

Conceitos e tecnologias da Indústria 4.0: uma análise bibliométrica

Faíque Ribeiro Lima* 

Rogério Gomes** 

* Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre (RS), Brasil.
E-mail: faique.ribeiro@hotmail.com

** Universidade Estadual Paulista (Unesp), Araraquara (SP), Brasil.
E-mail: rogerio.gomes@unesp.br

SUBMISSÃO: 17 DE MARÇO DE 2020 VERSÃO REVISADA (ENTREGUE): 26 DE AGOSTO 2020 APROVADO: 02 DE OUTUBRO DE 2020

RESUMO

O objetivo geral deste trabalho é avaliar características da produção científica internacional nas tecnologias associadas à Indústria 4.0. A metodologia empregada é composta de duas etapas: (i) seleção das tecnologias (termos) apontadas na literatura específica; e (ii) análise bibliométrica das publicações científicas que contêm os termos característicos da Indústria 4.0 existentes na base de dados Scopus. A hipótese adotada foi que, por ser um processo em andamento, a Indústria 4.0 e seus conceitos ainda estão em construção. Algumas das conclusões do trabalho são: os países que mais se destacam são aqueles que implantaram estratégias nacionais relacionadas às tecnologias da Indústria 4.0 e que obtiveram, nos anos posteriores, um amplo crescimento no número de publicações; e, dentre as instituições de financiamento, as governamentais se destacam no patrocínio das publicações científicas, em especial as chinesas, comprovando o esforço público.

PALAVRAS-CHAVE | Análise bibliométrica; Indústria 4.0; Inovação; Manufatura avançada; Tecnologia

Industry 4.0 concepts and technologies: a bibliometric analysis

ABSTRACT

The general objective of this work is to evaluate characteristics of international scientific production in technologies associated with Industry 4.0. The methodology employed consists of two stages: (i) selection of technologies (terms) pointed out in the specific literature; (ii) the bibliometric analysis of scientific publications that contain the characteristic terms of Industry 4.0 existing in the Scopus database. The hypothesis adopted was that, as it is still an ongoing process, Industry 4.0 and its concepts are still under construction. Some of the conclusions of the work are: the countries that stand out the most are those that implemented national strategies related to the technologies of Industry 4.0, obtained, in the subsequent years, a wide growth in the number of publications; and, among the financing institutions, the governmental ones stand out in the sponsorship of scientific publications, especially the Chinese ones, proving the public effort.

KEYWORDS | Advanced manufacturing; Bibliometric analysis; Industry 4.0; Innovation; Technology

1. Introdução

De acordo com a literatura evolucionária, as revoluções industriais decorrem da introdução de novas tecnologias na economia que transformam o sistema via mudanças qualitativas. Nesse processo, iniciado pela ação dos empresários visando novas oportunidades de lucros, são aliciados inúmeros imitadores que, por um lado, geram novos e extraordinários investimentos e, por outro, podem colaborar no aperfeiçoamento das oportunidades tecnológicas. Assim, as novas e importantes tecnologias sustentam o desenvolvimento econômico e social por certo período, até que sejam superadas ou substituídas por outras, novas e mais eficientes.

Dois aspectos caracterizam esses processos transformadores. Primeiro, as novas tecnologias não são introduzidas no sistema ao mesmo tempo e nem na sua melhor ou mais apropriada versão, mas, ao contrário, carecem de diferentes e variados aperfeiçoamentos. Segundo, mesmo que relevantes individualmente, as complementariedades e sinergias entre as tecnologias inovadoras são vitais às transformações estruturais que estão por vir. Assim, considerando que essas inovações dependem da superação de gargalos técnicos, que demandam tempo (e mudanças no âmbito científico, institucional e produtivo), as mutações são desiguais entre as atividades econômicas (diferentes conhecimentos técnico-científicos) e nações (diferentes competências).

Em suma, é um processo essencialmente histórico e permeado por suas especificidades (único). Na I Revolução Industrial (RI), por exemplo, quando ocorreu a mudança do sistema de produção domiciliar para o sistema de produção em fábricas, o conhecimento técnico estava associado à indústria têxtil algodoeira tracionada inicialmente por energia hidráulica e, após avanços técnicos, a vapor. Por outro lado, o desenvolvimento da energia a vapor e as novas tecnologias siderúrgicas (ferro) e extrativas (carvão) possibilitaram a expansão das ferrovias. Ademais, algumas das principais inovações subsequentes na indústria do ferro (uso de carvão mineral e novos processos de fundição) viabilizaram tanto outros métodos de produção mais rápidos e eficientes, quanto a fabricação de diferentes máquinas a vapor – inclusive impulsionando melhorias nas máquinas têxteis (DATHEIN, 2003; HOBSBAWM, 1968; FREEMAN; SOETE, 2008).

Se a I RI envolveu, em boa medida, conhecimentos práticos e habilidades pessoais, a II RI distingue-se pela emergência de indústrias em que o desenvolvimento das tecnologias requereu (por vezes, conduziu) avanços no conhecimento científico (ciência pura, de experimentação científica e comprovação prática), como foi o

caso das indústrias de petróleo e borracha, mas também de bens de capital. Outra característica das tecnologias dessa segunda revolução foi o aumento das escalas produtivas e do tamanho das empresas, com forte impacto no nível de concentração industrial e nos padrões de concorrência.

Se as inovações levadas a cabo desde o final do século XIX viabilizaram a eletricidade como fonte de energia e produção de aço em larga escala (vitais, em especial, para o desenvolvimento também de equipamentos elétricos), na primeira metade do século XX inúmeras outras foram produzidas nos laboratórios de pesquisa e desenvolvimento (P&D) – em particular, nas grandes empresas das indústrias química e de materiais elétricos. Essas descobertas só puderam ser conquistadas devido às inovações que sustentaram também as atividades desses laboratórios – por exemplo, o espectroscópio para analisar a estrutura de moléculas, (FREEMAN; SOETE, 2008). Em resumo, a transversalidade de certas inovações deu origem a intenso e persistente desenvolvimento científico, tecnológico e econômico.

A III Revolução Industrial (ou da microeletrônica) promoveu um conjunto de mudanças em diversas indústrias que resultaram na emergência do “complexo eletrônico” – computadores e periféricos, telecomunicações, parte da eletrônica de consumo e segmentos da área de automação industrial – e em novos produtos e serviços fortemente interligados com as tecnologias da informação e telecomunicação. Os avanços tecnológicos da microeletrônica, em particular na informática e robótica de precisão, viabilizaram inovações nos sistemas de telecomunicações e maior capacidade de captação, processamento, armazenamento e distribuição de informações (COUTINHO, 1992).

Foram cruciais para essas conquistas tanto parte do conhecimento científico obtido nas décadas anteriores – Física do Estado Sólido e conhecimentos teóricos sobre interferências nas comunicações (ROSENBERG, 2006, cap. 7) –, quanto os empenhos em P&D, relação e coordenação de P&D entre empresas de semicondutores e de computadores, entre empresas e universidades e o apoio inicial dos governos, em especial para propósitos militares (FREEMAN; SOETE, 2008; MAZZUCATO, 2014). Paralelamente, os *softwares* foram ganhando importância, ampliando também as oportunidades de tratamento da informação.

Para Coutinho (1992), importantes soluções emergiram na segunda metade dos anos 1970, mas intensificadas nos anos 1980, substituindo a eletromecânica pela automação com base na eletrônica (microprocessadores guiando os sistemas de máquinas ou partes deles), impactando fortemente na automação industrial, entre elas: os controladores lógicos programáveis (maior controle da linha de montagem e

da automação); sensores e medidores digitais (maior controle do processo industrial); *Computer Aided Manufacturing* (automação fragmentada e substituição de operações manuais por robôs dedicados, expandindo as economias de escala); e, também, como fundamentos para computadores de controle, *Computer Integrated Manufacturing*, *Computer Aided Design* e *Computer Aided Engineering*. Adicionalmente, nos processos de produção do tipo manufatureiro-artesanal, voltados para a produção de bens “customizados”, foram introduzidos comandos numéricos (CN) computadorizados (CNC) nas máquinas operatrizes e usinagem, alterando a produção estritamente mecânico-artesanal para automação programável (COUTINHO, 1992).

