

INDÚSTRIA 4.0: ALCANÇOU A EXAUSTÃO, OU AINDA HÁ ESPAÇO PARA NOVOS DESDOBRAMENTOS?

INDUSTRY 4.0: HAS IT REACHED EXHAUSTION, OR IS THERE STILL ROOM FOR FURTHER DEVELOPMENTS?

Roberto Bernardes Junior¹
Éverton Aristides Margueiro²
Renato Telles³
Roberto Bazanini⁴

RESUMO: O tema Indústria 4.0 apresentou alto volume de publicações ao longo da última década. Contudo, o levantamento preliminar indicou não haver limites ao aparecimento de novas pesquisas, visto que seu impacto social e econômico continua a transformar rapidamente não apenas as linhas de fabricação, como também a forma de vida e concepção de negócios no mundo. Neste sentido, compreender como se encontra o estado da arte da indústria 4.0 permite revelar grandes oportunidades de pesquisas e desenvolvimento teórico, contudo o artigo apresenta o seguinte objetivo: “Compreender o atual desenvolvimento da literatura a respeito da indústria 4.0 demonstrando assim as principais linhas de pensamento, autores e tendências, permitindo assim traçar um mapa sobre o estado da arte revelando oportunidades e lacunas que podem ser abordadas”. Com o uso de um estudo bibliográfico, com a utilização de análises quanti e qualitativa, possibilitou traçar sete diferentes correntes de pesquisa e compará-las, resultando na revelação de novas oportunidades de estudo e tendências no desenvolvimento teórico a respeito da indústria 4.0.

2527

Palavras chaves: Estado da Arte. Indústria 4.0. Automação Industrial.

1 INTRODUÇÃO

O Estado da Arte corresponde um instrumento de apoio às pesquisas, pois propicia consolidar dados harmônicos e divergentes sobre os temas, permite projetar tendências, identificar a curva de exaustão ou declínio das discussões de fenômenos em torno dos avanços socioeconômicos e tecnológicos.

Essa concepção infere que a evolução científica busca a harmonização epistemológica do conhecimento por meio de distintas etapas demarcatórias dos fatos que, em relação aos problemas e soluções, se moldam no espaço-tempo, por exemplo,

¹Doutorando da Universidade Paulista (UNIP); Professor titular do Centro Paula Souza. / ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3821-7921>.

²Doutorando da Universidade Paulista (UNIP); Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia (IFSP); Universidade Anhembi Morumbi (UAM). Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8118-7679>.

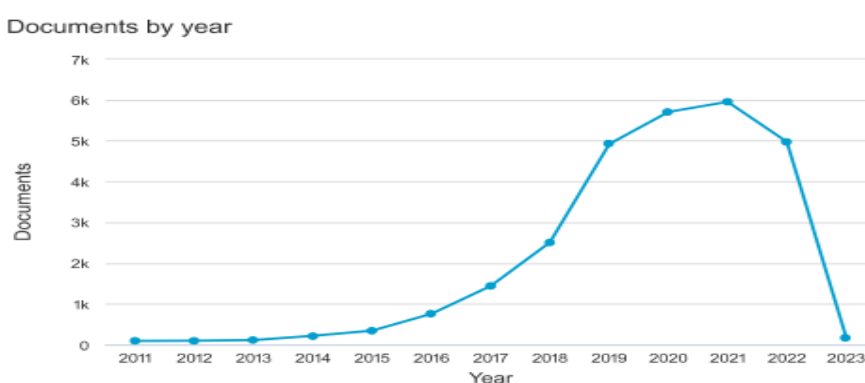
³Professor Titular do Programa de Mestrado e Doutorado em Administração da Universidade Municipal de São Caetano do Sul - USCS e Universidade Paulista - UNIP. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1123-668X>.

⁴Professor Titular do Programa de Mestrado e Doutorado em Administração da Universidade Paulista (UNIP) / ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1575-4791>.

sobre as manifestações e articulações de aspectos convergentes e divergentes acerca dos fenômenos como a Indústria 4.0 (KUHN, 2003; LASI *et al.*, 2014; RAUCH; LINDER; DALLASEGA, 2020).

Nessa perspectiva, o pioneirismo alemão à quarta revolução industrial, ou Indústria 4.0 (i4), iniciado na década passada, para promoção e fortalecimento de avanços tecnológicos industriais, por meio do seu estreitamento relacional com a ciência, ganhou rápida projeção e repercussão nas pesquisas internacionais, evidenciado pelo considerável aumento nas publicações (Figura 1).

Figura 1: Gráfico sobre aumento no número de publicações para o tema Indústria 4.0



Fonte: os autores a partir da base Scopus entre os anos de 2011 até 2023.

O aumento exponencial das produções nos últimos cinco anos revela o interesse pelos avanços e conquistas observadas e decorrentes da relação entre a comunidade científica e industrial. O decréscimo verificado para os anos de 2022 e 2023 se justifica em razão da pesquisa ter sido realizada no período de dezembro de 2022. Contudo, verifica-se uma tendência inercial de estabilização ou de provável declínio nas pesquisas, o que infere o interesse pela busca das marcações históricas e do Estado da Arte sobre o tema.

Desde sua apresentação na Feira de Hannover (Alemanha) em 2011, o tema i4 despertou forte interesse da comunidade internacional, pela apresentação e busca por novas tecnologias e o desenvolvimento de técnicas, processos e conceitos. Esse aumento se verifica devido à grande transformação socioeconômica que a i4 passou a representar no cenário mundial, visto ter sido considerada a quarta revolução industrial.

