51953**	0,25666
Log-likelihood function	-24,01085	

Chi squared [4 d.f.]	33,52865
Nível significância	0,000000
R ² McFadden	0,411114

*** estatisticamente significativo a 1%; ** estatisticamente significativo a 5%; * estatisticamente significativo a 10%.

Fonte: Resultados da pesquisa

A hipótese de que todos os coeficientes do modelo estimado são estatisticamente iguais a zero pode ser rejeitada ao nível de 0,0000%. Portanto, o modelo pode ser utilizado para a análise dos fatores determinantes do nível de adoção e uso de tecnologias da Indústria 4.0 pelas empresas da amostra. Em que pesem os cuidados com o uso do R² McFadden em modelos com dados de contagem, o valor de 41,11% pode ser considerado bastante satisfatório para um modelo com poucas variáveis e observações. Outrossim, um modelo negativo binomial foi estimado para testar a hipótese de superdispersão nos dados. O parâmetro α do modelo negativo binomial é estatisticamente igual a zero, o que indica a ausência de superdispersão nos dados e corrobora que a distribuição de Poisson é adequada aos dados.

Os coeficientes de três das quatro variáveis explicativas do modelo econométrico apresentaram significância estatística ao nível de 10% ou menos: *Funcionários em TIC, ERP e Compatibilidade*. Os três coeficientes indicam impactos positivos das variáveis mencionadas sobre o nível de adoção das tecnologias da Indústria 4.0 pelas empresas da amostra. Assim, confirma-se a importância da disponibilidade de mão de obra com capacidades em tecnologias digitais, da adoção prévia de tecnologias gerencias “precedentes” à revolução 4.0, e da percepção de compatibilidade das tecnologias com as capacidades das empresas para aumentar a adoção e uso das tecnologias 4.0 investigadas.

Os achados do modelo econométrico reforçam os resultados da análise comparativa entre adotantes e não adotantes. As decisões de adoção e o nível de uso das tecnologias 4.0 dependem da disponibilidade de recursos humanos e organizacionais, bem como da percepção das empresas de que as inovações 4.0 serão compatíveis com seus recursos e competências. Esses resultados são importantes para direcionar estratégias e políticas de difusão das tecnologias da Indústria 4.0 para pequenas e médias empresas

no Brasil. Outrossim, os resultados são fundamentados pela literatura empírica e pelo modelo teórico TOE.

4.3. BARREIRAS À ADOÇÃO DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 NA PERCEPÇÃO DAS EMPRESAS DA AMOSTRA

As empresas da amostra foram questionadas sobre as principais barreiras à adoção das tecnologias 4.0. Essas barreiras foram levantadas por meio de revisão de literatura. Para cada potencial barreira à adoção, foi solicitado que a empresa atribuísse uma nota de 0 a 10, sendo que, quanto mais próximo de 10, maior a significância da barreira. O Quadro 2 apresenta uma síntese dos resultados desta análise.

Quadro 3. Barreiras à adoção de tecnologias da Indústria 4.0: índices de percepção das empresas da amostra.

Barreira à adoção de tecnologias 4.0	Média	Mediana	D.P	Mínimo	Máximo
Falta de uma cultura digital interna e de treinamento de pessoal (Schuh et al., 2017; Ras et al., 2017; Gupta, 2018).	7,667	8	2,270	3	10
Escassez de capital humano com habilidades digitais (Geissbauer et al., 2014; Gehrke et al., 2015; Breunig et al., 2016; Pinzone et al., 2017; Raj et al., 2020; Tortorella et al., 2020).	7,296	7	2,145	3	10
Riscos de falhas de ciber segurança (Geissbauer et al., 2014; Lee e Lee, 2015; Breunig et al., 2016; Xu et al., 2018; Turkes et al., 2019; Raj et al., 2020; Tortorella et al., 2020).	7,259	7	2,229	2	10
Falta de conhecimento sobre a tecnologia a ser adotada (Turkes et al., 2019; Bueno et al., 2020; Tortorella et al., 2020).	7,185	7	2,202	4	10
Resistência à mudança por parte das pessoas (Lee e Lee, 2010; Haddud et al., 2017; Luthra e Mangla, 2018; Raj et al., 2020).	7,148	8	2,522	1	10
Altos investimentos para a implementação da tecnologia a ser adotada (Nakata e Weidner, 2012; Geissbauer et al., 2014; Breunig et al., 2016; Kache e Seuring, 2017; Dalenogare et al., 2018; Raj et al., 2020).	7,111	8	2,242	2	10
Falta de padrões regulatórios (Schroder, 2016; Schwab, 2017; Bogoviz et al., 2019; Raj et al., 2020; Tortorella et al., 2020).	6,963	8	2,488	2	10

Desafios na garantia, análise, integração e qualidade dos dados (Lohr, 2012; Khan et al., 2014; Dalenogare et al., 2018; Raj et al., 2020).	6,926	7	2,018	3	10
Falta de clareza em relação aos benefícios econômicos das tecnologias (Brynjofsson, 1993; Stolarick, 1999; Luthra e Mangla, 2018; Raj et al., 2020).	6,741	6	2,011	4	10
Baixo nível de maturidade das tecnologias (Lee e Lee, 2015).	6,407	6	1,986	3	10
Ameaça de interrupção dos empregos existentes (Haddud et al. 2017; Shwab, 2017; Xu et al., 2018; Raj et al., 2020).	5,815	5	2,418	1	10
Falta de infraestrutura (Schroder, 2016; Raj et al., 2020).	5,815	6	2,746	1	10

Fonte: Resultados da pesquisa

As principais barreiras percebidas pelas empresas da amostra estão relacionadas com falta de cultura digital, treinamento de mão de obra, escassez de mão de obra com habilidades para operar tecnologias digitais e falta de conhecimento sobre as tecnologias. Essas barreiras corroboram as análises de adoção apresentadas na seção 4.2, nas quais evidenciou-se a importância da disponibilidade de recursos humanos especializados em TICs para a adoção das tecnologias, bem como do acesso à informação para aumentar o conhecimento sobre novas tecnologias. Assim, percebe-se que a dimensão organizacional das empresas (capacidades em recursos humanos e organizacionais, cultura organizacional e acesso à informação) é fortemente relevante para explicar a adoção e as barreiras à adoção das tecnologias da Indústria 4.0.

Percebe-se, ainda, que os riscos de ataques aos dados também aparecem como barreira relevante na percepção das empresas. De fato, tem-se percebido, com uma frequência cada vez maior, o enorme impacto negativo que esses ataques podem ter em organizações “digitalizadas e conectadas”. Não é por motivo diferente que as grandes organizações investem volumes financeiros consideráveis para aumentar a segurança dos seus sistemas de conectividade, informação e comunicação. Na sequência, aparecem barreiras comportamentais (resistência à mudança), econômicas (investimento inicial e falta de clareza quanto aos benefícios), institucionais (falta de regulação) e operacionais (desafios na gestão dos dados e baixa maturidade das tecnologias).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As tecnologias da Indústria 4.0 têm exercido efeitos significativos nas esferas econômica, organizacional, política e social. Diversos autores tratam a difusão dessas tecnologias como uma mudança de paradigma, uma quarta revolução industrial. Este trabalho contribuiu com a literatura por meio de uma investigação empírica da adoção das tecnologias da Indústria 4.0 por uma amostra de pequenas e médias empresas paulistas do setor metalúrgico que tivessem a usinagem como parte de suas operações. Uma revisão de literatura das tecnologias da Indústria 4.0 e das teorias de adoção e difusão de inovações fundamentou a elaboração do questionário estruturado aplicado na pesquisa de campo. Esse questionário foi respondido por uma amostra de 30 empresas localizadas no estado de São Paulo. Dados de adoção das tecnologias da Indústria 4.0, bem como das características das empresas e do ambiente tecnológico foram coletados e analisados.

A literatura revisada mostra a existência de nove tecnologias que são consideradas como “Pilares” do conceito Indústria 4.0, sendo elas: o Big Data, a Simulação, a Integração de Sistemas Vertical e Horizontal, a Internet das Coisas Industrial, a Computação em Nuvem, a Manufatura Aditiva, os Robôs Autônomos, a Realidade Aumentada, e a Cibersegurança. Tecnologias anteriores a estas também foram citadas por trabalhos e por especialistas consultados durante a elaboração desta pesquisa, como o MES (*Manufacturing Execution System*) e os sistemas ERP (*Enterprise Resource Planning*) e MRP (*Manufacturing Resource Planning*), sendo estas consideradas capacitadoras para as tecnologias da Indústria 4.0.