Segundo Schwab (2016), o conjunto de inovações da IV RI envolve tecnologias (i) *físicas* (veículos autônomos, manufatura aditiva, robótica avançada, novos materiais, etc.); (ii) *digitais* – *Internet of Things* (IoT), *big data* e a tecnologia *blockchain*); e (iii) *biológicas* (biotecnologia e genética), todas interligadas por uma base principal: as tecnologias digitais. As novas tecnologias examinadas neste estudo não contemplam toda a “quarta revolução”, mas várias delas vêm sendo adotadas no âmbito da manufatura em um processo conhecido por “Indústria 4.0” ou “manufatura avançada”.

O termo “Indústria 4.0” foi cunhado na Alemanha, especificamente na Feira de Hannover, em 2011. A expressão se tornou publicamente conhecida nesse mesmo ano pela iniciativa “*Industrie 4.0*” (ACATECH, 2013), que reuniu empresários, políticos e membros de universidades com o intuito de analisar e propor medidas para fortalecer a competitividade da manufatura alemã por meio de uma transformação digital (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011 *apud* HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015). A partir daí, o governo alemão passou a apoiar e incorporar o conceito em seu planejamento governamental através do programa *High-Tech Strategy 2020 for Germany*. Entre os principais focos dessa estratégia estavam as melhorias nos processos de produção através do avanço da arquitetura de sistemas, da interoperabilidade, da produção customizada, dentre outros fatores (KAGERMANN *et al.*, 2016).

Nos EUA, geralmente é utilizado o termo “manufatura avançada” como correlato a Indústria 4.0. Uma das primeiras iniciativas foi do governo norte-americano, denominada *Advanced Manufacturing Partnership* (AMP), também em 2011, que previa investimentos na área. Nesse mesmo ano foi publicado o relatório do *President’s Council of Advisors on Science and Technology* (PCAST) que tratava da necessidade de tomada de iniciativas na área para reconquistar a liderança na manufatura, não somente em setores de alta tecnologia, mas também em produtos de baixa tecnologia (FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

[FIRJAN], 2016; KAGERMANN *et al.*, 2016; PRESIDENT’S COUNCIL OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY [PCAST], 2011).

Na China, o programa *Made in China 2025*, inspirado no projeto *Industrie 4.0*, foi lançado em 2015 e tem o objetivo de atualizar a indústria do país criando centros de inovação, fortalecimento de indústrias de base, projetos de fabricação verde e o aumento da capacidade de integração entre digitalização e industrialização (FIRJAN, 2016; KAGERMANN *et al.*, 2016). Outra iniciativa que merece destaque é a da União Europeia, de 2013, que tratou de parcerias público e privada para ajudar as empresas industriais, aumentando a base tecnológica industrial, desenvolvendo o uso das tecnologias de informação e comunicação (TIC) para a fabricação e usando tecnologias inovadoras (FIRJAN, 2016).

Assim como a terminologia, o tema é recente e a discussão, apenas em seu início, ainda procura definir o âmbito das mudanças, estabelecer perspectivas e delimitar tecnologias habilitadoras, básicas e promissoras. Assim, o primeiro mérito deste estudo é tratar de um assunto novo, mas de alta relevância.

Apesar das perspectivas altamente promissoras, as fronteiras do fenômeno “Indústria 4.0” ainda são bastante difusas. Todavia, mesmo que em linhas gerais, já é possível tecer considerações sobre quais os países estão na vanguarda das tecnologias que conformam esse processo. Este trabalho visa contribuir nessa direção, caracterizando conceitos e tecnologias a partir da literatura e avaliando a difusão do conhecimento científico associadas a elas por meio de análise bibliométrica.

Para tal, além desta introdução, o item seguinte revista a literatura específica sobre as tecnologias da Indústria 4.0 para elencar e contextualizar quatro categorias de termos, a saber: (a) termos conceituais; (b) tecnologias básicas; (c) tecnologias habilitadoras; e (d) áreas promissoras. O item 3 discute a metodologia aplicada e apresenta a base de dados (Scopus) utilizada no exame realizado. O item 4, por meio de avaliação bibliométrica, a área científica, país de origem da instituição do autor e as instituições financiadoras da publicação, analisa as características da produção científica mundial entre os anos de 2010 e 2018 que contêm termos associados à Indústria 4.0. Por fim, são tecidas algumas considerações sobre os resultados obtidos.

2. As tecnologias da Indústria 4.0

Atualmente, há um conjunto de “megatendências” relacionadas às novas tecnologias que configuram uma série de inovações consideradas por alguns pesquisadores como a “quarta revolução industrial”. Essas tecnologias, que podem ser agrupadas

em físicas (veículos autônomos, impressão 3D ou manufatura aditiva, robótica avançada, novos materiais, etc.), digitais (*Internet Of Things – IOT*), *big data* e a tecnologia *blockchain*) e biológicas (biotecnologia e genética) estão interligadas por uma base principal: as tecnologias digitais (SCHWAB, 2016). Aplicações de várias dessas tecnologias vêm sendo adotadas também no âmbito da manufatura, em um processo conhecido por “Indústria 4.0”.

Os termos “Indústria 4.0” (*industry 4.0*), “Quarta Revolução Industrial” (*fourth industrial revolution*), “Manufatura avançada” (*advanced manufacturing*), “Indústria integrada” (*integrated industry*), “Indústria inteligente” (*smart industry*), “Internet industrial” (*industrial internet*) ou ainda “Manufatura inteligente” (*smart manufacturing*) remetem a novas tecnologias que permitem maior produtividade, maior interligação entre as áreas de produção e que, por vezes, podem gerar novos produtos e serviços (ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO [OCDE], 2017).

O termo “Indústria 4.0” faz referência às mudanças oriundas de inovações, muitas delas em desenvolvimento, que tendem a alterar profundamente os processos e a organização da produção e interação entre os agentes econômicos. Segundo De Weck *et al.* (2013, p. 26), “Indústria 4.0” é o conjunto de soluções que integram equipamentos, serviços de elevado valor agregado e *softwares* para explorar o uso de insumos em processos ultra-eficiente na produção de bens customizados.

Por exemplo, a manufatura aditiva permite que, através da digitalização de modelos, seja feita a impressão de produtos diversos, possibilitando a criação de bens com formas geométricas diversas e eliminando desperdícios próprios dos processos produtivos tradicionais. Ademais, há uma flexibilização da linha de produção que possibilita a customização em massa. Em robótica avançada, existem máquinas e equipamentos capazes de se adaptarem às atividades programadas, uma vez que controladas por inteligência artificial em conexão remota e comunicação integrada. Em suma, automação e diminuição de falhas na produção características desses sistemas levam ao aumento da produtividade (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA [CNI], 2017).

Os avanços tecnológicos, baseados principalmente na nanotecnologia, também ocorrem via criação de novos materiais capazes de se regenerar, autolimpar ou, como já ocorre com alguns novos metais, a capacidade de retornar a sua forma original. Algumas dessas inovações, como o grafeno (uma forma cristalina do carbono, duzentas vezes mais resistente do que o aço e eficiente condutor de calor e eletricidade), ainda não têm um preço de produção competitivo, mas, assim como

outros nanomateriais, ele pode se tornar economicamente viável. Nesse sentido, a expansão da comercialização e utilização desses tipos de materiais podem alterar fortemente economias com alta dependência de *commodities* (SCHWAB, 2016).

No conjunto digital, os sensores são dispositivos que captam e registram informações a partir de estímulos (como movimentos, luminosidade, dentre outros), podendo ativar outras ações do sistema integrado com base nesses estímulos. Além de capturar informações, os sensores podem transmitir os dados coletados para serem armazenados e tratados na central composta pela tecnologia *Big Data*, interligada à computação em nuvem. Em linhas gerais, *Big Data* é uma infraestrutura de armazenamento de dados bastante superior quanto à capacidade e desempenho se comparado aos métodos tradicionais. As informações são transmitidas via IoT, que permitem a conexão de equipamentos à internet e, dessa maneira, viabiliza a troca de dados entre equipamentos, sistemas, etc. (CNI, 2017).

Em combinação com a robótica avançada, o conjunto de soluções acima permite a interligação entre componentes físicos e virtuais que geram os sistemas chamados *ciber-físicos*. Esses sistemas, além da capacidade de captar e trocar informações, aumentam o *feedback* do “chão de fábrica” e a eficiência da produção, possibilitando uma maior capacidade de criação e aperfeiçoamento dos bens e do processo de produção. Há também uma expansão da capacidade logística, posto que os dados de produção, distribuição e vendas estão disponíveis em tempo real. Além disso, com o maior controle do que é produzido e vendido, é ampliada também a capacidade de acompanhamento pós-venda.