A i4 tornou-se o marco para o desenvolvimento tecnológico, pelo surgimento de big dados, inteligências artificiais, internet das coisas e, principalmente, *machine learning*, que permitiram a interligação das máquinas ao contexto fabril. Tal cenário

refletiu diretamente o aumento produtivo, da qualidade e da eficiência. O salto tecnológico digital e na comunicação, permitiram a criação e o desenvolvimento de máquinas e processos que passaram a operar de forma autônoma e inteligente (RAUCH; LINDER; DALLASEGA, 2020).

O aumento das capacidades de comunicação integrada de dados, e de mapear, aprender e corrigir os próprios erros, são exemplos dos avanços tecnológicos que resultaram uma autorregulação e atualização que passaram a promover melhorias contínuas dentro dos processos produtivos (LASI *et al.*, 2014).

Em sentido mais amplo, o ambiente organizacional das cadeias produtivas, mesmo as mais fragmentadas e complexas, têm como principais forças competitivas, o nível de integração e flexibilização, atrelados, às implementações tecnológicas das máquinas, e ao conjunto de ferramentas de gestão, operações, controle e planejamento, desenvolvidos na literatura. Neste contexto, novas técnicas e conceitos teóricos contribuem retroalimentar novos contornos à i4.

O alto nível de produções e desdobramentos sobre o tema i4 nos últimos anos, sugerem que as discussões mais recentes margeiam a maturidade e, provavelmente, a saturação. O surgimento de novas possibilidades tecnológicas abre espaço para novas formas de pensamento, sendo necessário refletir sobre: *qual o estágio de maturidade e saturação do desenvolvimento teórico do tema Indústria 4.0?*

Dentro dessa problemática, o presente artigo tem como objetivo: compreender o atual estágio da literatura sobre a indústria 4.0, para demonstrar as principais linhas de pensamento, autores e tendências, através de um mapa sobre o *estado da arte* que revele as oportunidades e lacunas que ainda possam ser abordadas. Nesse sentido, a afirmativa que orienta esse estudo considera que, a evidência de repetidas e convergentes pesquisas revela profundas influências e descobertas que invocam determinar o estágio provável de maturidade e saturação dos estudos sobre o tema Indústria 4.0, para apontar a emergência de conceitos que propiciam indicar novas tendências futuras.

Este trabalho será dividido em cinco partes, sendo a primeira composta por esta introdução em que se apresentam o problema, objetivo e a afirmativa orientadora da pesquisa; a segunda, pela fundamentação teórica relacionada à indústria 4.0; a terceira discorre sobre o percurso metodológico da pesquisa; a quarta apresentam-se os

resultados e o estudo empírico; enquanto a quinta discutem-se os resultados, seguida pelas conclusões.

2 CONCEPÇÕES SOBRE A INDÚSTRIA 4.0

Em um olhar sobre o desenvolvimento da indústria e da economia do mundo, diferentes revoluções Industriais marcaram o surgimento de grandes mudanças na forma de se produzir, como as I e II Revoluções da Indústria ocorridas entre os séculos XVII e XIX, em que o sistema de produção domiciliar foi gradativamente substituído para o sistema de produção nas fábricas. O aparecimento de máquinas com maior potencial de produtividade, principalmente marcado pela eletricidade no final do século XIX, e o emprego das linhas de produção, que representaram marco para a II Revolução Industrial (SCHWAB, 2016).

Nas décadas seguintes, a indústria passou por um período de relativa estabilização da modernidade industrial, constituindo a primeira metade do século XX, com avanços voltados em especial, na área de telecomunicações. A partir de meados da década de 70, o surgimento de novas influências tecnológicas, como o aparecimento da microeletrônica e computadores, demonstrados por meio da tecnologia da informação, verificadas em robôs e novos sistemas automatizados de produção, representaram a III Revolução Industrial (ACATECH, 2013).

Novamente, o surgimento de novas tecnologias no início do século XXI, propiciou um forte movimento de mudanças na indústria, como o aumento da autonomia das máquinas, que passaram a funcionar praticamente sozinhas ou apenas controladas a distância. Além dessas características, possibilidade das máquinas se auto programarem e aprenderem com os erros em processos, o surgimento da inteligência artificial, entre outras inovações que geraram grande impacto na cadeia produtiva, representaram profundas mudanças às possibilidades atuais, marcada pela IV Revolução Industrial (ACATECH, 2013; KUHN, 2003; LASI *et al.*, 2014; RAUCH; LINDER; DALLASEGA, 2020).

O termo Indústria 4.0, foi apresentado em Hannover no ano de 2011 na Alemanha, reuniu acadêmicos e empresários em prol do desenvolvimento da competitividade da indústria alemã, por meio da convergência entre o *maquinário industrial* e a *tecnologia digital*, tendo como principal objetivo a melhoria do processo de produção por meio de avanços na arquitetura e sistemas de produção customizados

levando em conta o avanço tecnológico (ACATECH, 2013; LASI *et al.*, 2014; SCHWAB, 2016).