Esta revisão de trabalhos publicados trouxe ainda as principais barreiras que podem dificultar ou mesmo impedir a adoção de tecnologias pelas empresas. Essas barreiras podem ser classificadas em barreiras econômicas (investimento inicial, retorno esperado, custos marginais), operacionais (complexidade de uso, adaptabilidade, riscos com cibersegurança), culturais (resistência às mudanças, tradições, falta de cultura digital interna) e institucionais (padrões regulatórios, infraestrutura, políticas fiscal e creditícia). As empresas da amostra apontaram a falta de uma cultura digital interna, a escassez de capital humano, os riscos de falhas de cibersegurança e a falta de conhecimento sobre as tecnologias como as principais barreiras à adoção das tecnologias 4.0.

Ademais, constatou-se que a adoção, mesmo que de uma única tecnologia, foi baixa entre as empresas investigadas: 60% dos respondentes não adotam quaisquer tecnologias da Indústria 4.0. Dentre as 12 empresas que adotaram uma ou mais tecnologias, 10 adotaram Computação em Nuvem, 5 adotaram Sistemas de Integração Horizontal e Vertical, 4 adotaram Big Data e 4 adotaram Internet das Coisas Industrial. A constatação de que menos da metade das empresas adota alguma das tecnologias da Indústria 4.0 corrobora com os estudos revisados, os quais indicam que, apesar de todos os benefícios que podem ser obtidos com a utilização dessas tecnologias, a adoção pelas empresas em geral ainda é baixa, principalmente por empresas de pequeno e médio porte em países menos desenvolvidos.

As análises comparativas das empresas adotantes e não adotantes apontaram para a grande importância da mão de obra qualificada em tecnologias de informação e comunicação para a adoção das tecnologias 4.0, tal como os resultados de outros estudos. A internet de banda larga também se mostrou imprescindível, conforme o esperado, para que haja a adoção dessas tecnologias. Constatou-se também que tecnologias gerenciais “precedentes”, como ERP e MRP, podem ser consideradas como base para que as tecnologias 4.0 possam ser adotadas. A baixa adoção de ERP e MRP é um indicativo de defasagem tecnológica no gerenciamento das empresas da amostra, sobretudo das não adotantes das tecnologias da Indústria 4.0.

A busca por informações de tecnologias, mercado, produção e políticas públicas também se mostrou mais frequente em empresas adotantes, bem como as parcerias com instituições de pesquisa e agências de fomento à pesquisa. As adotantes também percebem com maior intensidade benefícios econômicos nas tecnologias da Indústria 4.0 e compatibilidades com suas competências internas. Esses achados corroboram com o modelo teórico TOE e mostram os aspectos das tecnologias, das organizações e do ambiente como fatores discriminantes entre adotantes e não adotantes de tecnologias da Indústria 4.0.

O modelo econométrico de regressão de dados de contagem (Poisson) reforçou a importância da disponibilidade de mão de obra qualificada em TICs, da adoção prévia de ERP e da percepção de compatibilidade das tecnologias para explicar o nível de adoção das tecnologias da Indústria 4.0 pelas empresas da amostra. Confirma-se, portanto, que a disponibilidade de recursos humanos e organizacionais, as competências internas e a

percepção das empresas são fatores que aumentam as chances de adoção e o nível de uso das tecnologias da Indústria 4.0 pelas pequenas e médias empresas analisadas.

Este trabalho se apresenta como um dos primeiros estudos no Brasil com investigação empírica que busca entender a situação atual das empresas com relação ao uso dessas tecnologias, bem como a percepção do que poderiam ser consideradas barreiras à maior difusão dessas tecnologias. Os achados do trabalho podem contribuir para um melhor entendimento do processo de adoção de inovações tecnológicas da Indústria 4.0 por pequenas e médias empresas. Esse entendimento é importante para indicar caminhos para políticas públicas e estratégias privadas visando uma maior difusão da “Filosofia da Indústria 4.0” entre pequenas e médias empresas no Brasil. Notou-se que a disponibilidade de mão de obra e serviços especializados em TICs, a busca constante por informações, as parcerias com instituições de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, a disponibilidade de internet de alta velocidade, a adoção prévia de outras tecnologias de gerenciamento da produção (MRP e ERP) e a percepção sobre as tecnologias 4.0 são fatores a serem desenvolvidos nas empresas para que haja uma maior adoção de tecnologias da Indústria 4.0. Políticas públicas e/ou estratégias de prestadores de serviços e empresas que desenvolvem estas tecnologias devem considerar esses fatores.

Por fim, o tamanho da amostra impossibilitou que fossem realizadas análises estatísticas mais robustas, o que se constitui na principal limitação do estudo. Em que pesem os esforços para a coleta dos dados primários, não foi possível obter uma amostra maior. Estudos futuros poderiam trabalhar com bases de dados que contemplem um maior número de empresas, tal que seja possível a realização de análises mais robustas. Avaliações quantitativas de impactos das tecnologias da Indústria 4.0 sobre indicadores de desempenho operacional e econômico das empresas também seriam de grande relevância para alavancar a difusão destas inovações na indústria nacional.

REFERÊNCIAS

AGENDA BRASILEIRA PARA A INDÚSTRIA 4.0. **Indústria 4.0**. Disponível em:

< <http://www.industria40.gov.br/>>. Acesso em: 26 de ago. de 2020.

ALCÁCER, V., CRUZ-MACHADO, V. Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, Volume 22, Issue 3. Pages 899-919, 2019.

ALCISTO, J., ENRIQUEZ, A., GARCIA, H., HINKSON, S., STEELMAN, T., SILVERMAN, E., ES-SAID, O. S. Tensile properties and microstructures of laser-formed Ti-6Al-4V. **Journal of materials engineering and performance**, 20(2), 203-212, 2011.

ALI, M. AND MILLER, L. ERP system implementation in large enterprises – a systematic literature review. **Journal of Enterprise Information Management** 30(4), pp. 666-692, 2017.

ALSHAMAILA, Y.; PAPAGIANNIDIS, S.; LI, F. Cloud computing adoption by SMEs in the north east of England. **Journal of enterprise information management**. 2013.

ANTIOCO, M.; KLEIJNEN, M. Consumer adoption of technological innovations Effects of psychological and functional barriers in a lack of content versus a presence of content situation. **European Journal of Marketing**. 44, 2010.

AZUMA, R. T. A survey of augmented reality. **Presence: Teleoperators & Virtual Environments**, 6(4), 355-385, 1997.

BABICEANU, R.F., SEKER, R. Big Data and virtualization for manufacturing cyberphysical systems: a survey of the current status and future outlook. **Comput. Ind.** 81, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.02.004>, 2016.

BAG, S.; GUPTA, S.; KUMAR, S. Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development. **International Journal of Production Economics**, v. 231, p. 107844, 2021.

BAG, S., WOOD, L.C., MANGLA, S.K., LUTHRA, S. Procurement 4.0 and its implications on business process performance in a circular economy. **Resour. Conserv. Recycl.** 152 (January), 104502, 2020.

BAKER, J. The technology–organization–environment framework. **Information Systems Theory**, p. 231-245, 2012.

BOCQUET, R.; BROSSARD, O.; SABATIER, M. Complementarities in organizational design and the diffusion of information technologies: An empirical analysis. **Research Policy**, v. 36, n. 3, p. 367-386, 2007.

BOGOVIZ, A., OSIPOV, V., CHISTYAKOVA, M., & BORISOV, M. **Comparative Analysis of Formation of Industry 4.0 in Developed and Developing Countries**. Springer International Publishing. 10.1007/978-3-319-94310-7_15, 2019.

BRASIL. **Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações**. Plano de Ação da Câmara Brasileira da Indústria 4.0 do Brasil 2019-2022. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. 10 p, 2019.

BRETTEL, M.; FRIEDERICHSEN, N.; KELLER, M.; ROSENBERG, M. How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. **International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering**, v.8, n.1, p.37-44, 2014.

BREUNIG, M., KELLY, R., MATHIS, R., WEE, D. **Getting the Most Out of Industry 4.0**. Retrieved March 12, 2018, from. <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/industry-40-looking-beyond-the-initial-hype>. 2016.

