



Tecnologias da Indústria 4.0 e Barreiras à Adoção destas Tecnologias, segundo uma Revisão de Literatura

Industry 4.0 Technologies and Barriers to Adoption of These Technologies, According to a Literature Review

ANTONIO ARNALDO BAIO JUNIOR
UFSCAR

MARCELO JOSÉ CARRER
UFSCAR

Nota de esclarecimento:

Comunicamos que devido à pandemia do Coronavírus (COVID 19), o IX SINGEP e a 9ª Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge) foram realizados de forma remota, nos dias **20, 21 e 22 de outubro de 2021**.

Tecnologias da Indústria 4.0 e Barreiras à Adoção destas Tecnologias, segundo uma Revisão de Literatura

Objetivo do estudo

Levantamento das principais tecnologias da Indústria 4.0, bem como das barreiras à adoção destas.

Relevância/originalidade

Auxiliar na formulação de políticas públicas voltadas à disseminação dos conceitos da Indústria 4.0, e nas estratégias de implantação destas para futuros usuários.

Metodologia/abordagem

Revisão de literatura buscando os trabalhos mais relevantes que tratam dos temas tecnologias da Indústria 4.0 e barreiras a adoção de tecnologias.

Principais resultados

As principais tecnologias citadas na literatura: Big Data, simulação, integração de sistemas vertical e horizontal, internet das coisas industrial, computação em nuvem, manufatura aditiva, robôs autônomos, realidade aumentada e simulação, e as barreiras econômicas, operacionais, culturais e institucionais.

Contribuições teóricas/metodológicas

Ressaltar a importância do tema barreiras à adoção, que pode orientar futuras pesquisas de campo para que sejam testadas hipóteses que vão de encontro ao tema.

Contribuições sociais/para a gestão

Auxiliar aos tomadores de decisão na escolha das tecnologias a serem implantadas nas empresas, através da apresentação das possibilidades de melhoria que estas trazem, bem como os desafios que possam trazer ao serem adotadas.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Tecnologias, Barreiras à Adoção

Industry 4.0 Technologies and Barriers to Adoption of These Technologies, According to a Literature Review

Study purpose

Survey of the main technologies of Industry 4.0, as well as the barriers to their adoption.

Relevance / originality

Assist in the formulation of public policies aimed at disseminating the concepts of Industry 4.0, and in implementing these strategies for future users.

Methodology / approach

Literature review seeking the most relevant works that deal with the themes of Industry 4.0 technologies and barriers to technology adoption.

Main results

The main technologies cited in the literature: Big Data, simulation, vertical and horizontal systems integration, industrial internet of things, cloud computing, additive manufacturing, autonomous robots, augmented reality and simulation, and economic, operational, cultural and institutional barriers.

Theoretical / methodological contributions

Emphasize the importance of the theme barriers to adoption, which can guide future field research so that hypotheses that go against the theme are tested.

Social / management contributions

Assist decision makers in choosing the technologies to be implemented in companies, by presenting the possibilities for improvement that these bring, as well as the challenges they may bring when adopted.

Keywords: Industry 4.0, Technologies, Barriers to 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 federal 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 idéia 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 se manifestarão nas esferas econômica, organizacional, 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, cujo objetivo final é melhorar a performance de empresas e cadeias de valor (DALENOGARE et al., 2018; BUCHI et al., 2020; TORTORELLA et al., 2020). 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). Esse novo paradigma tecnológico tem potencial de afetar a organização das atividades das empresas, as relações comerciais entre empresas, a estrutura de concorrência das indústrias, os modelos de negócios, 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 em suas cadeias de suprimentos (TASTAN e GONEL, 2020; 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).

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, MPR, 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 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, 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. Essa seria então capaz de produzir produtos personalizados e em pequenos lotes de forma eficiente e lucrativa (WANG et al., 2015).

Em que pesem os potenciais benefícios das tecnologias da Indústria 4.0, um estudo do Fórum Econômico Mundial (2019) indica que poucas empresas conseguem efetivamente integrar as tecnologias da Indústria 4.0 de modo a obter vantagens econômicas e financeiras 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). Neste sentido, as empresas tidas como referência na adoção de tecnologias da Indústria 4.0 possuem 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”. 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). Em que pese as iniciativas mencionadas, o nível de adoção das tecnologias de Indústria 4.0 por empresas brasileiras ainda é muito baixo, sobretudo nas pequenas e médias empresas do setor industrial. Segundo pesquisa da FIESP e SENAI de 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 mais profundas. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivos apresentar as principais tecnologias citadas como base da Indústria 4.0 segundo a literatura, bem como as barreiras à adoção para essas tecnologias identificadas em estudos realizados por outros autores. As tecnologias consideradas pilares para a Quarta Revolução Industrial estão sendo amplamente estudadas, porém as barreiras à adoção destas, com base em particularidades, limitações, e outros possíveis impedimentos parecem não ser tão evidenciadas, o que pode levar a projetos que não trarão benefícios a seus usuários.