Esses avanços foram estruturados em nove pilares tecnológicos, denominadas megatendências, podendo ser agrupadas em *físicas*: manufatura aditiva; robótica avançada; internet das coisas; e, *digitais*: computação na nuvem, big data, cyber segurança, realidade aumentada, integração de sistemas e simulação (CARDOSO, 2016). Cada pilar da indústria 4.0 representa diferentes tecnologias aplicadas dentro da linha produtiva (Tabela 1):

Tabela 1 – Nove Pilares tecnológicos da Indústria 4.0

Pilar	Concepções
Internet of Things – IoT	conceito no qual se refere a união de objetos por meio de uma rede que os conecta permitindo seu controle e monitoramento a distância, além de trocas de informações em tempo real, o que por sua vez resulta em maior flexibilidade na manufatura e dados mais precisos a respeito de diferentes partes da linha produtiva;
BIG DATA	conjunto de tecnologias que permite o processamento de grandes volumes de dados, com objetivo de gerar informações relevantes nas tomadas de decisão, sendo este caracterizado na literatura por meio de seus fenômenos e características
Robótica Autônoma	representa a nova geração de robôs, que além dos convencionais, que são programados para fazerem tarefas repetitivas e precisas, operam por longas horas sem a necessidade de supervisão, visto que além de e autocorrigirem, são capazes de aprender novas funções e processos.
Manufatura Aditiva	conhecida como impressora 3D, permite a fabricação de objetos por meio de adição de material, por camadas, abrindo novas possibilidades de fabricação de peças mais complexas, até mesmo de tamanhos minúsculos, devendo-se em sua implementação, levar em conta os menores cursos de processo, mas por outro lado as limitações mecânicas da peça gerada.
Computação nas nuvens	Possibilidade de utilização da nuvem como plataforma a armazenamento de dados ou mesmo para instalação de sistemas, o que permite maior flexibilidade e menores investimentos em infraestrutura, onde esses dados não mais são armazenados em servidores físicos da empresa, mas sim na internet (outros servidores), trazendo flexibilidade e facilidade, onde qualquer dispositivo compatível e que tenha acesso as informações armazenadas na rede consigam operar com facilidade.
Cyber Segurança	a conectividade das máquinas e objetos dentro da manufatura, além da integração entre as informações e a computação em nuvem, resulta em um aumento na preocupação com a segurança da informação, neste sentido proteção e redução das vulnerabilidades contra os ataques cibernéticos vem se tornando cada vez mais relevantes nos dias atuais.
Simulações	programas e sistemas que permitem simulações de fluxo nas manufadoras, ou mesmo revelar informações sobre projeto a respeito de encaixes de peças, ajustes, propriedades mecânicas e resistências dos materiais permitem menores custos, maior controle de produção e redução e tempo nos projetos e implementações, o poder computacional neste sentido vem eliminando desperdícios e aumentando a eficiência em todos os sentidos.
Realidade Aumentada	o melhoramento da interface entre a pessoa e máquina, com a realidade aumentada, que permite a visualização de objetos ou parte deles de forma tridimensional, aumenta a eficiência e efetividade nos projetos, treinamentos, produção, manutenções entre outros, podendo ser utilizado em execuções de operações a longa distância como é o caso de cirurgias em hospitais.
Integração de sistemas	a integração de dados entre diferentes sistemas ou até mesmo entre as máquinas e sistemas por meio de seus sensores, abre caminho a inúmeras possibilidades de trocas de informações em tempo real, verticalizando tanto o fluxo de informações como as tomadas de decisão.

Os Autores, adaptado de CARDOSO, 2016; RAUCH; LINDER; DALLASEGA, 2020.

Desse modo, nos EUA, para representar os mesmos interesses alemães, também foi apresentado pelo governo no ano de 2011, a denominada *Advanced Manufacturing Partership* (AMP) com a previsão de grandes investimentos na área focando a competitividade dentro desta nova realidade marcada pelo avanço tecnológico.

Mesmo diante dessas concepções e avanços, tanto no ambiente europeu, como norte-americano, a Indústria 4.0 ainda tem um forte apelo a manufatura aditiva inteligente, com a aplicação de várias tecnologias em seus processos produtivos, permitindo meios produtividade, integração, flexibilidade e qualidade (SANTOS-D'AMORIM *et al.*, 2020).

Nesse sentido, em busca pela harmonia conceitual e aos propósitos desse estudo, destaca-se que os termos conceituais dos nove pilares listados na Tabela 1, compreendem aqueles utilizados de modo mais convergente entre os autores dessas nações, exceto quanto ao da “manufatura aditiva” (percepção alemã), que vem sendo usada pelo termo “manufatura avançada” (na concepção norte americana).

3 METODOLOGIA

Esse estudo explora o estágio em que se encontra o Estado da Arte a respeito da indústria 4.0, para revelar as principais linhas ou correntes de pesquisa e, principalmente, por revelar os principais autores e suas tendências de abordagens sobre o tema, para fornecer novos “insights” aos pesquisadores quanto as oportunidades e “gaps” na literatura, por meio de uma pesquisa bibliométrica, de análise qualitativa.

A base de dados escolhida para o levantamento foi a Scopus, por se tratar de uma das principais fontes de pesquisa que compreende milhares de periódicos com alto fator de impacto, além da versatilidade de se buscar por artigos de revisão, resumos estendidos e outros documentos de base secundária, avaliados ou não por pares e, com alto índice de citações. A escolha também se deu pela facilidade de uso das ferramentas de extração que permitem a utilização dos sistemas Mendeley, VOSViewer e Excel, para desenvolver a organização dos dados conforme se exige em estudos bibliométricos (WHITTEMORE; KNALF, 2005).