BRYNJOLFSSON, E. The productivity paradox of information technology. **Commun. ACM** 36 (12), 66–77, 1993.

BÜCHI, G.; CUGNO, M.; CASTAGNOLI, R. Smart factory performance and Industry 4.0. **Technological Forecasting and Social Change**, 150, 119790, 2020.

BUENO, A. F.; GODINHO FILHO, M.; FRANK, A. G. Smart production planning and control in the Industry 4.0 context: A systematic literature review. **Computers & Industrial Engineering**, 106774, 2020.

BUNTZ, B., 2016. **Top 10 Barriers for Adoption of the Internet of Things**. From. <http://www.ioti.com/security/top-10-reasons-people-aren-t-embracing-iiot>. Acessado em 19 de Março de 2021.

BUSACHI, A.; ERKOYUNCU, J.; COLEGROVE, P.; DRAKE, R.; WATTS, C.; MARTINA, F. Defining next-generation additive manufacturing applications for the ministry of defence (MoD). **Procedia Cirp**, 55, 302-307, 2016.

CARRER, M. J., de SOUZA FILHO, H. M., BATALHA, M. O., & ROSSI, F. R. Farm Management Information Systems (FMIS) and technical efficiency: An analysis of citrus farms in Brazil. **Computers and Electronics in Agriculture**, 119, 105-111, 2015.

CARRER, M. J., de SOUZA FILHO, H. M., BATALHA, M. O. Factors influencing the adoption of Farm Management Information Systems (FMIS) by Brazilian citrus farmers. **Computers and Electronics in Agriculture**, 138, 11-19, 2017.

CHIARELLO, F., TRIVELLI, L., BONACCORSI, A., FANTONI, G. Extracting and mapping industry technologies using wikipedia. **Comput. Ind.** 100, 244-257, 2018.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento**. Vol. II. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

COTTONG, S. Digital Transformation in business and Society. **Bulletin économique de la Chambre de Commerce**. Luxembourg 2016.

COTTYN, J., LANDEGHEM, H., STOCKMAN, K., DERAMMELAERE, S. A method to align a manufacturing execution system with Lean objectives, **Int. J. Prod. Res.**, vol. 49, no. 14, pp. 4397–4413, 2011.

CRAIGEN, D.; DIAKUN-THIBAUT, N.; PURSE, R. Defining cybersecurity. **Technology Innovation Management Review**, 4(10), 2014.

CRUZ-MEJÍA, O.; MÁRQUEZ, A.; MONSREAL-BARRERA, M. M. Product Delivery and Simulation for Industry 4.0. In: **Simulation for Industry 4.0**. Springer, Cham. p. 81-95, 2019.

DALENOGARE, L.S.; BENITEZ, G.B.; AYALA, N.F.; FRANK, A.G. The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance, **International Journal of Production Economics**, Volume 204, Pages 383-394, 2018.

DAVENPORT, T. Big data at work: dispelling the myths, uncovering the opportunities. **Harvard Business Review Press**, 2014.

DECKER, M., FISCHER, M., OTT, I. **Service Robotics and Human Labor**: A first technology assessment of substitution and cooperation, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 87. Pages 348-354, 2017.

DRATH, R., HORCH, A. Industrie 4.0: Hit or hype? [industry forum]. **IEEE industrial electronics magazine**, 8(2), 56-58, 2014.

EHRlich, P.J. **Pesquisa operacional: curso introdutório**. 5ª ed. São Paulo: Atlas, 1985.

FIESP, A. I. fiesp.com.br/noticias/, 5 de Maio 2018. Disponível em: <<https://www.fiesp.com.br/sicab/noticias/fiesp-identifica-desafios-da-industria-4-0-no-brasil-e-apresenta-propostas/>>. Acesso em: 26 de agosto de 2020.

FLEISCH, E.; WEINBERGER, M.; WORTMANN, F. Business models for the internet of things. **Bosch lab white paper**. http://www.iot-lab.ch/wp-content/uploads/2014/09/EN_Bosch-Lab-White-PaperGM-im-IOT-1_1.pdf, 2014.

FOSTER, A. D.; ROSENZWEIG, M. R. Microeconomics of Technology Adoption, **Annual Review of Economics**, Annual Reviews, vol. 2(1), pages 395-424, 2010.

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

FRAZIER, W. E. Metal additive manufacturing: a review. **Journal of Materials Engineering and performance**, 23(6), 1917-1928, 2014.

FUDLUNBERG, D., TIROLE, J. Preemption and rent equalization in the adoption of new technology. **Review of Economic Studies** 52, 383–401, 1985.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS – FGV; Serviço Brasileiro de Apoio a Micro e Pequenas Empresas – SEBRAE (2020). **Atualização de estudo sobre participação de micro e pequenas empresas na economia nacional**. Disponível em <<https://www.sebrae.com.br/sites/asn/uf/NA/pequenos-negocios-ja-representam-30-do-produto-interno-bruto-do-pais,7b965c911da51710VgnVCM1000004c00210aRCRD> >

GANGA, G.M.D. **Trabalho de Conclusão de Curso na Engenharia de Produção: um guia prático de conteúdo e forma**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 2012. v. 1. 300 p.

GARROCHO, C. T. B.; SILVA, M. C.; FERREIRA, C. M. S.; DA CUNHA CAVALCANTI, C. F. M.; OLIVEIRA, R. A. R.; 2020. Real-time systems implications in the blockchain-based vertical integration of industry 4.0. **Computer**, 53(9), 46-55, 2020.

GEISSBAUER, R., SCHRAUF, S., KOCH, V., 2014. Industry 4.0: Opportunities and Challenges of Industrial Internet, PricewaterhouseCoopers. Freudenberg IT. Available at: <https://www.pwc.nl/en/assets/documentAhlers>, **T. Industrie 4.0: The Big Unknown?** 2015

GEHRKE, L., KÜHN, A., RULE, D., MOORE, P., BELLMANN, C., SIEMES, S., DAWOOD, D., SINGH, L., KULIK, J., & STANDLEY, M. A Discussion of Qualifications and Skills in the Factory of the Future: A German and American Perspective. **Conference: Hanoover Messe**. 2015.

GIBSON, I.; STUCKER, B.; ROSEN, D. W. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. **New York: Springer**, 2010.

GILCHRIST, A.2016. **Industry 4.0: The Industrial Internet of Things** (1ª ed.). Apress, EUA.

GRAY, J. O.; DAVIS, S. T. Robotics in the food industry: an introduction. **In Robotics and Automation in the Food Industry** (pp. 21-35). Woodhead Publishing, 2013.

GREENE, W. H. **Econometric analysis**. Pearson Education, 2003.

GRILICHES, Z. Hybrid corn: An exploration in the economics of technological change. *Econometrica*, **Journal of the Econometric Society**, 501-522, 1957.

GUNAL, M. M. Simulation for Industry 4.0. Basel, Switzerland: **Springer Nature Switzerland AG**, 2019.

GUPTA, S. Organizational Barriers to Digital Transformation. **KTH Industrial Engineering and Management**, 2018.

HADDUD, A., DESOUZA, A., KHARE, A., LEE, H. Examining potential benefits and challenges associated with the Internet of Things integration in supply chains. **J. Manuf. Technol. Manag.** 28 (8), 1055–1085, 2017.

HADWER, A.A. et al. A systematic review of organizational factors impacting cloud-based technology adoption using Technology-organization-environment framework. **Internet of Things**, v. 15, p. 100407, 2021.

HALL, B. Innovation and Diffusion. **The Oxford Handbook of Innovation**. 10.1093/oxfordhb/9780199286805.003.0017, 2004.

HAUG, A., PEDERSEN, S.G. AND ARLBJØRN, J.S. IT readiness in small and medium-sized enterprises. **Industrial Management & Data Systems** 111 (4), pp. 490-508, 2011

HIBA, J.H.; SHNAIN, A.H.; HADISHAHEED, S.; AHMAD, A.H. BIG DATA AND FIVE V'S CHARACTERISTICS. **International Journal of Advances in Electronics and Computer Science**, ISSN: 2393-2835 Volume-2, Issue-1, 2015.

HOFMANN, E.; RÜSCH, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Comput. Ind.** 89, 23–34, 2017.

HORVÁTH, D.; SZABÓ, R.Z. Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities?, **Technological Forecasting and Social Change**, Volume 146, Pages 119-132, 2019

HUSSAIN, A.; MALIK, A.; HALIM, M. U.; ALI, A. M. The use of robotics in surgery: a review. **International journal of clinical practice**, 68(11), 1376-1382, 2014.