No conjunto biológico, há, sobretudo, inovações relacionadas ao mapeamento genético, que permite não somente a diminuição dos custos de mapeamento, mas também uma maior eficiência quanto à identificação de traços e doenças genéticas, dado que diversas doenças incuráveis estão ligadas a fatores genéticos. Com o aumento da eficácia na identificação e mapeamento dos genes, abre-se uma base tecnológica ampla para o desenvolvimento da biologia sintética (SCHWAB, 2016).

A biologia sintética é a utilização de técnicas de engenharia química e genética e bioinformática para maximizar o funcionamento de determinados organismos a partir do desenho e criação de novas rotas metabólicas e organismos artificiais. Tais organismos podem ser capazes de produzir moléculas que não são encontradas na natureza para atender a interesses específicos (VASCONCELOS; FIGUEIREDO, 2015).

Esta breve síntese dá uma ideia da amplitude das soluções e tecnologias emergentes e o elevado grau de mudanças na manufatura que estão por vir com os desen-

volvimentos associados a Indústria 4.0. Tais mudanças terão fortes repercussões nos modos de gestão e produção, emprego e interação entre produtor-fornecedor, sendo capazes de melhor adequar a produção às características de mercado e dinamizar a produtividade de algumas indústrias. Os avanços na digitalização estão permitindo, cada vez mais, a expansão dessas tecnologias em atividades realizadas por pessoas e empresas. Esses desenvolvimentos estão possibilitando novas soluções na resolução de antigos problemas de vários setores, como, por exemplo, mobilidade urbana, saúde e produtividade industrial (CNI, 2017).

2.1 Tecnologias básicas e habilitadoras

A Indústria 4.0 reúne um conjunto de inovações específicas ao processo produtivo que, na visão de alguns autores, tem um potencial de gerar uma “quarta revolução industrial”. Para Hermann, Pentek, Otto (2015), são quatro os conjuntos principais de tecnologias para a Indústria 4.0: sistemas *ciber-físicos* (CPS); *internet das coisas* (IoT); *internet dos serviços* (IoS); e *fábrica inteligente*. Algumas outras tecnologias não devem ser consideradas exclusivamente da Indústria 4.0, pois foram certificadas nas “revoluções” anteriores, como, por exemplo, a comunicação máquina para máquina (M2M), *big data* e a computação em nuvem. Entretanto, essas tecnologias são consideradas *habilitadoras* da Indústria 4.0.

Os estudos da OCDE (2015 e 2017) também apontam algumas das tecnologias habilitadoras e fundamentais para a “nova” produção industrial – elas serão utilizadas na análise bibliométrica realizada na seção posterior. As tecnologias *big data*, *computação em nuvem* e *internet das coisas (IoT)* são tecnologias que permitem a captura e armazenamento de dados, para serem utilizados em simulações, interpretação com inteligência artificial (IA) e a integração dos sistemas. Entre os resultados dessas interações, estão a impressão 3D ou manufatura aditiva, a atuação de máquinas e sistemas autônomos e uma maior integração nas ações entre humanos e máquinas.

Diferenciadas das tecnologias habilitadoras, Hermann, Pentek e Otto (2015) apontam então para quatro conjuntos de *tecnologias básicas* para a Indústria 4.0. A cada uma delas os autores associaram seis características: interoperabilidade, virtualização, descentralização, capacidade de adaptação em tempo real, orientação de serviço e modularidade (Quadro 1).

QUADRO 1
Principais características das tecnologias envolvidas na Indústria 4.0

Caraterísticas	Tecnologias			
	Sistemas ciber-físicos (CPS)	Internet das coisas (IoT)	Internet dos serviços (IoS)	Fábrica inteligente
Interoperabilidade	X	X		X
Virtualização	X	-	-	X
Descentralização	X	-	-	X
Capacidade de adaptação em tempo real	-	-	-	X
Orientação de serviço	-	-	X	-
Modularidade	-	-	X	-

Fonte: Adaptado de Hermann, Pentek , Otto (2015, p.11).

Os CPS são sistemas capazes de integrar o ambiente físico com infraestruturas de computação e comunicação automatizada, ou seja, é um ambiente virtual capaz de gerar respostas automáticas a partir do monitoramento virtual do processo real. Eles são compostos por subsistemas que controlam sensores e atuadores, tecnologias de identificação, mecanismos de armazenamento e análises dos dados (FIRJAN, 2016).

A IoT é a principal base da Indústria 4.0 por permitir a interação entre objetos, sistemas, plataformas e aplicativos, fazendo com que esses possam trabalhar em conjunto com objetivos em comum. A IoS engloba serviços que estão baseados na IoT, criando um novo nível de agregação de valor aos serviços. Por serem fornecidos pela internet e terem um novo modelo de negócio e infraestrutura diferenciada, esses serviços geram uma nova dinâmica de agregação de valor e de distribuição (FIRJAN, 2016; HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015).

A *fábrica inteligente* faz referência a um novo tipo de indústria, “mais inteligente” do que a do passado, e, possivelmente, um dos conceitos que melhor sintetize as mudanças que configuram a Indústria 4.0. Nela, chamada de “inteligentes” por possuírem sistemas que consideram a posição e o status dos bens e processos, dando tanto uma maior precisão ao monitoramento e troca de informações quanto das necessidades da produção (FIRJAN, 2016; HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015), são aplicadas as tecnologias acima citadas para também facilitar a interação entre as pessoas e máquinas.

Hermann, Pentek, Otto (2015) elencam algumas características gerais ao conjunto de tecnologias de base (Quadro 1). De forma ampla, *interoperabilidade* significa o nível ou capacidade dos sistemas, organizações e/ou indivíduos trabalharem com objetivos em comuns (IDE; PUSTEJOVSKY, 2010). Quando aplicado à Indústria 4.0, o conceito denota as capacidades das tecnologias de interagirem entre si e com as pessoas no decorrer do processo de produção.

A *virtualização* está ligada à capacidade de simular em sistemas virtuais, os CPS, comportamentos reais no ambiente virtual a partir dos dados recolhidos. Caso algo ocorra fora do padrão de determinado processo, o erro será identificado em tempo real. Por outro lado, a *descentralização* é a característica na qual os processos deixam de ser centralizados, dado que, com os sistemas interligados via IoT, há possibilidade de que a decisão seja tomada pelo próprio CPS (FIRJAN, 2016; HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015).

Nesse contexto, as fábricas inteligentes são capazes de capturar informações, tomar decisões e *adaptar-se* (reprogramar) *em tempo real*, permitindo mudanças em caso de erros na produção customizada. Ademais, a *orientação de serviços* compreende a abertura de dados e serviços na internet que permitem comunicação com os clientes e, assim, adaptação imediata às demandas (FIRJAN, 2016; HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015).

A *modularização* diz respeito a uma subdivisão em partes menores de um sistema ou processo, que podem funcionar de forma individual ou em conjunto, o que gera a possibilidade de uma maior variedade de produtos e redução de custos; ou seja, de economias de escala e escopo, aumento da eficiência e velocidade da produção e desenvolvimento de produtos. Esses sistemas modulares permitem que haja uma substituição ou expansão de parte dos módulos individuais, o que contribui para mudanças de produção decorrentes da sazonalidade e de alterações nos produtos (CLAUDIA *et al.*, 2017).

Assim, através dessas características, percebe-se também o importante papel da digitalização nas tecnologias base da Indústria 4.0. A produção está baseada nas tomadas de decisões advindas de dados captados, armazenados e processados em modelos virtuais, que permitem o monitoramento e a tomada de decisões em tempo real, na planta, na distribuição e até mesmo no pós-venda dos produtos. Em resumo, o controle e coordenação dos processos e procedimentos alcançam dimensões além da manufatura.