Inicialmente foi feita uma pesquisa com o tema “Industridy 4.0” desde 2011, incluindo todas as áreas, após, percebendo que algumas áreas se destacaram ao longo

do tempo, uma segunda pesquisa foi feita com o mesmo tema, no entanto, levando-se em conta o intervalo de tempo de 2017 a 2022, dentro das principais áreas sobre o tema.

Os dados foram coletados e organizados por temas, subtemas e, em ordem cronológica, compreendendo todos os estudos dos três quartis mais citados para o período (2011-2022) para realizar análise por revisão integrativa conforme Whittemore; Knalf, (2005), por se tratar de uma técnica utilizada para facilitar a identificação de similaridades convergentes de constructos, que possibilita organizá-los e separá-los por categorias (WHITTEMORE; KNALF, 2005). Essa abordagem possibilitou organizar e classificar os estudos de modo longitudinal e de acordo com as categorias temáticas relacionadas aos nove pilares da Indústria 4.0 (Tabela 1).

Em seguida, optou-se por uma nova pesquisa com filtro que demarcou um período de menor abrangência, especificamente para os últimos cinco anos (2017-2022), para facilitar a identificação comparativa dos estágios das produções, para tornar excludentes temas em fase de maturação ou exaustão, e reter novas tendências, sendo os artigos reorganizados de modo a compreender as sete categorias temáticas de correntes identificadas para os últimos cinco anos (Tabela 2) constante na seção *Resultados*.

Os dados obtidos na segunda extração e interação foram colocados no Software VOSviewer a fim de ser elaborado um mapa bibliográfico, demonstrando as principais correntes e linhas de pesquisa existente nos últimos 5 anos, para tanto foi utilizado o tipo de análise *co-authorship* com *full counting*, sendo que neste tipo de mapa, busca-se os links de citação contando de forma igual para todos os autores dentro de um artigo como demonstrado por (PERIANES-RODRIGUEZ; WALTMAN; VAN ECK, 2016).

Os parâmetros utilizados foram no mínimo 75 citações, correspondendo o primeiro e segundo quartis, para autores com no mínimo 10 documentos publicados no período, sendo selecionados 60 principais autores com alta correlação entre os documentos, autores e temas, que possuem grande quantidade de produção na literatura.

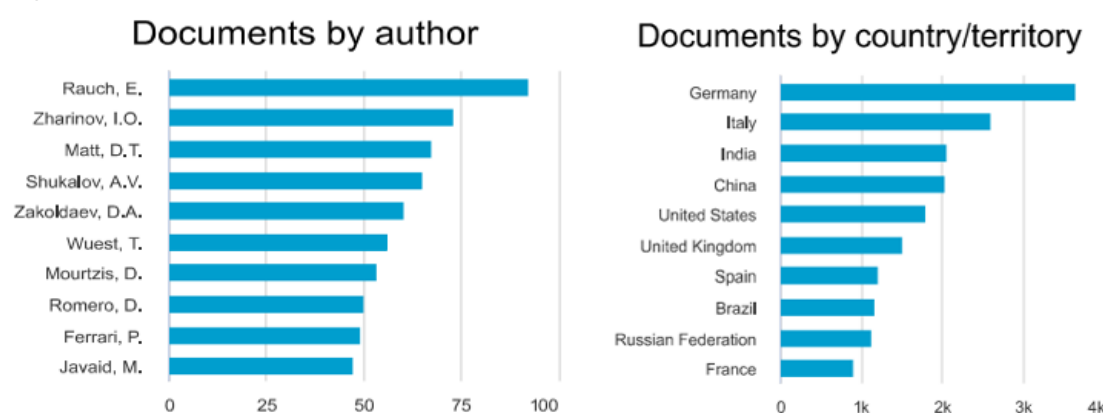
Os diferentes clusters gerados no gráfico bibliométrico foram analisados de forma qualitativa, para evidenciar estudos que fundamentassem as diferentes perspectivas e as convergências temáticas sobre Indústria 4.0 dos principais autores dos primeiros quartis de índice de citações e melhor compreensão das principais

diferenças entre este cluster, criando uma matriz (Quadro 1) *Autores e Subtemas Abordados nos Documentos* na seção Resultados.

4 RESULTADOS

O levantamento dos principais autores sobre o tema, por meio da quantidade de documentos publicados revelam importantes nomes, como demonstrado na figura 2 no gráfico a esquerda, em relação aos países que mais contribuem para literatura, está a Alemanha como o principal destaque (figura 2, gráfico à direita):