IANSTITI, M.; LAKHANI, K. Digital Ubiquity: How Connections, Sensors, and Data Are Revolutionizing Business. **Harvard business review**. 92, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Contas Nacionais Trimestrais. **Produto Interno Bruto – ótica da produção**. 2020.

ITU (2012) New ITU standards define the internet of things and provide the blueprints for its development. <http://www.itu.int/ITU-T/newslog/New?ITUStandardsDefineTheInternetOfThingsAndProvideTheBlueprintsForItsDevelopment.aspx>

JAVAID, M.; HALEEM, A. Additive manufacturing applications in medical cases: A literature based review. **Alexandria Journal of Medicine**, 54(4), 411-422, 2018.

JAVAID, M.; HALEEM, A. Using additive manufacturing applications for design and development of food and agricultural equipments. **International Journal of Materials and Product Technology**, 58(2-3), 225-238, 2019.

KAGERMANN H. et al. **Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution**. VDI nachrichten, 13. 2011.

KIMIAGARI, S.; BAEI, F. Promoting e-banking actual usage: mix of technology acceptance model and technology-organisation-environment framework. **Enterprise Information Systems**, p. 1-57, 2021.

KANNUS, K; ILVONEN, I. Future Prospects of Cyber Security in Manufacturing: Findings from a Delphi Study, Proceedings of the **51st Hawaii International Conference on System Sciences**, 2018.

KACHE, F.; SEURING, S. Challenges and opportunities of digital information at the intersection of Big Data Analytics and supply chain management. **International Journal of Operations & Production Management**. 37. 10-36. 10.1108/IJOPM-02-2015-0078, 2017.

KARSHENAS, M., STONEMAN, P. Rank, stock order and epidemic effects in the diffusion of new process technologies: an empirical model. **Rand Journal of Economics** 24 (4), 503–528, 1993.

KHAN, N., YAQOUB, I., HASHEM, I.A.T., INAYAT, Z., ALI, M., KAMALELDIN, W., ALAM, M.; SHIRAZ, M.; GANI, A. Big Data: Survey, Technologies, Opportunities, and Challenges. **The Scientific World Journal**. 2014.

KIEL, D.; MÜLLER, J. M.; ARNOLD, C.; VOIGT, K. I. Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0. **International journal of innovation management**, 21(08), 1740015, 2017.

KIRNER, C.; TORI, R. **Fundamentos de realidade aumentada**. Fundamentos e Tecnologia de Realidade Virtual e Aumentada, 1, 22-38, 2006.

KREVELEN, D.F.W.; Poelman, R. A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. **International Journal of Virtual Reality**; 9(2): 1-20, 2010.

LARA, M; SAUCEDO, J.; MARMOLEJO, J.; SALAIS, T.; VASANT, P. Vertical and horizontal integration systems in Industry 4.0. **Wireless Networks**. 26. 10.1007/s11276-018-1873-2, 2020.

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

LEE, C.-P.; SHIM, J. P. An exploratory study of radio frequency identification (RFID) adoption in the healthcare industry. **European Journal of Information Systems**, 16(6), 712–724, 2007.

LEURENT, H., BOER, E. D., “**Fourth Industrial Revolution Beacons of Technology and Innovation in Manufacturing**” White Paper, January 10, 2019. Disponível em: <https://www.weforum.org/whitepapers/fourth-industrial-revolution-beacons-of-technology-andinnovation-in-manufacturing>.

- LIAO, Y., DESCHAMPS, F., LOURES, E.D.F.R., RAMOS, L.F.P. Past, presente and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal. **International Journal of Production Research**, 55:12, 3609-3629, 2017.
- LI, L. China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of “Made-in-China 2025” and “Industry 4.0”. **Technological Forecasting and Social Change**, 135, 66-74, 2018.
- LIN, H. Understanding the determinants of electronic supply chain management system adoption: Using the technology–organization–environment framework. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 86, p. 80-92, 2014.
- LIPTON, J. I.; CUTLER, M.; NIGL, F.; COHEN, D.; LIPSON, H. Additive manufacturing for the food industry. **Trends in food science & technology**, 43(1), 114-123, 2015.
- LOHR, S. The Age of Big Data, p. 11. **New York Times**, 2012.
- LU, Y. Industry 4.0: a survey on technologies, applications and open research issues. **J. Indus. Inf. Integr.** 6, 1–10, 2017.
- LUTHRA, S.; MANGLA, S. K. Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. **Process Safety and Environmental Protection**. 117. 10.1016/j.psep.2018.04.018, 2018.
- MANAVALAN, E., & JAYAKRISHNA, K. A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. **Computers & Industrial Engineering**, 127, 925-953, 2019.
- MACCARTHY, B. L.; BLOME, C.; OLHAGER, J.; SRAI, J. S.; ZHAO, X. ‘Supply Chain Evolution – Theory, Concepts and Science’, **International Journal of Operations & Production Management**, in print. DOI (10.1108/IJOPM-02-2016-0080).
- MANSFIELD, E., 1961. Technological change and the rate of imitation. **Econometrica** 29, 741–766, 2016.

MANTRAVADI, S & MØLLER, C. An Overview of Next-generation Manufacturing Execution Systems: How important is MES for Industry 4.0?. **Procedia Manufacturing**. 30. 588-595. 10.1016/j.promfg.2019.02.083, 2019.

MCKINSEY & COMPANY. **Industry 4.0 after the Initial Hype: Where Manufacturers Are Finding Value and how they Can Best Capture it**. 2016.

MAJEED, A.A.; RUPASINGHE, T.D. Internet of Things (IoT) embedded future supply chains for industry 4.0: an assessment from an ERP-based fashion apparel and footwear industry. **Int. J. Supply Chain Manag.** 6 (1), 25–40, 2017.

MANAVALAN, E.; JAYAKRISHNA, K. A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. **Computers & Industrial Engineering**, 127, 925-953, 2019.

MAROUFKHANI, P.; TSENG, M. L.; IRANMANESH, M.; ISMAIL, W. K. W.; KHALID, H. Big data analytics adoption: Determinants and performances among small to medium-sized enterprises. **International Journal of Information Management**, 54, 102190, 2020.

MARTINELLI, A.; MINA, A.; MOGGI, M. "[The Enabling Technologies of Industry 4.0: Examining the Seeds of the Fourth Industrial Revolution](#)," [LEM Papers Series](#) 2019/09, **Laboratory of Economics and Management (LEM)**, Sant'Anna School of Advanced Studies, Pisa, Italy. 2019.

MCAFEE, A.; BRYNJOLFSSON, E.; DAVENPORT, T. H.; PATIL, D. J.; BARTON, D. Big data: the management revolution. **Harvard business review**, 90(10), 60-68, 2012

MCCLELLAN, M. Introduction to manufacturing execution systems, MES. **Conf. Expo.**, pp. 1–12, 2001.

MESA White Paper #01: The Benefits of MES: A Report from the Field,” vol. 3, MESA International, 1997, p. 3.

MISHRA, A. N.; KONANA, P.; BARUA, A. Antecedents and consequences of internet use in procurement: An empirical investigation of us manufacturing firms. **Information Systems Research**, 18(1), 103–120, 2007.

MOORE, G. C.; BENBASAT, I. Development of an instrument to measure the perceptions of adopting an information technology innovation. **Information Systems Research**, v. 2, n. 3, 1991.

MÜLLER, C., J. ELLIOTT, T.A.M. PUGH, A.C. RUANE, P. CIAIS, J. BALKOVIC, D. DERYNG, C. FOLBERTH, R.C. IZAURRAIDE, C.D. JONES, N. KHABAROV, P. LAWRENCE, W. LIU, A.D. REDDY, E. SCHMID, and X. WANG: Global patterns of crop yield stability under additional nutrient and water inputs. **PLoS ONE**, **13**, no. 6, e0198748, doi:10.1371/journal.pone.0198748, 2018.

NAM, K.; DUTT, C. S.; CHATHOTH, P.; DAGHFOUS, A.; KHAN, M. S.; 2020. The adoption of artificial intelligence and robotics in the hotel industry: Prospects and challenges. **Electronic Markets**, 1-22, 2020.

NAJMON, J. C.; RAEISI, S.; TOVAR, A. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. **Additive manufacturing for the aerospace industry**, 7-31, 2019.