2.1 Áreas promissoras¹

De Weck *et al.* (2013) apresenta 24 áreas tecnológicas importantes e promissoras para a manufatura nos próximos anos. Apesar, em geral, de as tecnologias englobarem mais de um grupo tecnológico, é possível identificá-las segundo as categorias que melhor as identificam, ou seja, em sete grupos de tecnologias da Indústria 4.0. Essa classificação foi alcançada a partir de uma pesquisa realizada em quatro partes: (1) entrevistas com pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), entre julho de 2011 e agosto de 2012; (2) levantamento junto a 85 programas (29 retornos) de engenharia industrial e de manufatura; (3) 200 entrevistas com firmas realizadas pelo projeto *Production in the Innovation Economy* (PIE); e (4) foi elaborado um conceito amplo de manufatura avançada a partir dos levantamentos realizados.

As tecnologias associadas à manufatura avançada foram divididas em sete categorias, que englobam 24 áreas tecnológicas: (1) *nanoengenharia de materiais e superfícies* (“eletrônica impressa”, “materiais leves”, “revestimentos de substratos”, “materiais compósitos” e “meta materiais”); (2) *manufatura aditiva e de precisão* (“prototipagem rápida” e “manufatura de precisão”); (3) *robótica e automação adaptativa* (“manufatura de simulação”, “manufatura flexível”, “robótica”, “metrologia avançada”, “automação inteligente”, “TI para manufatura” e “sensoriamento avançado”); (4) *eletrônica de próxima geração* (“eletrônica flexível”, “eletrônica ótica e fotônica” e “semicondutores”); (5) *fabricação contínua de produtos farmacêuticos e biomanufatura* (“manufatura médico-farmacêutica” e “genoma de materiais”); (6) *design e gestão de cadeias de fornecimento distribuídas* (“*supply chain* e logística” e “controle de processos”); e (7) *manufatura sustentável* (“eficiência energética”, “manufatura com reciclados” e “produção e refino de biocombustíveis”).

Nanoengenharia de materiais e superfícies é a categoria que reúne a criação e modificação de materiais de nano e microescala, a partir de compostos inorgânicos e metais, assim como compostos biológicos que os avanços tecnológicos já desenvolveram e desenvolverão. O mesmo é válido para polímeros complexos, com expectativas de alterar não somente materiais existentes na natureza, mas criando componentes que possuem propriedades e funções distintas das naturais.

¹ As áreas promissoras abordadas nesse tópico são baseadas nas categorias tecnológicas utilizadas no estudo do MIT “*Trends in advanced manufacturing technology innovation*”, referenciado por De Weck et al. (2013). O presente tópico é amplamente baseado neste estudo.

A “*manufatura aditiva e de precisão*” são as tecnologias relacionadas à impressão “camada por camada” a partir de compostos em forma de pó ou arame, que resultam em bens com formatos complexos (DE WECK *et al.*, 2013). Como mencionado, essa tecnologia prevê a digitalização de modelos e a criação de bens com formas geométricas diversas, além de possibilitar a eliminação de desperdícios (não dobra, não corta, não desgasta, etc., das manufaturas tradicionais) e a customização de produtos.

Robótica e automação adaptativa contém as tecnologias que dão ênfase ao desenvolvimento de máquinas com capacidade de realizar atividades com maior eficiência, assim como se adaptar às novas condições de produção, como uma manufatura customizada, e identificação de problemas no decorrer da cadeia. Essas características são viabilizadas pela integração das tecnologias com a inteligência artificial e comunicação remota.

A *eletrônica de próxima geração* incorpora o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos com novos semicondutores, não mais baseados em silício, mas em outros materiais, como, por exemplo, o arseneto de gálio, que possui potencial de gerar transistores de ultravelocidade e diminuir a escala dos transistores e circuitos integrados, ou seja, muito mais eficientes que os atuais (DE WECK *et al.*, 2013).

Fabricação contínua de produtos farmacêuticos e biomanufatura é uma categoria que agrega dois setores e desafios diferentes. O primeiro abarca os esforços para aumentar a flexibilidade, monitoramento e controle da produção das drogas, expandindo a eficiência da produção de medicamentos tradicionais e, também, dos “medicamentos órfãos”, aqueles de alto valor para doenças raras – a demanda por esses medicamentos é relativamente pequena, motivo do reduzido interesse da indústria farmacêutica no desenvolvimento e comercialização. A biomanufatura enfrenta o segundo desafio: “programar” as células e bactérias de forma a fazê-las produzir proteínas e outros componentes de acordo com uma demanda específica (DE WECK *et al.*, 2013).

O *design e gestão de cadeias de fornecimento distribuídas* envolve o aperfeiçoamento do planejamento e gestão em larga escala das redes de fornecedores distribuídas em cadeias de suprimentos. Esse aprimoramento depende das tecnologias da informação, algoritmos e técnicas de gerenciamento de bancos de dados, assim como tecnologias de rastreamento como o RFID (tecnologia de identificação por rádio frequência), dentre outras. A sétima e última categoria é a *manufatura sustentável*, que contempla as tecnologias voltadas para a diminuição do ciclo de vida dos produtos, a maior

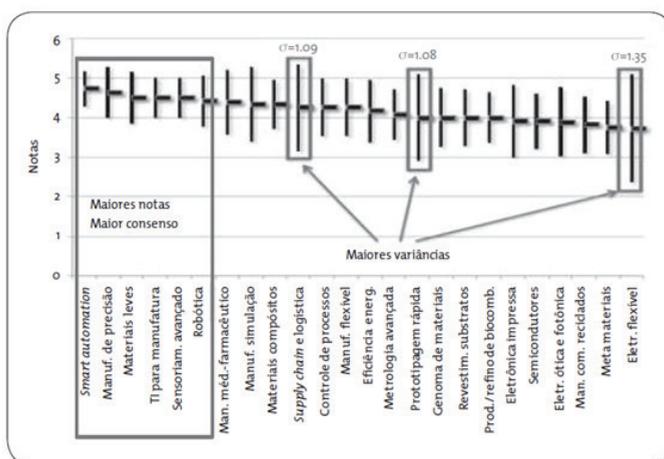
possibilidade de reciclagem, remanufatura e a minimização do consumo de energia (DE WECK *et al.*, 2013).

Resumindo, as categorias e tecnologias apresentadas acima deixam claro que está ocorrendo um conjunto de mudanças que tendem a alterar não somente o processo organizacional das empresas e o nível de produtividade, mas também as características da oferta e demanda e o mercado de trabalho. Estão surgindo um novo padrão de eficiência, novos materiais que mudam os processos e a composição de custos, uma maior capacidade de controle dos métodos de produção, distribuição e acompanhamento do pós-venda.

No conjunto, além do aumento da automação e da demanda por mão de obra mais especializada, esses avanços acenam com a criação de novos produtos e novos mercados. Em suma, há elementos que configuram um processo de ruptura, como concebida por Schumpeter (1942), nas estruturas do sistema. Nestas condições, a competitividade dos países estará, cada vez mais, associada à sua capacidade de assimilar e desenvolver essas tecnologias.

Nas entrevistas realizadas como parte da pesquisa do MIT, foi solicitado ao respondente que apontasse o potencial (escala de 1 a 5) de cada uma das áreas tecnológicas acima alcançar amplos avanços nos próximos 5 a 10 anos. O Gráfico 1 mostra a classificação das tecnologias, segundo as notas que variavam de 1 a 5, sendo 1 pouco e 5 muito promissora. A barra horizontal do gráfico mostra a nota

GRÁFICO 1
Avaliação quantitativa das 24 áreas tecnológicas



Fonte: Daudt e Willcox (2016, p. 11) adaptado de De Weck *et al.* (2013, p. 16).

atribuída pelos entrevistados e a vertical mostra o desvio padrão da média. Essa última estatística aponta as tecnologias em que há maiores (e menores) consensos entre os entrevistados em relação ao seu potencial no futuro próximo. As seis primeiras tecnologias (a partir da esquerda para a direita) possuem notas de nível de potencial maiores que 4,4 e, no geral, os menores desvio padrão (DE WECK *et al.*, 2013).

Segundo a pesquisa, a automação inteligente, a manufatura de precisão, os materiais leves, tecnologia da informação para manufatura, o sensoriamento avançado e a robótica são as áreas tecnológicas mais promissoras para o futuro próximo. Essas tecnologias estão interligadas entre si e, como mencionado anteriormente, envolvem a capacidade informacional da manufatura, ou seja, soluções relacionadas à digitalização. Por outro lado, as três tecnologias que mais apresentaram divergências quanto ao seu potencial de influência foram, na ordem, eletrônica flexível, as tecnologias relacionadas às cadeias de suprimento e logística e a prototipagem rápida.