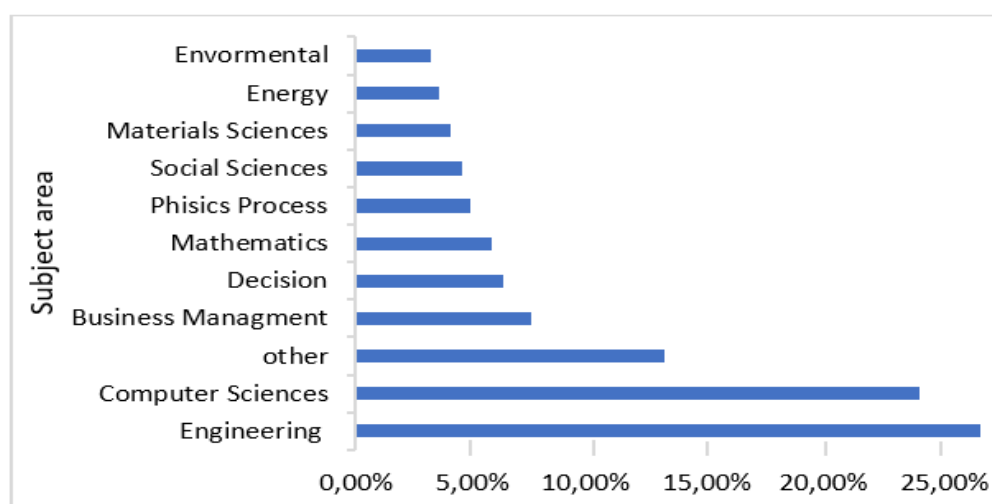
Figura 2 – Gráfico dos principais autores e países na literatura da Indústria 4.0 de 2011 a 2023.



Fonte: Os autores com base no levantamento SCOPUS, dezembro de 2022.

Comparativamente, alguns dos principais autores continuam tendo grandes contribuições sobre a literatura, sendo que a Alemanha ainda exerce papel de destaque na produção teórica, mantida nas áreas de: engenharia e ciências da computação e de dados representando quase 50% das contribuições, enquanto as demais áreas apresentam equilíbrio em quantidade de publicações, em torno de 6,5% cada, conforme (figura 3):

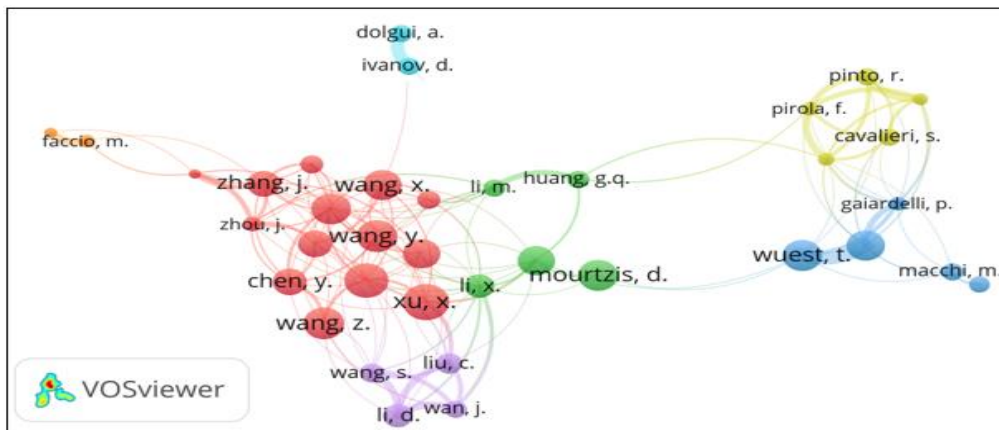
Figura 3 - Gráfico com as principais áreas de publicação da Indústria 4.0 de 2011 a 2023.



Fonte: Os autores com base no levantamento SCOPUS, dezembro de 2022.

O mapa bibliométrico levantado por meio da pesquisa na SCOPUS, revela a existência de 7 clusters de diferentes correntes teóricas dentro da literatura (Figura 4):

Figura 4 - Mapa bibliométrico dos sete clusters de correntes de pesquisa na literatura.



Fonte: Os autores com base no levantamento SCOPUS, dezembro de 2022.

Os clusters identificados permitiram construir a tabela síntese do foco das pesquisas:

Tabela 2: Síntese das sete correntes de pesquisas sobre Indústria 4.0

Cluster	Autores	Descrição
Cluster 1 (Vermelho)	(LI <i>et al.</i> , 2022; WANG <i>et al.</i> , 2022; YANG <i>et al.</i> , 2022; YAO <i>et al.</i> , 2022)	focado nas tecnologias de comunicação de dados, redes de comunicação, unificação e padronização de protocolos de comunicação, transmissão de dados.
Cluster 2 (Verde)	(MOURTZIS; ANGELOPOULOS; PANOPOULOS, 2022)	focada em sistemas de informação voltado a otimização das linhas de produção, principalmente em simulações digitais twist (objetivando a otimização de processos de manufatura com modelagens de algoritmos voltado a melhor a eficiência).
Cluster 3 (Azul)	(DANYS <i>et al.</i> , 2022; MOENCKS <i>et al.</i> , 2022; PEZZOTTA <i>et al.</i> , 2022; ROMERO <i>et al.</i> , 2022)	Foco em ciência de dados no sentido de promoção de melhorias em processos produtivos, tanto na automação quanto no seu gerenciamento para indústria 5.0 (que leva em conta a integração humano e máquina, permitindo a criação de sistemas semiautomatizados de produção).
Cluster 4 (Amarelo)	(CAVALIERI, 2021; CAVALIERI; MULÈ, 2021; CAVALIERI; SALAFIA, 2020)	focado na conectividade entre objetos e máquinas, como a interoperatividade entre diferentes dispositivos, revelando as possibilidades tanto de intercâmbio de operações quanto de de manutenções preditivas em partes conectadas, com foco no fluxo de informações de diferentes componentes.
Cluster 5 (Roxo)	(KAJATI <i>et al.</i> , 2019; LIU <i>et al.</i> , 2019, 2020; LIU; LIU, 2020; LU <i>et al.</i> , 2020)	Foco nas implementações de ferramentas tecnológicas e administrativas dentro dos sistemas produtivos e logísticos, apresentando novas possibilidades de implementação e seus impactos.
Cluster 6 (Azul Claro)	(DOLGUI; IVANOV; SOKOLOV, 2018; HOSSEINI; IVANOV; DOLGUI, 2019; IVANOV <i>et al.</i> , 2017; IVANOV; DOLGUI; SOKOLOV, 2019)	Foco na resiliência de cadeia de suprimentos e internas de produção, utilizando a indústria 4.0 objetivando o aumento da resiliência.