NAKATA, C.; WEIDNER, K. Enhancing new product adoption at the base of the pyramid: a contextualized model. **J. Prod. Innovat. Manag.** 29, 21–32, 2012.

NORTH, D. C. Economic performance through time. **The American economic review**, 84(3), 359-368, 1994.

O'HALLORAN, D.; KVOCHKO, E. Industrial internet of things: unleashing the potential of connected products and services. In: **World Economic Forum**, p. 40, 2015.

OSTER, S. The diffusion of innovations among steel firms: the basic oxygen furnace. **Bell Journal of Economics** 13, 45–56, 1982.

PALMARINI, R.; ERKOYUNCU, J.A.; ROY, R. An Innovate Process to Select Augmented Reality (AR) Technology for Maintenance, **Procedia CIRP**, Volume 59, 2017, pp. 23–28, 2017.

PAN, M.; PAN, W. Determinants of adoption of robotics in precast concrete production for buildings. **Journal of Management in Engineering**, 35(5), 05019007, 2019.

PARASURAMAN, A. Technology readiness index: a multiple-item scale to measure readiness to embrace new technologies. **J Serv Res** ;2(4):307–20, 2000.

PARENTE, S. L., PRESCOTT, E. C. Barriers to technology adoption and development. **Journal of political Economy**, 102(2), 298-321, 1994.

de PAULA FERREIRA, W.; ARMELLINI, F.; DE SANTA-EULALIA, L. A. Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. **Computers & Industrial Engineering**, 106868, 2020.

PÉREZ-LARA, M.; SAUCEDO-MARTÍNEZ, J. A.; MARMOLEJO-SAUCEDO, J. A.; SALAIS-FIERRO, T. E.; VASANT, P. Vertical and horizontal integration systems in Industry 4.0. **Wireless Networks**, 1-9, 2018.

PIARALAL, S. K.; NAIR, S. R.; YAHYA, N.; KARIM, J. A. An integrated model of the likelihood and extent of adoption of green practices in small and medium sized logistics firms. **American Journal of Economics**, 5, 251–258, 2015.

PILLAI, R., SIVATHANU, B., MARIANI, M., RANA, N. P., YANG, B., & DWIVEDI, Y. K. Adoption of AI-empowered industrial robots in auto component manufacturing companies. **Production Planning & Control**, 1-17, 2021.

PIEDRAHITA, A.F.M.; GAUR, V.; GIRALDO, J.; CARDENAS, A.A.; RUEDA, S.J. Virtual incident response functions in control systems, **Comput. Networks** 135, 147–159, 2018.

PILLAI, R.; SIVATHANU, B.; MARIANI, M.; RANA, N. P.; YANG, B.; DWIVEDI, Y. K. Adoption of AI-empowered industrial robots in auto component manufacturing companies. **Production Planning & Control**, 1-17, 2021.

PINHEIRO, J. I. et al. **Estatística Básica**. A arte de Trabalhar com Dados. São Paulo: Elsevier, 2009.

PINZONE, M., FANTINI, P., PERINI, S., GARAVAGLIA, S., TAISCH, M., MIRAGLIOTTA, G. Jobs and Skills in Industry 4.0: An Exploratory Research. IFIP **International Conference on Advances in Production Management Systems**

(APMS), Hamburg, Germany. pp.282-288, [ff10.1007/978-3-319-66923-6_33](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_33)ff. [ffhal-01666201f](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66923-6_33), 2017.

PIRES, P.; FILHO, B. C.; CUNHA, J. Technology Readiness Index (TRI) Factors as Differentiating Elements between Users and Non Users of Internet Banking, and as Antecedents of the Technology Acceptance Model (TAM). **Communications in Computer and Information Science**. 220. 215-229, 2011.

PORTER, C.E.; DONTU, N. “Using the technology acceptance model to explain how attitudes determine internet usage: the role of perceived access barriers and demographics”, **Journal of Business Research**, Vol. 59, pp. 999-1007, 2006.

PORTER, M.; HEPPELMANN, J. How smart, connected products are transforming competition. **Harv. Bus. Rev.** 92, 64–88, 2014.

POSADA, J.; TORO, C.; BARANDIARAN, I.; OYARZUN, D.; STRICKER, D.; AMICIS, DE R.; PINTO, B.E.; EISERT, P.; DÖLLNER, J.; VALLARINO, I. Visual computing as a key enabling technology for Industrie 4.0 and industrial internet. **IEE Comput. Graph. Appl.** 35, 26–40, 2015.

QIU, R.G., E ZHOU, M. Mighty MESs; State-of-the-Art and Future Manufacturing Execution Systems, **IEEE Robot. Autom. Mag.**, vol. 11, no. 1, pp. 19–40, 2004.

RAGUSEO, E. Big data technologies: An empirical investigation on their adoption, benefits and risks for companies. **International Journal of Information Management**, 38(1), 187-195, 2018.

RAJ, A.; DWIVEDI, G.; SHARMA, A.; JABBOUR, A. B.; RAJAK, S. Barriers to the Adoption of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing Sector: An Inter-Country Comparative Perspective. **International Journal of Production Economics**. 224. 107546. [10.1016/j.ijpe.2019.107546](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107546), 2020.

RAMDANI, B.; KAWALEK, P.; LORENZO, O. Predicting SMEs adoption of enterprise systems. **Journal of Enterprise Information Management**, 22(2), 10–24, 2009.

RAM, S.; SHETH, J.N. “Consumer resistance to innovations: the marketing problem and its solutions”, **Journal of Consumer Marketing**, Vol. 6 No. 2, pp. 5-14, 1989.

RAS, E.; WILD, F.; STAHL, C.; BAUDET, A. Bridging the skills gap of workers in Industry 4.0 by human performance augmentation tools: Challenges and roadmap. In **Proceedings of the 10th International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments** (pp. 428-432). ACM, 2017.

REINGANUM, J. On the diffusion of new technology: a game theoretic approach. **Review of Economic Studies** 48, 395–405, 1981.

REISCHAUER, G. Industry 4.0 as policy-driven discourse to institutionalize innovation systems in manufacturing. **Technol. Forecast. Soc. Change** 132, 26–33, 2018.

REYES, P.M.; LI, S.; VISICH, J.K. Determinants of RFID adoption stage and perceived benefits. **European Journal of Operational Research**, 254(3), 801-812, 2016.

RÍOS, J.; MAS, F.; MARCOS, M.; VILA, C.; UGARTE, D.; CHEVROT, T. Accelerating the adoption of industry 4.0 supporting technologies in manufacturing engineering courses. **Mater. Sci. Forum** 903, 100–111, 2017.

ROBLEK, V.; MESKO, M.; KRAPEZ, A. A complex view of industry 4.0. **SAGE Open** 6, 2016.

ROGERS, E. M. **Diffusion of innovations**. 3. ed. New York: The Free Press, 1983

RUBMANN, M. et al. **Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries**. The Boston Consulting Group. P. 5-20; 2015.

RUPASINGHE, T.; MAJEED M.A.A. Internet of Things (IoT) Embedded Future Supply Chains for Industry 4.0: An Assessment from an ERP-based Fashion Apparel and Footwear Industry. **Journal of Supply Chain Management**. 6, 2017.

SALDIVAR, A.A.F.; LI, Y., CHEN, W.; ZHAN, Z.; ZHANG, J.; CHEN, L.Y. Industry 4.0 with cyber-physical integration: a design and manufacture perspective. In: 2015 **21st International Conference on Automation and Computing (ICAC)**. IEEE, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICoAC.2015.7313954>, 2015.

SAUER, O. Trends in manufacturing execution systems. In **Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology** (pp. 685-693). Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.

SARVANKAR, S. G.; YEWALE, S. N. Additive manufacturing in automobile industry. **Int. J. Res. Aeronaut. Mech. Eng.**, 7(4), 1-10, 2019.

SCHEAFFER, R. L.; MULEKAR, M. S.; MACCLAVE, J. T. **Probability and Statistics for Engineers**. 5a. ed. Florida: Duxbury Press, 2010

SCHRÖDER, C. “**The Challenges of Industry 4.0 for Small and Medium-sized Enterprises.**” 2016.

SCHUH, G.; ANDERL, R.; GAUSEMEIER, J.; ten HOMPEL, M.; WAHLSTER, W. Industrie 4.0 maturity index. **Managing the Digital Transformation of Companies. Munich: Herbert Utz.** 2017.