3. A metodologia: análise bibliométrica

A bibliometria é um método de pesquisa originário do campo da Ciência da Informação utilizado para a investigação do progresso científico. Essa técnica consiste em análise quantitativa das publicações científicas para a elaboração de avaliação qualitativa do número de publicações, a disseminação do conhecimento, as técnicas e tecnologias adotadas para resolução de problemas das pesquisas em determinada área científica, os padrões de autoria das publicações, dentre outros. O estudo bibliométrico pode, portanto, ser usado para examinar a produção científica, reconhecer os elaboradores das investigações e das agências financiadoras junto à comunidade científica em nível nacional e internacional (SANCHO, 2002 *apud* LOPES *et al.*; ARAÚJO, 2006 *apud* LOPES *et al.*, 2012). Neste artigo, para cada palavra-chave ou tecnologia foram levantadas as seguintes estatísticas: número de publicações por ano, área de estudo, países com maior frequência e os fundos de financiamento.

Essa metodologia foi escolhida em detrimento da análise de patentes devido ao fato de o tema conter tecnologias recentes e ser um processo em andamento. Como ainda não há uma definição das tecnologias que mais impactarão, a análise bibliométrica é capaz de traçar um esboço das tecnologias que se consolidarão no futuro como componente na Indústria 4.0 a partir do que está sendo pesquisado atualmente².

2 Existem estudos que empregam análise bibliométrica no tema Indústria 4.0: nacionais - Lima *et al.* (2018), Rangel *et al.* (2019), Furstenau *et al.* (2018), Velho e Barbalho (2019); internacionais - Cobo *et al.* (2018), Muhuri *et al.* (2019), Janik e Ryszko (2018), dentre outros.

Apesar da relevância da análise bibliométrica, essa metodologia apresenta algumas limitações. Por exemplo, o indicador da quantidade de produção oferece valores absolutos, mas sem tratar da qualidade dos trabalhos realizados; há dificuldades também de comparar áreas temáticas, pois podem ocorrer diferentes níveis de produtividade e hábitos de publicação; e, dentro de uma mesma área, pode haver distintas disciplinas que apresentam distintos modelos de publicações (SILVA; BIANCHI, 2001).

Para a elaboração do presente artigo, a base de dados escolhida foi a Scopus, considerada a maior base de dados de resumos e referências bibliográficas de literatura científica revisada por possuir forte cobertura sobre as revistas de ciência e tecnologia. Ademais, possui mais conteúdos europeus que a base de dados alternativa *Web Of Science* (WoS), artigos em outros idiomas além do inglês e a maior parte de seu conteúdo é externo aos Estados Unidos (ELSEVIER, 2017; FALAGAS *et al.*, 2008; LOPES *et al.*, 2012).

A escolha da Scopus para o levantamento dos dados se justifica em virtude de: (1) ser recente o período que será analisado (a partir especialmente do ano de 2010), ou seja, inexistem os problemas de cobertura; (2) pretender-se pesquisar as tecnologias e suas características em vários países, especialmente EUA, Alemanha e China.

Tendo em vista que as tecnologias tratadas neste estudo são muito recentes, o período examinado foi limitado aos anos que vão de 2010 a 2018 (como mostrado na Tabela 1, ao menos 54% das publicações referem-se a esse intervalo). Esse recorte pode ser justificado, por exemplo, pelo fato que o termo “Indústria 4.0” surgiu somente em 2012.

A avaliação bibliométrica apresentada na próxima seção segue as quatro distintas dimensões apresentadas no item anterior: (a) termos conceituais; (b) tecnologias básicas; (c) tecnologias habilitadoras; e (d) áreas promissoras. A busca na base de dados Scopus foi realizada pelos termos em inglês, procurando publicações científicas que contivessem ao menos um dos termos selecionados dentro de cada categoria (Quadro 2). Um total de 26 termos foram pesquisados e divididos em: 7 termos conceituais; 4 tecnologias básicas; 10 tecnologias habilitadoras; e 5 áreas promissoras.

QUADRO 2
Conjuntos de termos selecionados para busca e análise bibliométrica

Conceitos	Indústria 4.0 (<i>industry 4.0</i>), indústria integrada (<i>integrated industry</i>), indústria inteligente (<i>smart industry</i>), internet industrial (<i>industrial internet</i>), manufatura avançada (<i>advanced manufacturing</i>), manufatura inteligente (<i>smart manufacturing</i>), quarta revolução industrial (<i>fourth industrial revolution</i>).
Tecnologias básicas	Internet das coisas (<i>internet of things</i>), internet dos serviços (<i>internet of services</i>), sistemas ciber-físicos (<i>cyber-physical systems or cyberphysical systems</i>), fábrica inteligente (<i>smart factory</i>).
Tecnologias habilitadoras	Big data, computação em nuvem (<i>cloud computing</i>), impressão 3D (<i>3D printing</i>), integração de sistemas (<i>systems integration</i>), integração humano-máquina (<i>human-machine integration</i>), inteligência artificial (<i>artificial intelligence</i>), internet das coisas (<i>internet of things</i>), manufatura aditiva (<i>additive manufacturing</i>), máquinas autônomas (<i>autonomous machines</i>), sistemas autônomos (<i>autonomous systems</i>).
Áreas promissoras	Automação inteligente (<i>smart automation</i>), manufatura de precisão (<i>precision manufacturing</i>), materiais leves (<i>lightweight materials</i>), robótica (<i>robotics</i>), sensoriamento avançado (<i>advanced sensing</i>).

Fonte: Elaboração própria.

4. Os esforços tecnológicos medidos pelas publicações científicas

Esta seção mostra os resultados da análise bibliométrica elaborada sobre os termos representativos da Indústria 4.0 (I4.0) e o conjunto de tecnologias (Quadro 2) contextualizados no item anterior.

A primeira observação da análise bibliométrica, mais geral, reafirma a contemporaneidade das tecnologias selecionadas. No período examinado, os termos associados às tecnologias habilitadoras (62,4%) e tecnologias básicas (72,7%) respondem por parte substantiva do total existente na base Scopus. Além disso, a frequência de quase todos os termos analisados em publicações científicas cresce consistentemente ao longo do período pesquisado (2010 a 2018) (Tabela 1).

Como dito anteriormente, em 2011 tornou-se publicamente conhecida a iniciativa “*Industrie 4.0*” (ACATECH, 2013) e, em 2013, a importante pesquisa do MIT (DE WECK *et al.*, 2013). Esses estudos parecem determinar duas diferentes fases nas publicações científicas. O aumento das publicações após 2013 (difusão do conhecimento e pesquisas científicas) parece confirmar tanto a atualidade das tecnologias da Indústria 4.0 como a consistência dos termos pesquisados (Tabela 1).

TABELA 1
Conceitos e tecnologias da Indústria 4.0: número de publicações (2010-2018)

Publicações	Conceitos		Tecnologias habilitadoras		Tecnologias básicas		Áreas promissoras		Somatório das publicações sobre tecnologias		Crescimento anual tecnologias (%)
	número	(%)	número	(%)	número	(%)	número	(%)	número	(%)	
2010	170	2,0	18.464	5,0	629	1,1	12.170	8,6	31.263	5,5	-
2011	207	2,5	23.186	6,3	1.183	2,1	13.177	9,4	37.546	6,6	20,1
2012	184	2,2	26.478	7,2	1.831	3,2	12.601	9,0	40.910	7,2	9,0
2013	289	3,4	29.538	8,0	2.590	4,6	14.754	10,5	46.882	8,3	14,6
2014	379	4,5	36.854	10,0	3.679	6,5	14.585	10,4	55.118	9,7	17,6
2015	593	7,0	44.323	12,0	5.297	9,3	15.582	11,1	65.202	11,5	18,3
2016	1.117	13,3	54.173	14,7	8.969	15,8	16.821	12,0	79.963	14,1	22,6
2017	1.941	23,1	61.363	16,7	13.353	23,6	18.938	13,5	93.654	16,6	17,1
2018	3.532	42,0	73.512	20,0	19.153	33,8	22.116	15,7	114.781	20,3	22,6
Total	8.412	100,0	367.891	100,0	56.684	100,0	140.744	100,0	565.319	100,0	-

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

O ritmo de crescimento das publicações contendo um dos conceitos aumenta a partir de 2013, especialmente após as obras que definem termos que se tornaram bastante usuais (manufatura avançada e Indústria 4.0). O caso da Alemanha é exemplar, pois, logo após a iniciativa “*Industrie 4.0*”, o país ultrapassou os EUA em menções em publicações (Gráfico 2, anexo). Outro destaque, como será frequente neste estudo, é o crescimento acelerado da China, praticamente eliminando a diferença em relação aos EUA.