Cluster (Laranja)	7	(BORTOLINI <i>et al.</i> , 2019; COHEN <i>et al.</i> , 2017; FACCIO <i>et al.</i> , 2019; FERRARI <i>et al.</i> , 2018)	Foco nos fluxos produtivos revelando principalmente estudos de movimentos dentro da linha de produção e configurações de sistemas de montagem nos moldes da indústria 4.0.
----------------------	---	--	--

Fonte: Os autores com base no levantamento SCOPUS, dezembro de 2022.

Neste sentido, é necessário levantar construtos utilizados dentro das diferentes linhas de pesquisas permitindo uma rápida comparação entre essas levando luz sobre o atual estado da arte do tema “Indústria 4.0”, bem como revelando possíveis tendências futuras nos estudos. As sete principais correntes de pesquisas detectadas revelam diferentes configurações, cujos construtos, dentro de cada uma das diferentes correntes traçam semelhanças e diferenças entre si, permitindo as comparações, demonstradas no (Quadro 1) (SCHWAB, 2016).

Percebe-se uma proximidade em relação as correntes de pesquisa 3, 5 e 7, com assuntos voltados a organização de empresa, processos e gestão, apresentando relevantes convergências. Contudo, diferenças importantes ficaram evidentes.

Enquanto a corrente de pesquisa 3 tem um apelo que conta com uma camada a mais nas discussões, pela apresentação de *novas tecnologias* alinhadas à otimização do *fluxo produtivo*, a linha 5 apresenta como camada equidistante, o tema *indústria 5.0*, que converge com a corrente 3, mas se associa de modo mais latente com estudos voltados à *otimização e uso de humanoides*. Levando-se em conta o tema *resiliência das cadeias produtivas*, a linha corrente 7 apresenta uma visão *gerencial* voltada a novas formas de *inteligência artificial* (LASI *et al.*, 2014).

A corrente 1 apresenta pesquisas que no espaço-tempo, hora se estabilizam, hora retornam com forte tendência na literatura. Por essa razão, o foco dessa corrente está voltado a *comunicação e integração de dados* de forma técnica à área de *tecnologia da informação*, apresentando assim seu impacto direto e indireto sobre a *sociedade*, podendo assim ser encontrado assuntos como *blockchain e computação em nuvem*, ainda em alta. A *comunicação e integração dos dados* também é trabalhada na corrente 4, porém com outro foco de trabalho, apresentando as tecnologias de comunicação de componentes dentro de uma linha produtiva e a *internet das coisas* (RAUCH; LINDER; DALLASEGA, 2020).

As correntes 2 e 5 se assemelham em relação a otimização do fluxo produtivo, no entanto apresentam diferentes contornos em sua pesquisa, na corrente 2 temos o foco na simulação digital, principalmente no sentido de reorganização das linhas produtivas, o que difere da corrente 5, com o foco principal na apresentação de novas

tecnologias e técnicas que podem ser implementadas na produção e que resultam na melhora do processo (CARDOSO, 2016; SANTOS-D'AMORIM et al., 2020).

Quadro 1 - Comparativo entre as Correntes teóricas sobre Indústria 4.0

Correntes	Temas em maturação ou com pouca margem de desenvolvimento futuro			Temas em exaustão	Temas em ascensão		Temas incipientes ou emergentes - Indústria 5.0		
	Comunicação e Integração de dados	Otimização de fluxo produtivo	Novas ferramentas tecnológicas	Gerenciar Técnicas de Administração	Computação embarcada IoT	Sociedade Simulação digital	Robôs Humanoides	Resiliência em Cadeias de Suprimentos	Inteligência artificial
1	X					X			
2		X		X		X			
3		X	X	X	X		X		
4	X				X				
5		X	X				X		
6	X	X	X	X				X	X
7	X	X		X				X	X

Fonte: Elaborado pelos autores.

Neste sentido, apesar do nível geral de maturidade sobre o tema ser alto, o surgimento de novas tecnologias em um curto espaço de tempo têm aberto outras oportunidades para avanços nos estudos. Além dessas percepções, a definição de novos contornos, fazem com que o assunto, por ser muito maduro, apresenta certa saturação em relação aos seus princípios mais básicos dentro da literatura, sendo margem há muito a ser explorado em diferentes linhas de pesquisas (RAUCH; LINDER; DALLASEGA, 2020).

Nota-se que neste trabalho, foi colocada sete linhas de pesquisas por representaram alta conectividade entre essas, mas há possibilidade de haver linhas secundárias ramificando ainda mais em assuntos secundários e diferentes vertentes sobre o tema.