2 Metodologia

Para a elaboração deste trabalho foi feita uma revisão de literatura que trouxesse um panorama atual das publicações envolvendo os dois temas principais aqui abordados: as principais tecnologias da Indústria 4.0, e as barreiras à adoção destas tecnologias pelas empresas. Pode-se considerar a abordagem utilizada como exploratória, onde o intuito foi proporcionar maior familiaridade com o tema elencado, e também captar a visão de diferentes autores acerca do tema, em diferentes contextos, setores industriais e localidades.

Foram pesquisados trabalhos publicados em periódicos indexados às bases Scopus e Scielo, e buscados inicialmente 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, e assim por diante. Concentrou-se em uma lista não extensa de publicações, mas que apresentassem boa relevância, e a partir da leitura dos trabalhos selecionados também foram consultados os trabalhos que estes utilizaram em suas referências.

3 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, 2016). 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 (manavGERMANN, 2011).

Sensores e sistemas integrados e conectados monitoram e coletam grandes quantidades de dados, alimentando softwares gerenciais, e podem tornar a fábrica inteligente (RUBMANN et al., 2015; DALENOGARE et al., 2018; WANG et al., 2015), permitindo análises que podem prevenir erros nas tomadas de decisão, a redução de desperdícios, o aumento da velocidade dos processos, aumento da qualidade e redução de custos (RAGUSEO, 2018). Redes vertical e horizontal diminuem tempos de resposta e tem potencial de otimizar o uso de recursos ao longo da cadeia produtiva, atendendo melhor a demandas econômicas, sociais e ambientais (KAGERMANN et al., 2011; DALENOGARE et al., 2018).

As tecnologias apresentadas a seguir são consideradas “pilares da Indústria 4.0”. São complementares e podem ser adotadas total ou parcialmente por uma organização.

3.1 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 estatísticas descritivas usadas em tomadas de decisão (GILCHRIST, 2016; RAGUSEO, 2018). Essa tecnologia é impulsionada principalmente pela difusão e adoção dos computadores, dispositivos móveis, 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 a 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), e

traz como potenciais benefícios o aumento da flexibilidade da linha de produção, a redução nos tempos de ciclo de projetos e usinagem, a melhoria da qualidade de produtos e serviços, a otimização no uso dos recursos de produção, uma 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).

3.2 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. 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), e 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), o que otimiza a tomada de decisões e aumenta a eficiência da produção (DALENOGARE et al., 2018).

3.3 Integração de Sistemas Vertical e Horizontal

As integrações vertical e horizontal dos sistemas e 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, 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. 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).

3.4 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 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 se tornam possíveis, resultando em respostas rápidas e ajustes em tempo real. (KAGERMANN 2011; RUBMANN et al., 2015; RUPASINGHE e MAJEED, 2017).

3.5 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).

Esta permite que grandes quantidades de dados gerados por máquinas e sensores conectados durante o processo de produção sejam armazenados em uma rede de servidores, reduzindo 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).

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).

3.6 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).

Permite a criação de protótipos e componentes individuais, e 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). 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 (RUBMANN et al., 2015; WELLER et al., 2015; MACCARTHY et al., 2016; WEF 2019).

3.7 Robôs Autônomos

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), e 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).

Estudos mostram 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). Robôs autônomos podem ainda reduzir tempo com coleta e envios de itens ao longo de uma cadeia de suprimentos, reduzindo custos logísticos (WEF 2019). A relação entre homem e máquina, que antes era de substituição, passa a ser de complementariedade, e essa mudança pode trazer tanto desafios quanto oportunidades (RUBMANN et al., 2015; DECKER et al., 2017; TAN e TAEIHAGH, 2020).

3.8 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 combina o mundo real com o virtual, é interativa em tempo real e 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., 2017; ALCÁCER e CRUZ-MACHADO, 2019). Tem como principais recursos 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), emantem 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, e facilitando a resolução de problemas por meio do aumento da percepção da realidade do usuário, combinando elementos virtuais com o ambiente físico (PALMARINI et al., 2016; ALCÁCER e CRUZ-MACHADO, 2019).

3.9 Cibersegurança

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).

4 Barreiras à Adoção das 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: as barreiras econômicas, as barreiras operacionais, as barreiras culturais e as barreiras institucionais.

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). 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; RAJ

et al., 2020). A seguir, são apresentadas e discutidas as principais barreiras encontradas na revisão de literatura.