No entanto, o desempenho das publicações sobre as tecnologias não foi similar. As tecnologias básicas, que, como dito, emergem com a Indústria 4.0, foram as que apresentaram maior crescimento (cerca de trinta vezes entre 2010 e 2018), mas, por serem muito recentes, ainda não acumulam o maior número de publicações³. Ao contrário, o maior volume de trabalhos científicos é propriedade das tecnologias habilitadoras⁴, que provêm de inovações anteriores (vide item 3), ou seja, mais antigas e mais numerosas (Gráficos 3 e 4, anexos).

Nas áreas classificadas como promissoras, tecnologias consideradas com grande potencial no futuro próximo, os EUA parecem estar reafirmando o seu domínio, especialmente devido ao fato de as publicações conterem o termo “robótica”. Nos últimos anos, o número de publicações da China que tratam dessas tecnologias cresceu significativamente, alcançando valor próximo ao obtido pelos EUA (Gráfico 5, anexo). Os demais países, inclusive Brasil, mantiveram número de publicações relativamente estáveis.

A partir dos termos e tecnologias expostos na Tabela 2, foram examinadas as áreas científicas mencionadas em cada publicação. Como esperado, as áreas de estudo que mais se destacam são as de “engenharias” e a “ciência da computação”, pois as tecnologias e termos pesquisados estão fortemente relacionados, por um lado, às aplicações industriais e, por outro, como discutido anteriormente, os processos da Indústria 4.0 têm como principalmente base a digitalização. Ressalte-se que nas tecnologias habilitadoras (mais antigas) e básicas (novas), aquelas que alicerçam os avanços desta fase da I4.0, predomina a área de ciência da computação, enquanto as tecnologias promissoras (potenciais) parecem depender mais das “engenharias”. Em outras palavras, soluções reais demandam soluções digitais. Ademais, a força de ambas as áreas científicas, que dependem da Matemática para os seus desenvol-

3 Nessas tecnologias, a China, os EUA e a Índia se destacam. Em 2018, último ano pesquisado, a China ultrapassou os EUA em publicações.

4 Os EUA e a China possuem volumes de publicações bastante superiores aos demais países nas tecnologias habilitadoras. O crescimento do número de publicações na categoria é estável por todo o período para Alemanha, Reino Unido e Brasil e acelerado para EUA, China e Índia (Gráfico 4, anexo).

vimentos, pode explicar a relevância dessa última (terceira mais importante), assim como da Física.

O conjunto de termos e tecnologias em exame ultrapassa as mudanças na manufatura e alcança também estudos sobre aprimoramento da decisão, gestão dos negócios e de avaliação de demanda. Nesse sentido, destacam-se também áreas de estudos voltadas para a gestão e tomada de decisão na firma, que são a “negócios, gestão e contabilidade” e “ciências da decisão⁵” e “medicina” (Tabela 2).

TABELA 2
Dados bibliométricos por área de estudo

	Conceitos	15.378		Tecnologias habilitadoras	589.772	
1º	Engenharias	10.053	65%	Ciência da Computação	405.703	69%
2º	Ciência da Computação	7.208	47%	Engenharias	200.970	34%
3º	Negócios, Gestão e Contabilidade	2.299	15%	Matemática	141.377	24%
4º	Matemática	1.958	13%	Medicina	34.404	6%
5º	Ciência de materiais	1.758	11%	Ciência de materiais	32.787	6%
	Tecnologias básicas	78.008		Áreas promissoras	261.517	
1º	Ciência da Computação	58.963	76%	Engenharias	160.121	61%
2º	Engenharia	36.493	47%	Ciência da Computação	137.931	53%
3º	Matemática	12.037	15%	Matemática	40.397	15%
4º	Física e Astronomia	6.786	9%	Medicina	38.123	15%
5º	Ciências da decisão	6.297	8%	Física e Astronomia	17.450	7%

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

A nacionalidade das instituições à qual os autores das publicações são vinculados permite estimar como a ciência de cada economia procura enfrentar os novos desafios tecnológicos. Nessa perspectiva, a Tabela 3 evidencia o domínio quase absoluto dos EUA nas tecnologias da I4.0. Com exceção da categoria de tecnologias básicas (17%), o país detém, ao menos, 20% das publicações selecionadas. Assim, se esse resultado permite ilações, os EUA estão pavimentando cientificamente as trajetórias tecnológicas do futuro e procurando recompôr a sua hegemonia.

5 Ciências da decisão é a aplicação de algoritmos, *machine learning*, inteligência artificial para análise de dados que levem a uma decisão de atuação que gere maiores benefícios.

TABELA 3
Dados bibliométricos por país

	Conceitos	15.378		Tecnologias habilitadoras	589.772	
1º	Estados Unidos	2.399	16%	Estados Unidos	127.406	22%
2º	Alemanha	1.983	13%	China	105.492	18%
3º	China	1.772	12%	Índia	40.575	7%
4º	Itália	993	6%	Reino Unido	38.273	6%
5º	Reino Unido	983	6%	Alemanha	32.437	5%
12º	Brasil	312	2%	Brasil	9.227	2%
	Tecnologias básicas	78.008		Áreas promissoras	261.517	
1º	China	15.302	1º	Estados Unidos	68.558	26%
2º	Estados Unidos	12.901	2º	China	28.693	11%
3º	Índia	8.420	3º	Japão	20.730	8%
4º	Alemanha	4.798	4º	Alemanha	17.340	7%
5º	Reino Unido	4.321	5º	Reino Unido	14.145	5%
15º	Brasil	1.447	17º	Brasil	3.294	1%

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

Nota: Número de países que aparecem com ao menos uma publicação nas categorias: conceitos, 116; tecnologias habilitadoras, 156; tecnologias básicas, 43; e por fim, em áreas promissoras, 157 países.

Além disso, se, em certa medida, a nacionalidade da autoria reflete os “esforços agregados” de um país, verifica-se diminuto número de atores relevantes em todas as categorias. Além dos EUA, três países se repetem entre as cinco maiores frequências: China, Alemanha e Reino Unido. Em outras palavras, as novas tecnologias da I.40 não parecem reduzir as barreiras para a entrada de novos atores, mas, ao contrário, parece preservar aqueles já tradicionais.

Todavia, podem ser consideradas duas exceções. A primeira é a China, principal indústria e segunda economia mundial, que há décadas experimenta um ciclo de desenvolvimento já bastante relatado numa longa literatura (vide, por exemplo, LEÃO *et al*, 2011; CINTRA *et al*, 2015) e, por isso, não representa propriamente uma novidade. A segunda, a Índia, merece ressalvas.

A Índia aparece em duas categorias (terceiro lugar): tecnologias básicas (novas) e habilitadoras (mais antigas), ambas com forte dependência da digitalização, um dos setores que o país possui competências – esta, talvez, seja a sua “janela de oportunidades”. Para enfatizar esse resultado, vale fazer duas ressalvas: (i) o Japão e a Itália aparecem em apenas uma das categorias examinadas; (ii) o Reino Unido está mais mal classificado nas categorias que a Índia frequenta.

Ressalte-se que o governo indiano, através do Ministério de Eletrônica e Tecnologia da Informação (MINISTRY OF ELECTRONICS AND INFORMATION TECHNOLOGY [MEITY]), possui políticas voltadas para as tecnologias da Indústria 4.0. Em 2015, foi proposta uma política voltada para a internet das coisas (IoT) com o intuito de desenvolver habilidades, aprimorar-se tecnologicamente e construir produtos baseados em IoT para as demandas indianas (MEITY, 2015). Também foi formulado o “*National Policy for Advanced Manufacturing*” para aumentar a competitividade industrial do país. Em suma, o país é um caso a ser observado com atenção.