CONCLUSÕES

Diante do estudo apresentado desde o surgimento da Indústria 4.0 em 2011, houve aumento considerável nas pesquisas e, após 11 anos de existência, o tema não está totalmente saturado, por haver inúmeros contornos e possibilidades de interações temáticas dentro do seu desenvolvimento teórico. Nota-se que a Alemanha, Itália, China e EUA ainda são as nações líderes em produções acadêmicas, além de haver

poucas mudanças entre os principais autores contribuintes originários para o tema Indústria 4.0.

Em síntese, o tema, Indústria 4.0 se encontra em amplo desdobramento com uma forte tendência à ramificação em seus diferentes usos dentro da sociedade e da economia, bem como, dentro da própria implementação tecnológica, todas as linhas apresentadas são promissoras e vem de desenvolvendo fortemente visto que acompanham o aparecimento e descobertas de tecnologias.

Ao final desse estudo, pode-se considerar que ao construir um mapa bibliométrico sobre a Indústria 4.0 e evidenciar as diferentes correntes e tendências, apresentou-se uma série de possibilidades que podem ser exploradas em futuras pesquisas. Entende tratar-se de uma poderosa contribuição ao desenvolvimento de novas tecnologias ou em estudos de tendências que correspondem às lacunas que fazem com que a ciência evolua. A contribuição da pesquisa, por intermédio do estado da arte, propicia aos acadêmicos e, mesmo aos demais interessados por essa temática, a relevância do estudo, ao mesmo tempo, permitindo facilitar na atualização.

Adverte-se, no entanto, a necessidade de se observar algumas limitações apresentadas no estudo como: a subjetividade qualitativa, que foi minimizada ao máximo com a técnica de saturação, pela leitura de mais de um artigo até que se chegasse ao consenso de limitação teórica; outro ponto é em relação a restrição dada à pesquisa, dentro das áreas de ciências de dados e engenharia de produção, por serem as principais áreas desta temática, no entanto, não se ignora a relevância de outras áreas que apresentam importância à epistemologia.

Finalmente, como propostas de agenda futura, os achados do presente estudo remetem à necessidade de explorar com mais profundidade e compreensão as ramificações de correntes que emergiram nos últimos anos, em temas como gestão, que talvez mereça atenção e até mesmo possibilita uma comparação com outras correntes de pesquisa voltadas a melhoria de fluxo de informação, podendo apresentar grandes oportunidades de estudos, e principalmente em uma compreensão sobre tais correntes de pesquisas ao longo do tempo em um estudo longitudinal.

REFERÊNCIAS

ACATECH, National Academy of Science and Engineering. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0.** 2013. Disponível em: <http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acat

ech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report_Industrie_4.0_accessible.pdf>. Acesso em: 04 2022.

BORTOLINI, Marco *et al.* Toward a Real-Time Reconfiguration of Self-Adaptive Smart Assembly Systems. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 39, p. 90-97, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2351978920302791>.

CARDOSO, Marcelo de Oliveira. **INDÚSTRIA 4.0: a quarta revolução Industrial**. [s. l.], p. 6-35, 2016. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/13156>.

CAVALIERI, Salvatore. A Proposal to Improve Interoperability in the Industry 4.0 Based on the Open Platform Communications Unified Architecture Standard. **Computers**, [s. l.], v. 10, n. 6, p. 70, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-431X/10/6/70>.

CAVALIERI, Salvatore. Semantic Interoperability between IEC 61850 and oneM2M for IoT-Enabled Smart Grids. **Sensors**, [s. l.], v. 21, n. 7, p. 2571, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/7/2571>.

CAVALIERI, Salvatore; MULÈ, Salvatore. Interoperability between OPC UA and oneM2M. **Journal of Internet Services and Applications**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 13, 2021. Disponível em: <https://jisajournal.springeropen.com/articles/10.1186/s13174-021-00144-9>.

CAVALIERI, Salvatore; SALAFIA, Marco Giuseppe. A Model for Predictive Maintenance Based on Asset Administration Shell. **Sensors**, [s. l.], v. 20, n. 21, p. 6028, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/21/6028>.

2539

COHEN, Yuval *et al.* Assembly system configuration through Industry 4.0 principles: the expected change in the actual paradigms. **IFAC-PapersOnLine**, [s. l.], v. 50, n. 1, p. 14958-14963, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896317334754>.

DANYS, Lukas *et al.* Visible Light Communication and localization: A study on tracking solutions for Industry 4.0 and the Operator 4.0. **Journal of Manufacturing Systems**, [s. l.], v. 64, p. 535-545, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0278612522001236>.

DOLGUI, Alexandre; IVANOV, Dmitry; SOKOLOV, Boris. Ripple effect in the supply chain: an analysis and recent literature. **International Journal of Production Research**, [s. l.], v. 56, n. 1-2, p. 414-430, 2018. Disponível em: <http://doi.org/10.1080/00207543.2017.1387680>.

FACCIO, Maurizio *et al.* Real-time assistance to manual assembly through depth camera and visual feedback. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 81, p. 1254-1259, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827119306080>.

FERRARI, Emilio *et al.* Motion Analysis System for the digitalization and assessment of manual manufacturing and assembly processes. **IFAC-PapersOnLine**, [s. l.], v. 51, n. 11, p. 411-416, 2018. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405896318314538>.

HOSSEINI, Seyedmohsen; IVANOV, Dmitry; DOLGUI, Alexandre. Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, [s. l.], v. 125, n. March, p. 285-307, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.001>.