SCHUMPETER, J. **A teoria do Desenvolvimento Econômico: uma investigação sobre os lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico.** São Paulo. Editora Nova Cultural, 1997.

SCHWAB, K. **A Quarta Revolução Industrial.** Tradução Daniel Moreira Miranda. São Paulo. Edipro, 2016.

SIDI, F.; PANAHY, P. H. S.; AFFENDEY, L. S.; JABAR, M. A.; IBRAHIM, H.; MUSTAPHA, A. **Data quality: A survey of data quality dimensions.** 10.1109/InfRKM.2012.6204995, 2013.

SILA, I. Factors affecting the adoption of B2B e-commerce technologies. **Electronic Commerce Research**, 13 (2), 199-236, 2013.

SOUZA, R. V.; LUCE, F. B. Avaliação da aplicabilidade do technology readiness index (tri) para a adoção de produtos e serviços baseados em tecnologia. **Rev. adm. contemp.**, Curitiba, v. 9, n. 3, p. 121-141, 2005.

de SOUZA FILHO, H. M.; BUAINAIN, A. M.; da SILVEIRA, J. M. F. J.; VINHOLIS, M. D. M. B. Condicionantes da adoção de inovações tecnológicas na agricultura. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, 28(1), 223-255, 2011.

de SOUSA JABBOUR, A. B. L.; JABBOUR, C. J. C.; FOROPON, C.; GODINHO FILHO, M. When titans meet—Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. **Technological Forecasting and Social Change**, 132, 18-25, 2018.

STOLARICK, K. **IT Spending and Firm Productivity**: Additional Evidence from the Manufacturing Sector, 1999.

STONEMAN, P. Technological diffusion: the viewpoint of economic theory. **Ricerche Economiche** 4, 585–606, 1986.

SUGANDI, L.; KURNIAWAN, Y.; ASALLA, L.K. Change Management Strategy for Organization in the Era of Industry 4.0. **International Journal of Recent Technology and Engineering** (IJRTE) ISSN: 2277-3878, Volume-8 Issue-5, 2020.

SYBERFELDT, A.; DANIELSSON, O.; HOLM, M.; WANG, L. Visual Assembling Guidance Using Augmented Reality, **Procedia Manuf.** 1 (2015) 98–109, 2015.

TAN, S. Y.; TAEIHAGH, A. Governing the adoption of robotics and autonomous systems in long-term care in Singapore. **Policy and Society**, 1-21, 2020.

TANG, J.; ZHANG, B.; AKRAM, U. User willingness to purchase applications on mobile intelligent devices: evidence from app store. **Asia Pacific Journal of Marketing and Logistics**, 2019.

TAŞTAN, H.; GÖNEL, F. ICT labor, software usage, and productivity: firm-level evidence from Turkey. **Journal of Productivity Analysis**, p. 1-21, 2020.

TAURION, C. **Cloud computing-computação em nuvem**. Brasport. 2009.

THONG, J.Y.L. An integrated model of information systems adoption in small business. **Journal of Management Information Systems**, 15(4), 187–214, 1999.

TIDD, J.; BESSANT, J.; PAVITT, K. **Managing innovation: integrating technological, market and organizational change**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.

TILLEY, J. Automation, robotics, and the factory of the future. **McKinsey**. <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/automation-robotics-and-the-factory-of-the-future>, 2017.

TIRONI, L. F.; CRUZ, B. D. O. Inovação incremental ou radical: há motivos para diferenciar? Uma abordagem com dados da **PINTEC**, 2008.

TORTORELLA, G.L.; FOGLITATTO, F.S.; ESPÔSTO, K.F. et al. Effects of contingencies on healthcare 4.0 technologies adoption and barriers in emerging economies. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 156, p. 120048, 2020.

TORTORELLA, G.L.; FOGLITATTO, F.S.; ESPÔSTO, K.F. et al. Measuring the effect of Healthcare 4.0 implementation on hospitals' performance. **Production Planning & Control**, v. 33, n. 4, p. 386-401, 2022.

TORTORELLA, G. L., VERGARA, A. M. C., GARZA-REYES, J. A., SAWHNEY, R. Organizational learning paths based upon industry 4.0 adoption: An empirical study with Brazilian manufacturers, **International Journal of Production Economics**, Volume 219, Pages 284-294, 2020.

TURKES, M.C.; ONCIOIU, I.; ASLAM, H.D.; MARIN-PANTELESCU, A.; TOPOR, D. I.; CAPUSNEANU, S. Drivers and Barriers in Using Industry 4.0: A Perspective of SMEs in Romania. **Processes**. 7. 153. 10.3390/pr7030153, 2019.

de UGARTE, B.S.; ARTIBA, A.; AND PELLERIN, R. "Manufacturing execution system - A literature review," **Prod. Plan. Control**, vol. 20, no. 6, pp. 525–539, 2009.

VASCONCELLOS, L.; GUEDES, L.; 2007. E-surveys: Vantagens e limitações dos questionários eletrônicos via internet no contexto da pesquisa científica. **X Semead--Seminários em Administração Programa de Pós-Graduação em Administração**. 9-10.

VELASQUEZ, N.; ESTEVEZ, E.; PESADO, P. Cloud Computing, Big Data and the Industry 4.0 Reference Architectures. **Journal of Computer Science and Technology**. 18. e29, 2018.

WAMBA, S. F.; AKTER, S.; EDWARDS, A. J.; CHOPIN, G.; GNANZOU, D. How 'big data' can make big impact: Findings from a systematic review and a longitudinal case study. **International Journal of Production Economics**. 10.1016/j.ijpe.2014.12.031, 2014.

WANG, K.; TONG, S.; ROUCOULES, L.; EYNARD, B. Analysis of Data Quality and Information Quality Problems in Digital Manufacturing - In: The **4th IEEE International Conference on Management of innovation & Technology**, Thailand, 2008.

WANG, L.; TÖRNGREN, M.; ONORI, M. Current status and advancement of cyberphysical systems in manufacturing. **J. Manuf. Syst.** 37, 517–527, 2015.

WANG, S.; WAN, J.; ZHANG, D.; LI, D.; ZHANG, C. Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data-based feedback and coordination. **Comput. Network.** 101, 158–168, 2016.

WANG, Y.; KUNG, L.; BYRD, T. A. Big data analytics: Understanding its capabilities and potential benefits for healthcare organizations. **Technological Forecasting and Social Change**, 126, 3-13, 2018.

WEI, J.; LOWRY, P.B.; SEEDORF, S. The assimilation of RFID technology by Chinese companies. **Information & Management**, 52(6), 628-642, 2015.

WELLER, C.; KLEER, R.; PILLER, F. T. Economic Implications of 3D Printing: Market Structure Models in Light of Additive Manufacturing Revisited. **International Journal of Production Economics**, 164: 43–56. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.020>, 2015.

WHITE, M. Digital workplaces: Vision and reality. **Business Information Review**, 29(4), 205-214, 2012.

WORLD ECONOMIC FORUM, **Readiness for the Future of Production Report 2018**, Insight Report in collaboration with A.T. Kearney. Disponível em: <<http://wef.ch/fopreadiness18>>. Acessado em: <8 de set. de 2020>.

WORLD ECONOMIC FORUM, **Fourth Industrial Revolution -Beacons of Technology and Innovation in Manufacturing 2019**, In collaboration with McKinsey & Company, 2019.

WORTMANN, F.; FLÜCHTER, K. Internet of things. **Business & Information Systems Engineering**, 57(3), 221-224, 2015.

XU, M.; DAVID, J. M.; KIM, S. H. The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges. **International Journal of Financial Research**. 9. 90. 10.5430/ijfr.v9n2p90, 2018.

XU, X. From cloud computing to cloud manufacturing. **Robotics and computer-integrated manufacturing**, 28(1), 75-86, 2012.

YIN, Y.; STECKE, K.E.; LI, D. The evolution of production systems from industry 2.0 through industry 4.0. **Int. J. Prod. Res.** 7543, 1–14, 2017.

ZALTMAN, G.; DUNCAN, R.; HOLBEK, J. **Innovations and Organizations**, Wiley and Sons, New York (N.Y.), 1973.

ZEZULKA, F.; MARCON, P.; VESELY, I.; SAJDL, O. Industry 4.0 – an introduction in the phenomenon. **IFAC-PapersOnLine** 49, 8–12, 2016.