Os países que mais dispõem de publicações possuem políticas industriais e de inovação voltadas para o fomento das tecnologias relacionadas à Indústria 4.0. O Brasil aparece entre as posições décima segunda e décima sétima, não apresentando mais que 2% em nenhuma das categorias. Foi lançado no Brasil, em 2018, o projeto Indústria 2027, uma iniciativa da Coordenação Nacional da Indústria (CNI) por meio do Instituto Euvaldo Lodi (IEL), com apoio da Mobilização Empresarial pela Inovação (MEI), que mobilizaram o Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e o Instituto de Economia da Universidade de Campinas (Unicamp). A motivação adveio do surgimento de novas tecnologias com potenciais disruptivos e da incorporação por diversos países de estratégias nacionais de inovação (INSTITUTO EUVALDO LODI [IEL], 2018).

A avaliação dos fundos de financiamentos⁶ permite estimar os esforços que estão sendo realizados pelas instituições públicas e privadas em cada tecnologia. A Tabela 4 mostra a forte participação da *National Natural Science Foundation of China*, uma instituição ligada ao Estado chinês com a tarefa de administrar o Fundo Nacional de Ciências Naturais do Governo Central (NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA [NFSC], 2019). Essa instituição aparece como a que mais financia publicações científicas que contêm os termos selecionados em todas as categorias. Mesmo que estes dados possam estar influenciados pela intensa presença do estado na economia chinesa, eles ressaltam que as novas tecnologias da I4.0 estão inseridas nas políticas públicas do governo. Em outras palavras, os chineses parecem estar procurando manter o país como polo mundial da “manufatura do futuro” e colocar-se na fronteira das novas tecnologias.

6 A maioria das fontes de financiamento mencionadas nas publicações foi classificada na categoria denominada “indefinido”, ou seja, não há uma instituição vinculada à publicação. Para os propósitos do presente trabalho, essa categoria foi desconsiderada e as participações relativas apresentadas dizem respeito ao total de publicações com financiamento. As porcentagens de publicações que contêm os termos selecionados e possuem fonte de financiamento por categoria foram: conceitos, 26%; tecnologias habilitadoras, 23%; tecnologias básicas, 34%; e áreas promissoras, 26%.

TABELA 4
Dados bibliométricos por fundo de financiamento

	Conceitos	3.571		Tecnologias habilitadoras	118.177	
1º	National Natural Science Foundation of China	549	15%	National Natural Science Foundation of China	28.326	24%
2º	European Commission	205	6%	National Science Foundation (EUA)	10.661	9%
3º	National Science Foundation (EUA)	138	4%	Fundamental Research Funds for the Central Universities (China)	3.840	3%
4º	Bundesministerium für Bildung und Forschung (Alemanha)	124	3%	Engenharias and Physical Sciences Research Council	3.308	3%
5º	European Regional Development Fund	123	3%	National Basic Research Program of China	3.283	3%
	Tecnologias básicas	26.681		Áreas promissoras	40.867	
1º	National Natural Science Foundation of China	5.155	19%	National Natural Science Foundation of China	6.852	17%
2º	National Science Foundation (EUA)	1.555	6%	National Science Foundation (EUA)	4.114	10%
3º	National Research Foundation of Korea	1.086	4%	National Institutes of Health (EUA)	1.420	3%
4º	Fundamental Research Funds for the Central Universities (China)	915	3%	Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada	1.325	3%
5º	European Commission	798	3%	European Commission	1.248	3%

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

Nos estágios iniciais de uma inovação, como descreve a literatura (MAZZUCATO, 2014), há forte presença do estado como ator relevante no fomento de pesquisas básicas. Esse parece ser o caso dos Estados Unidos através, em especial, da *National Science Foundation*, importante instituição de fomento à pesquisa e educação. Na área da saúde destaca-se a *National Institutes of Health* que aparece dentre as que mais financiam na categoria de áreas promissoras. Nos países europeus, há algo similar, mas conduzido, principalmente, pela Comissão Europeia. Em suma, os resultados apontam para uma forte e generalizada presença do estado no apoio à I4.0.

5. Considerações finais

Alguns estudos denominam as mudanças inovativas atuais como “quarta revolução industrial”, que é uma alusão às revoluções industriais passadas, procurando dar um caráter abrangente e profundo quanto às consequências das novas tecnologias. Este estudo analisou parte desta “revolução”, examinando as tecnologias associadas à “Indústria 4.0” e “manufatura avançada”, termos utilizados segundo os programas governamentais que lhes deram origem (Alemanha e EUA).

Apesar de apresentar limitações, a análise bibliométrica utilizada na elaboração do presente artigo é um método que se adequa ao tema por ser um processo ainda em curso e estar diretamente ligado à geração de inovações, sejam radicais ou incrementais, e, assim, associado também à produção científica. As principais limitações são: (i) as publicações examinadas limitaram as informações contidas na base de dados Scopus; (ii) as publicações científicas não necessariamente resultarão em inovações, porém representam divulgação científica que pode resultar em inovações futuras ou derivadas; (iii) não foi avaliada a qualidade dos trabalhos que contêm os termos; e (iv) diversas pesquisas são realizadas internamente às empresas, o que faz com que haja pesquisas não divulgadas, por exemplo, por estarem relacionadas a segredos industriais, os resultados do presente estudo mostraram que as empresas pouco apoiaram as pesquisas que produziram publicações.

A presença dos termos que se referem à Indústria 4.0 é, em sua ampla maioria, recente nas publicações analisadas e apresentam elevadas taxas de crescimento nos últimos anos. O recente, e elevado crescimento, interesse científico nesse campo é um bom indicador de que as tecnologias selecionadas são nascentes ou emergentes, avalizando a proposta deste estudo.

A bibliometria das áreas de estudo revela a importância da “ciência da computação” e das “engenharias”. Isso se justifica devido às tecnologias, em sua maioria, terem aplicações industriais e estarem relacionadas à digitalização. Algo que merece ser salientado é a participação de áreas de estudo relacionadas à gestão de negócios, como as “ciências da decisão” e “negócios, gestão e contabilidade”, demonstrando que as tecnologias vêm sendo pesquisadas também no sentido de provocar alterações nos modos de gestão das empresas.

Os EUA e a China se destacam no número de publicações científicas que contêm os termos selecionados para a pesquisa, responsáveis pela disseminação de grande parte dos termos. O papel destacado dos EUA na “Terceira Revolução Industrial” parece ter-lhes garantido habilidades em termos das tecnologias habilitadoras. Tais

capacitações, necessárias às tecnologias básicas da Indústria 4.0, parecem estar renovando o domínio tecnológico do país. A China, também neste estudo, reafirma ser um caso exemplar: o esforço realizado em termos de publicações a mantém próxima aos EUA. Especialmente nos últimos anos, a performance da China é digna de nota no que toca ao número de publicações científicas nos termos analisados. Essa evolução está associada à política para a manufatura chinesa (*Made in China 2025*).

Dessa forma, os EUA e a China estão se empenhando em estudos científicos (e geração de inovações), criando um ambiente de oportunidades tecnológicas que parecem distingui-los dos demais países. Em alguma medida, a Índia também parece mover-se em direção à Indústria 4.0, diferente do esforço brasileiro, pelos números apresentados (Tabela 3), muito aquém do necessário.

Referências

- ACATECH. *Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0*. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Berlim: Ministry of Education and Research (BMBF), abr. 2013.
- CINTRA, M.A.M. *et al.* (org.). *China em transformação: dimensões econômicas e geopolíticas do desenvolvimento*. Rio de Janeiro: Ipea, 2015.
- CLAUDIA, A. *et al.* A modularização e a indústria 4.0. In: SIMPÓSIO GAÚCHO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2., 2017, Novo Hamburgo, RS. *Anais...* Novo Hamburgo/RS: 17 e 18 ago. 2017.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). *Oportunidades para a indústria 4.0: aspectos da demanda e oferta no Brasil*. Brasília: CNI, 2017.
- COBO, M.J. Industry 4.0: a perspective based on bibliometric analysis. *Procedia Computer Science*, n. 139, p. 364-371, 2018.
- COUTINHO, L. A Terceira Revolução Industrial: As tendências das mudanças. *Economia e Sociedade*, v. 1, n. 1, ago. 1992.
- DATHEIN, R. Inovação e Revoluções Industriais: uma apresentação das mudanças tecnológicas determinantes nos séculos XVIII e XIX. *DECON Textos Didáticos 02/2003*, Porto Alegre, fev. 2003.
- DAUDT, G.M.; WILLCOX, L.D. Reflexões críticas a partir das experiências dos Estados Unidos e da Alemanha em manufatura avançada. *BNDES Setorial*, n. 44, p. 5-45, set. 2016.