4.1 Barreiras Econômicas

4.1.1 Altos investimentos para a implementação das Tecnologias da Indústria 4.0

As organizações que tem a intenção de adotar as tecnologias pertencentes à Indústria 4.0 precisam aumentar consideravelmente o investimento em equipamentos, processos, pessoas e conhecimento, e estes 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).

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.

4.1.2 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).

4.2 Barreiras Operacionais

4.2.1 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 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).

4.2.2 Risco de falhas de ciber-segurança

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). 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 ciber segurança se tornam barreiras significativas à adoção das tecnologias da Indústria 4.0 (XU et al. 2018; TURKES et al. 2019; RAJ et al. 2020).

4.2.3 Baixo nível de maturidade de uma tecnologia

Há vários níveis que uma nova tecnologia deve superar até fazer parte de sistemas ou subsistemas e 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).

4.2.4 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.

4.3 Barreiras Culturais

4.3.1 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 parece ser muito diferente. Segundo uma pesquisa da FIESP e SENAI de 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 3 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.

4.3.2 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).

4.3.3 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).

4.3.4 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).

4.4 Barreiras Institucionais

4.4.1 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.

4.4.2 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 salário 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.

4.4.3 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).

4.4.4 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).

5 Conclusões

O objetivo deste trabalho foi identificar, através de revisão de literatura, as principais tecnologias que compõem o conceito da Indústria 4.0, sendo considerados “pilares” da quarta revolução industrial 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 simulação. Vários autores relatam em seus estudos os benefícios obtidos através da adoção destas tecnologias pelas organizações, no entanto, existem barreiras à essa adoção, que também são encontradas em estudos disponíveis na literatura. As principais identificadas através da revisão de literatura foram as barreiras econômicas, como necessidade de altos investimentos para implantação e falta de clareza em relação a benefícios econômicos e ganhos de produtividade, as barreiras operacionais, com os desafios na integração vertical e horizontal, os riscos de falha da cibersegurança, o baixo nível de maturidade das tecnologias, e os desafios quanto à qualidade dos dados, as barreiras culturais, que englobam a falta de conhecimento acerca das tecnologias, a falta de uma cultura digital e de treinamento, a resistência à mudança e a falta de uma estratégia digital, e as barreiras institucionais, com a

falta de padrões e normas institucionalizadas, a ameaça aos empregos existentes, a falta de capital humano com habilidades digitais e a falta de infraestrutura.

Entende-se que este trabalho demonstre sua importância ao evidenciar essas tecnologias e as barreiras que impedem a adoção destas, o que pode contribuir para a melhoria no direcionamento de políticas públicas, e auxiliar nas escolhas e estratégias de futuros usuários. Pode-se, por exemplo, investir em maior divulgação dessas tecnologias e seus benefícios, bem como em estudos que consigam identificar as barreiras de maneira mais focada de individualizada.

O trabalho tem sua limitação ao trazer resultados preliminares baseados apenas em revisão de literatura, e não em uma pesquisa empírica realizada, mas ao mesmo tempo, essa se apresenta como caminho para trabalhos futuros, onde pesquisas de campo e surveys com empresas podem ser fonte de dados que possam confirmar hipóteses acerca deste tema, trazendo assim resultados mais atualizados e ajustados à realidade das organizações.

Referências

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.

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 104502, 2020

BOGOVIZ, A., OSIPOV, V., CHISTYAKOVA, M., & BORISOV, M. Comparative Analysis of Formation of Industry 4.0 in Developed and Developing Countries. 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**, 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>. BRYNJOLFSSON, E., 1993. The productivity paradox of information technology. **Commun. ACM** 36 (12), 66–77, 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.

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

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

CRAIGEN, D.; DIAKUN-THIBAUT, N.; PURSE, R. Defining cybersecurity. **Technology Innovation Management Review**, 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/](https://www.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.

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.

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.

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

GEHRKE, L., KÜHN, A., RULE, D., MOORE, P., BELLMANN, C., SIEMES, S., DAWOOD, D., SINGH, L., KULIK, J., & STANDLEY, M. (2015). 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.

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.

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.

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>

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.

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

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.

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

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.

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), 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.

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.

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

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, 2018: 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. The adoption of artificial intelligence and robotics in the hotel industry: Prospects and challenges. **Electronic Markets**, 1-22, 2020.

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.

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

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.

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.

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.

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)**, Sep 2017, Hamburg, Germany. pp.282-288, ff10.1007/978-3-319-66923- 6_33ff. ffhal-01666201f

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.

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.

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, 2020.

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.

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.

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.

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.

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

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.

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.

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.

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.

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.

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, 2008-09 - **The 4th IEEE International Conference on Management of innovation & Technology**, 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.

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.

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

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.

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