ZHU, K.; KRAEMER, K.; AND XU, S. Electronic business adoption by European firms: a cross-country assessment of the facilitators and inhibitors. **European Journal of Information Systems**, 12, 251-268, 2003.

ZHU, K., KRAEMER, K. L., & XU, S. The process of innovation assimilation by firms in different countries: A technology diffusion perspective on e-business. **Management Science**, 52(10), 1557–1576, 2006.

ANEXO A. Questionário aplicado na pesquisa de campo

Questionário Pesquisa Indústria 4.0 - Departamento de Engenharia de Produção /UFSCar

Caro(a) participante,

Este questionário faz parte da pesquisa de mestrado intitulada "Barreiras à adoção de tecnologias da indústria 4.0 por pequenas e médias empresas do estado de São Paulo". A pesquisa é desenvolvida no Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Os objetivos do trabalho são identificar as principais barreiras à adoção de tecnologias da indústria 4.0 pelas empresas, bem como suas expectativas em relação a essas tecnologias. Os dados coletados serão utilizados única e exclusivamente para os fins da pesquisa, sendo tratados apenas no agregado das empresas. Portanto, os respondentes não serão identificados individualmente e os dados não serão repassados a terceiros em nenhuma hipótese. Contamos com vossa colaboração para responder ao questionário de aproximadamente 15 minutos. Quaisquer dúvidas ou esclarecimentos, colocamo-nos totalmente à disposição.

Sua participação é fundamental para viabilizar essa pesquisa que poderá ter impactos para a indústria nacional.

Cordialmente,

Pesquisador: Antonio Arnaldo Baio Junior - (16) 99119-3819 ou

antoniobaiojr@gmail.com

Orientador da Pesquisa: Prof. Dr. Marcelo José Carrer - (14) 99141-4005 ou

marcelocarrer@dep.ufscar.br

*Obrigatório

1. Nome da empresa: *

2. Município de localização: *

3. Principal ou principais segmentos de atuação da empresa: *

Marque todas que se aplicam.

- Agrícola
- Automotiva
- Fabricante de Equipamentos
- Fabricante de Máquinas
- Médica e Odontológica
- Moldes e Matrizes
- Prestação de Serviços de Usinagem
- Outros

4. Quantos funcionários a empresa possui? *

Marcar apenas uma oval.

- até 10 funcionários
- de 11 a 20 funcionários
- de 21 a 30 funcionários
- de 31 a 40 funcionários
- acima de 40 funcionários

5. Tempo de existência da empresa no mercado: *

Marcar apenas uma oval.

- Até 2 anos
- de 2 a 5 anos
- de 6 a 10 anos
- 11 a 20 anos
- acima de 20 anos

6. Avalie, no geral, o grau de qualificação da mão de obra da sua empresa, sendo 1 * (muito baixo) e 5 (muito alto):

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Muito baixo	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Muito alto

7. A empresa possui funcionários especializados em tecnologias de informação e * comunicação (TIC)?

Marcar apenas uma oval.

- Sim
- Não

8. A empresa utiliza serviços de consultoria e/ou assessoria em áreas de gestão? *

Marcar apenas uma oval.

- Sim
- Não

9. A empresa utiliza serviços de consultoria e/ou assessoria na área de tecnologia da informação (TI)? *

Marcar apenas uma oval.

- Sim
 Não

10. A empresa utiliza algum sistema em computador para organizar atividades de produção, finanças e vendas (por exemplo, planilhas de Excel ou softwares/aplicativos de gestão)? *

Marcar apenas uma oval.

- Sim
 Não

11. A empresa utiliza softwares de gestão integrada ERP (Enterprise Resource Planning ou Planejamento de Recursos Empresariais) ou MRP (Material Requirement Planning ou Planejamento de Recursos de Produção) para o gerenciamento da produção? *

Marcar apenas uma oval.

- Sim, ambos
 Sim, ERP
 Sim, MRP
 Não
 Desconheço essas tecnologias

12. A empresa utiliza sistemas MES (Manufacturing Execution Systems, ou Sistema de Execução de Fabricação) para gerenciar e coordenar as atividades de produção? *

Marcar apenas uma oval.

- Sim
 Não
 Desconheço essa tecnologia

13. A empresa possui quantas máquinas com comando numérico computadorizado (CNC)? *

Marcar apenas uma oval.

- 0
 1 a 3
 4 a 6
 7 a 10
 11 a 20
 Mais do que 20

14. A alta gerência costuma acessar a internet para obter informações de produção, mercado, tecnologias, políticas públicas, etc.? *

Marcar apenas uma oval.

- Sim
 Não

15. A empresa incentiva seus funcionários a acessarem e compartilharem informações sobre novas tecnologias de produção e gestão? *

Marcar apenas uma oval.

- Sim
 Não

16. Na sua opinião, a empresa costuma testar novas tecnologias e práticas organizacionais com que frequência? (Quanto maior o número na escala, maior a frequência com que a empresa testa) *

Marcar apenas uma oval.

- 1 2 3 4 5
-
- nenhuma/não costuma testar muita frequência/está sempre testando

17. Há conexão de internet com alta velocidade (fibra ótica, banda larga) disponível na empresa? *

Marcar apenas uma oval.

- Sim
 Não

18. A empresa participa de programas de cooperação com Universidades, Institutos de Ciência e Tecnologia ou Agências de Fomento à Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico? *

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

19. A empresa acessa linhas de crédito, como por exemplo a do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), ou de outras instituições financeiras, para a compra de máquinas, equipamentos e/ou novas tecnologias? *

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

20. Na sua percepção, qual o grau de facilidade quanto à obtenção de crédito e recursos financeiros? (Quanto maior o número na escala, maior a facilidade de obtenção de crédito) *

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5

Muito difícil Muito fácil

Tecnologias da Indústria 4.0.

Essa seção trata de algumas tecnologias da indústria 4.0, do nível de conhecimento da empresa e da intenção de adotar estas tecnologias no futuro.

21. O(a) Sr.(a) tem conhecimento da existência da Câmara Brasileira da Indústria 4.0 ou de outras iniciativas nacionais ou locais para a difusão das Tecnologias da Indústria 4.0? *

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

22. Com relação aos sistemas de informação e comunicação para o gerenciamento e análise de grandes bases de dados, tecnologia chamada "Big Data" (tecnologia onde grandes quantidades de dados são recolhidos e armazenados para posterior utilização em previsões de manutenção, capacidades de produção, custos, etc.), assinale a alternativa mais apropriada para sua empresa. (quanto menor o número, menor o conhecimento sobre essa tecnologia; quanto maior o número, maior o conhecimento sobre essa tecnologia) *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Desconhecemos totalmente essa tecnologia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Conhecemos bem essa tecnologia

23. Considero que sistemas de informação e comunicação para o gerenciamento de grandes bases de dados (Big Data) trazem benefícios econômicos (redução de custos, aumento nos lucros) para as empresas. (quanto menor o número, menores os benefícios econômicos obtidos com essa tecnologia; quanto maior o número, maiores os benefícios econômicos obtidos com essa tecnologia, segundo sua opinião) *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente / desconheço totalmente essa tecnologia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

24. Considero que sistemas de informação e comunicação para o gerenciamento de grandes bases de dados (Big Data) são compatíveis com as competências da minha empresa. (quanto menor o número, menos compatíveis com as competências da sua empresa; quanto maior o número, mais compatíveis com as competências da sua empresa, segundo sua opinião) *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente/ desconheço totalmente essa tecnologia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

25. Considero que sistemas de informação e comunicação para o gerenciamento de grandes bases de dados (Big Data) são complexos e difíceis de gerenciar. (quanto maior o número, mais complexos e difíceis de gerenciar, segundo sua opinião) *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente / desconheço totalmente essa tecnologia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

26. A empresa adota sistemas de informação e comunicação para o gerenciamento de grandes bases de dados (Big Data)? Se sim, pule a próxima questão. *

Marcar apenas uma oval.

Sim

Não

27. Qual seria a chance de sua empresa adotar sistemas de informação e comunicação para o gerenciamento e análise de grandes bases de dados (Big Data) nos próximos 5 anos?