IVANOV, Dmitry *et al.* Literature review on disruption recovery in the supply chain*. **International Journal of Production Research**, [s. l.], v. 55, n. 20, p. 6158-6174, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1330572>.

IVANOV, Dmitry; DOLGUI, Alexandre; SOKOLOV, Boris. The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. **International Journal of Production Research**, [s. l.], v. 57, n. 3, p. 829-846, 2019.

KAJATI, Erik *et al.* Cloud based cyber-physical systems: Network evaluation study. **Advanced Engineering Informatics**, [s. l.], v. 42, p. 100988, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474034619305610>.

KUHN, Thomas S. A estrutura das revoluções científicas. 7. ed. São Paulo: Perspectiva, 2003.

LASI, Heiner; KEMPER, Hans-Georg; FETTKE, Petter; FELD, Thomas; HOFFMANN, Michael. Industry 4.0. Business & Information Systems Engineering, p. 239-242, 2014.

LI, Hui *et al.* Systematic Identification of the Influencing Factors for the Digital Transformation of the Construction Industry Based on LDA-DEMATEL-ANP. **Buildings**, [s. l.], v. 12, n. 9, p. 1409, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/9/1409>.

LIU, Chuzhao *et al.* A Multitasking-Oriented Robot Arm Motion Planning Scheme Based on Deep Reinforcement Learning and Twin Synchro-Control. **Sensors**, [s. l.], v. 20, n. 12, p. 3515, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3515>.

LIU, Chang *et al.* Integrated application in intelligent production and logistics management: technical architectures concepts and business model analyses for the customised facial masks manufacturing. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, [s. l.], v. 32, n. 4-5, p. 522-532, 2019. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0951192X.2019.1599434>.

LIU, Chunzhao; LIU, Xinyi. Ways and Countermeasures to Improve Collaborative Capacity of Virtual Maker Space. In: [S. l.: s. n.], 2020. p. 1025-1036. *E-book*. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-981-15-5959-4_126.

LU, Yuqian *et al.* Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, [s. l.], v. 61, p. 101837, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0736584519302480>.

MOENCKS, Mirco *et al.* Augmented Workforce Canvas: a management tool for

guiding human-centric, value-driven human-technology integration in industry. **Computers & Industrial Engineering**, [s. l.], v. 163, p. 107803, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360835221007075>.

MOURTZIS, Dimitris; ANGELOPOULOS, John; PANOPOULOS, Nikos. Development of a PSS for Smart Grid Energy Distribution Optimization based on Digital Twin. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 107, p. 1138–1143, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S221282712200405X>.

MOURTZIS, Dimitris; ANGELOPOULOS, John; PANOPOULOS, Nikos. Integration of Mixed Reality to CFD in Industry 4.0: A Manufacturing Design Paradigm. **Procedia CIRP**, [s. l.], v. 107, p. 1144–1149, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827122004061>.

MOURTZIS, Dimitris; ANGELOPOULOS, John; PANOPOULOS, Nikos. Operator 5.0: A Survey on Enabling Technologies and a Framework for Digital Manufacturing Based on Extended Reality. **Journal of Machine Engineering**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 43–69, 2022. Disponível em: <http://jmacheng.not.pl/Operator-5-0-A-Survey-on-Enabling-Technologies-and-a-Framework-for-Digital-Manufacturing,147160,0,2.html>.

PERIANES-RODRIGUEZ, Antonio; WALTMAN, Ludo; VAN ECK, Nees Jan. Constructing bibliometric networks: A comparison between full and fractional counting. **Journal of Informetrics**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 1178–1195, 2016. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1751157716302036>.

PEZZOTTA, Giuditta *et al.* Digital Servitization in the Manufacturing Sector: Survey Preliminary Results. In: [S. l.: s. n.], 2022. p. 310–320. *E-book*. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-16411-8_37.

RAUCH, Erwin.; LINDER, Christian.; DALLASEGA, Patrick.. Anthropocentric perspective of production before and within Industry 4.0, **Computers & Industrial Engineering**, Volume 139. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835219300233>.

ROMERO, David *et al.* Cyber-Physical Visual Management Systems in the Digital Lean Manufacturing World. In: [S. l.: s. n.], 2022. p. 575–585. *E-book*. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-16411-8_66.

SANTOS-D'AMORIM, Karen *et al.* From data to knowledge: Trends in scientific production on big data in information science in Brazil. **Encontros Bibli**, [s. l.], v. 25, n. July, p. 1–23, 2020.

SCHWAB, Klaus. *A Quarta Revolução Industrial*. São Paulo: EDIPRO, 2016.

WANG, Huan *et al.* Research on Heterogeneous Network Data Interaction Mechanism of Intelligent Manufacturing. In: , 2022. **2022 IEEE International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC)**. [S. l.]: IEEE, 2022. p. 219–221. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9915955/>.

YANG, Hulin *et al.* User-Centric Blockchain for Industry 5.0 Applications. In: , 2022.

2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). [S. l.]: IEEE, 2022. p. 25-30. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9814562/>.

YAO, Xifan *et al.* Enhancing wisdom manufacturing as Industrial metaverse for industry and society 5.0. **Journal of Intelligent Manufacturing**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s10845-022-02027-7>.

WHITTEMORE, Robin; KNALF, Kathleen. The integrative review: updated methodology. *Methodological issues in nursing research*, p. 546-53, 2005.