Marcar apenas uma oval.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Nenhuma chance	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Chance muito grande

28. Com relação à tecnologia chamada "Internet das coisas industrial" (tecnologia que permite, por exemplo, que máquinas e equipamentos enviem e recebam informações que podem ser acessadas por sistemas de gerenciamento e aplicativos via internet), assinale a alternativa mais apropriada para a sua empresa. (quanto menor o número, menor o conhecimento sobre essa tecnologia; quanto maior o número, maior o conhecimento sobre essa tecnologia) *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Desconhecemos totalmente essa tecnologia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Conhecemos bem essa tecnologia

29. Considero que a internet das coisas industrial traz benefícios econômicos (redução de custos, aumento nos lucros) para as empresas. (quanto menor o número, menores os benefícios econômicos obtidos com essa tecnologia; quanto maior o número, maiores os benefícios econômicos obtidos com essa tecnologia, segundo sua opinião) *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente / desconheço totalmente essa tecnologia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

30. Considero que internet das coisas industrial é compatível com as competências da minha empresa. (quanto menor o número, menos compatível com as competências da sua empresa; quanto maior o número, mais compatível com as competências da sua empresa, segundo sua opinião) *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente / desconheço totalmente essa tecnologia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

31. Considero que a internet das coisas industrial é complexa e difícil de gerenciar. * (quanto maior o número, mais complexa e difícil de gerenciar, segundo sua opinião)

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente / desconheço totalmente essa tecnologia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

32. A empresa já adota internet das coisas industrial? Se a resposta for sim, pule a próxima questão. *

Marcar apenas uma oval.

- Sim
 Não

33. Qual seria a chance de sua empresa adotar a internet das coisas industrial nos próximos 5 anos?

Marcar apenas uma oval.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Nenhuma chance	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Chance muito grande

34. Com relação à tecnologia "Integração de Sistemas Vertical e Horizontal", que são sistemas informatizados para a integração vertical (que permitem o envio e a troca de informações dentro da sua empresa - produção e vendas, por exemplo) e horizontal (que permitem o envio e a troca de informações entre sua empresa e seus fornecedores e clientes), assinale a alternativa mais apropriada para sua empresa. (quanto menor o número, menor o conhecimento sobre essa tecnologia; quanto maior o número, maior o conhecimento sobre essa tecnologia) *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Desconhecemos totalmente essa tecnologia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Conhecemos bem essa tecnologia

35. Considero que sistemas informatizados para a integração vertical (atividades dentro da empresa - produção e vendas, por exemplo) e horizontal (atividades entre a empresa e seus fornecedores e clientes) trazem benefícios econômicos (redução de custos, aumento nos lucros) para as empresas. (quanto menor o número, menores os benefícios econômicos obtidos com essa tecnologia; quanto maior o número, maiores os benefícios econômicos obtidos com essa tecnologia, segundo sua opinião) *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente / desconheço totalmente essa tecnologia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

36. Considero que sistemas informatizados para a integração vertical (atividades dentro da empresa - produção e vendas, por exemplo) e horizontal (atividades entre a empresa e seus fornecedores e clientes) são compatíveis com as competências da minha empresa. (quanto menor o número, menos compatível com as competências da sua empresa; quanto maior o número, mais compatível com as competências da sua empresa, segundo sua opinião) *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente / desconheço totalmente essa tecnologia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

37. Considero que sistemas informatizados para a integração vertical (atividades dentro da empresa - produção e vendas, por exemplo) e horizontal (atividades entre a empresa e seus fornecedores e clientes) são complexos e difíceis de gerenciar. (quanto maior o número, mais complexos e difíceis de gerenciar, segundo sua opinião) *

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5

Discordo totalmente / desconheço totalmente essa tecnologia Concordo totalmente

38. A empresa já adota sistemas informatizados para a integração vertical e horizontal de atividades? Se a resposta for sim, pule a próxima questão. *

Marcar apenas uma oval.

- Sim
 Não

39. Qual seria a chance de sua empresa adotar sistemas informatizados para a integração vertical (atividades dentro da empresa - produção e vendas, por exemplo) e horizontal (atividades entre a empresa e seus fornecedores e clientes) nos próximos 5 anos?

Marcar apenas uma oval.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Nenhuma chance Chance muito grande

40. Com relação à tecnologia "Computação em Nuvem" (tecnologia que permite o armazenamento de dados em nuvem, que podem ser acessados em qualquer lugar através de dispositivos conectados à internet), assinale a alternativa mais apropriada para a sua empresa. (quanto menor o número, menor o conhecimento sobre essa tecnologia; quanto maior o número, maior o conhecimento sobre essa tecnologia) *

Marcar apenas uma oval.

1 2 3 4 5

Desconhecemos totalmente essa tecnologia Conhecemos bem essa tecnologia

41. Considero que computação em nuvem traz benefícios econômicos (redução de custos, aumento nos lucros) para as empresas. (quanto menor o número, menores os benefícios econômicos obtidos com essa tecnologia; quanto maior o número, maiores os benefícios econômicos obtidos com essa tecnologia, segundo sua opinião) *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente / desconheço totalmente essa tecnologia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

42. Considero que computação em nuvem é compatível com as competências da minha empresa. (quanto menor o número, menos compatível com as competências da sua empresa; quanto maior o número, mais compatível com as competências da sua empresa, segundo sua opinião) *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente / desconheço totalmente essa tecnologia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

43. Considero que a computação em nuvem é complexa e difícil de gerenciar. (quanto maior o número, mais complexa e difícil de gerenciar, segundo sua opinião) *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	
Discordo totalmente / desconheço totalmente essa tecnologia	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Concordo totalmente

44. A empresa já adota computação em nuvem? Se a resposta for sim, pule a próxima questão. *

Marcar apenas uma oval.

- Sim
 Não

45. Qual seria a chance de sua empresa adotar computação em nuvem nos próximos 5 anos?

Marcar apenas uma oval.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Nenhuma chance	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Chance muito grande

Barreiras à adoção das tecnologias

Essa seção trata das principais barreiras à adoção das tecnologias. Essas barreiras, apontadas em diversos estudos, podem dificultar ou impedir que uma tecnologia seja adotada por uma empresa. Por favor, assinale na escala o quão importante é, na sua opinião, cada uma das barreiras a seguir, levando-se em conta a adoção das tecnologias Big Data, Internet das Coisas Industrial, Integração Vertical e Horizontal de Sistemas, e Computação em Nuvem, por uma empresa. (quanto mais importante, mais essa barreira pode dificultar ou impedir a adoção das tecnologias, segundo sua opinião)

46. Falta de conhecimento sobre a tecnologia a ser adotada. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Barreira pouco importante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Barreira muito importante

47. Altos investimentos para a implementação da tecnologia a ser adotada. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Barreira pouco importante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Barreira muito importante

48. Falta de clareza em relação aos benefícios econômicos e ganhos de produtividade que a tecnologia a ser adotada trará. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Barreira pouco importante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Barreira muito importante

49. Riscos de falhas de ciber segurança (risco de roubo de dados sigilosos, por exemplo). *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Barreira pouco importante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Barreira muito importante

50. Baixo nível de maturidade da tecnologia a ser adotada (tecnologia ainda não está totalmente funcional). *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Barreira pouco importante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Barreira muito importante

51. Desafios na garantia, análise, integração e qualidade dos dados compartilhados entre setores da empresa ou entre empresas. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Barreira pouco importante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Barreira muito importante

52. Falta de uma cultura digital interna e de treinamento de pessoas. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Barreira pouco importante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Barreira muito importante

53. Resistência à mudança por parte das pessoas. *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Barreira pouco importante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Barreira muito importante

54. Falta de padrões regulatórios e normas institucionalizadas que possam trazer proteção às empresas (leis que regulem o uso de dados, por exemplo). *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Barreira pouco importante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Barreira muito importante

55. Ameaça de interrupção dos empregos existentes (substituição de empregos por tecnologias). *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Barreira pouco importante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Barreira muito importante

56. Escassez de capital humano com habilidades digitais (pessoas capazes de operar as novas tecnologias). *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Barreira pouco importante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Barreira muito importante

57. Falta de infraestrutura (acesso à internet de alta velocidade, por exemplo). *

Marcar apenas uma oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Barreira pouco importante	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Barreira muito importante

E-mail para receber resultados

58. Agradecemos a sua participação. Esperamos, com essa coleta de dados, ter uma visão mais aprofundada acerca de como o tema "Indústria 4.0" está sendo promovido entre as empresas, bem como ter um panorama sobre as características das empresas, o uso das tecnologias, e as barreiras à adoção destas tecnologias. Se quiser receber os resultados dessa pesquisa, nos deixe seu e-mail, para que possamos enviar.