DE WECK, O. *et al.* Trends in Advanced Manufacturing Technology Innovation. *Production in the Innovation Economy (PIE) Study*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology (MIT), 2013.

ELSEVIER. *Scopus: content coverage guide*. Research Intelligence, ago. 2017. Disponível em: https://www.elsevier.com/_data/assets/pdf_file/0007/69451/Scopus_ContentCoverage_Guide_WEB.pdf. Acesso em: 5 dez. 2019.

FALAGAS, M.E. *et al.* Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: strengths and weaknesses. *The FASEB Journal*, v. 22, n. 2, p. 338-342, fev. 2008.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (FIRJAN). *Panorama da inovação: indústria 4.0*. Rio de Janeiro: Firjan, abr. 2016.

FREEMAN, C.; SOETE, L. *A economia da inovação industrial*. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

FURSTENAU, L.B. *et al.* Uma abordagem da evolução dos conceitos inerentes da indústria 4.0: uma análise bibliométrica na base Scopus. *In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 24., 2018, Santa Cruz do Sul, RS. *Anais...* Santa Cruz do Sul/RS: 2018.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. Dortmund: Technische Universität Dortmund, 2015. (Working Paper, n. 1).

HOBSBAWM, E.J. *Da Revolução Industrial Inglesa ao Imperialismo*. 5. ed. Trad. Donaldson Garschagen. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2000. [1968].

IDE, N.; PUSTEJOVSKY, J. *What does interoperability mean, anyway?* Toward an operational definition of interoperability for language technology. Department of Computer Science Vassar College, 2010. *In: PROCEEDINGS OF THE SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON GLOBAL INTEROPERABILITY FOR LANGUAGE RESOURCES (ICGL)*, 2010. Disponível em: <https://www.cs.vassar.edu/~ide/papers/ICGL10.pdf>. Acesso em: 19 out. 2019.

INSTITUTO EUVALDO LODI (IEL). *Tecnologias disruptivas e indústria: situação atual e avaliação prospectiva*. Brasília: IEL/NC, 2018. v. 1.

JANIK, A.; RYSZKO, A. Mapping the field of Industry 4.0 based on bibliometric analysis. *In: INTERNATIONAL BUSINESS INFORMATION MANAGEMENT ASSOCIATION CONFERENCE (IBIMA)*, 32., Sevilha, Espanha. *Anais...* Sevilha/ES: 15 a 16 nov. 2018.

KAGERMANN, H. *et al.* *Industrie 4.0 in a Global Context: Strategies for Cooperating with International Partners*. Munich: ACATECH, 2016.

LEÃO, R.P.F. *et al.* (org.). *A China na nova configuração global: impactos políticos e econômicos*. Brasília: Ipea, 2011.

LIMA, F.V.R. *et al.* Análise bibliométrica da produção científica relacionada à quarta revolução industrial (indústria 4.0). *ISTI/SIMTEC*, v. 9, n.1, p.608-616, set. 2018.

LOPES, S. *et al.* A bibliometria e a avaliação da produção científica: indicadores e ferramentas. In: CONGRESSOS NACIONAIS DE BIBLIOTECÁRIOS, ARQUIVISTAS E DOCUMENTALISTAS, 11., 2012, Lisboa. *Actas...* Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 18, 19 e 20 out. 2012. Disponível em: <http://www.bad.pt/publicacoes/index.php/congressosbad/issue/view/10>. Acesso em: 1 abr. 2019.

MAZZUCATO, M. *O Estado Empreendedor: desmascarando o mito do setor público versus setor privado*. São Paulo: Portfolio-Penguin, 2014.

MINISTRY OF ELECTRONICS AND INFORMATION TECHNOLOGY (MEITY). *Draft Policy on Internet of Things*. Government of India, 2015. Disponível em: https://meity.gov.in/writereaddata/files/Revised-Draft-IoT-Policy_0.pdf. Acesso em: 20 dez. 2019.

MUHURI, P.K. *et al.* Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 78, p. 218-235, Feb. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0952197618302458>. Acesso em: 4 fev. 2020.

NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA (NSFC). *NSFC at a Glance*. Government of China, 2019. Disponível em: http://www.nsf.gov.cn/english/site_1/about/6.html. Acesso em: 15 dez. 2019.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). *Enabling the next production revolution: issues paper*. Paris: OECD Secretariat, Mar. 2015.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO (OCDE). *The next production revolution: implications for governments and business*. Paris: OECD Publishing, 2017.

PRESIDENT'S COUNCIL OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY (PCAST). *Report to the president on ensuring american leadership in advanced manufacturing*. Washington: PCAST, June 2011.

RANGEL, Y.L. *et al.* Análise bibliométrica da indústria 4.0: traçando tendências para o futuro. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 39., 2019, Santos, SP. *Anais...* Santos/SP: 15 a 18 out. 2019.

ROSENBERG, N. *Por dentro da caixa preta: tecnologia e economia*. Campinas: Editora da Unicamp, 2006. [1982].

SILVA, J. A.; BIANCHI, M. L. P. Cientometria: a métrica da ciência. *Paidéia Cadernos de Psicologia e Educação*, v. 11, n. 20, p. 5-10, 2001.

SCHWAB, K. *The fourth industrial revolution*. Geneva: World Economic Forum, 2016.

SCHUMPETER, J.A. *Capitalismo, socialismo e democracia*. Trad. Ruy Jungmann. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, 1961. [1942].

VASCONCELOS, M.J.V.; FIGUEIREDO, J.E.F. *Biologia sintética*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015.

VELHO, S.; BARBALHO, S. Um observatório latino-americano da indústria 4.0. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE INOVAÇÃO E GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DO PRODUTO*, 12., 2019, Brasília, DF. *Anais...* Brasília/DF: 11 a 13 set. 2019.

Contribuição dos autores:

A. Fundamentação teórico-conceitual e problematização: Faíque Ribeiro Lima; Rogério Gomes.

B. Pesquisa de dados e análise estatística: Faíque Ribeiro Lima; Rogério Gomes.

C. Elaboração de figuras e tabelas: Faíque Ribeiro Lima; Rogério Gomes.

D. Elaboração e redação do texto: Faíque Ribeiro Lima; Rogério Gomes.

E. Seleção das referências bibliográficas: Faíque Ribeiro Lima; Rogério Gomes.

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesses.

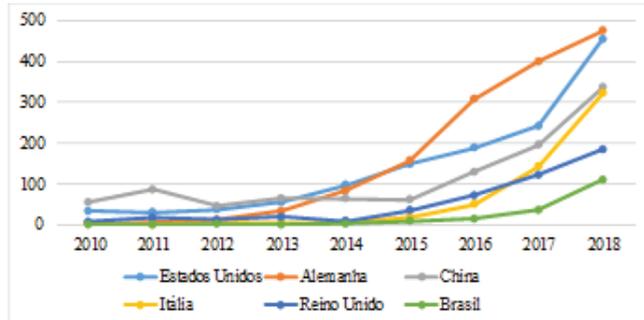
Fonte de financiamento: O autor Faíque Ribeiro Lima é bolsista doutorando da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution CC-BY, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

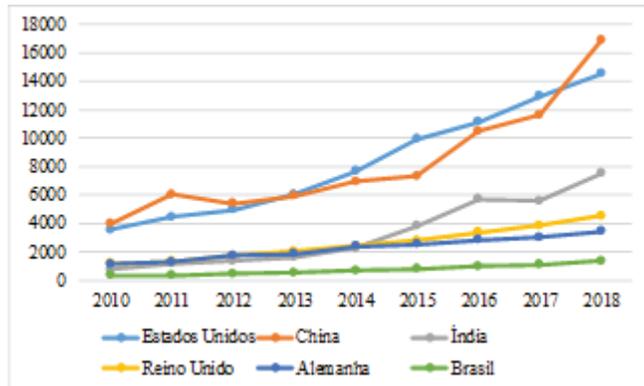
Anexo

GRÁFICO 2
Conceitos: Número de publicações dos países de maior frequência e Brasil (2010-2018)



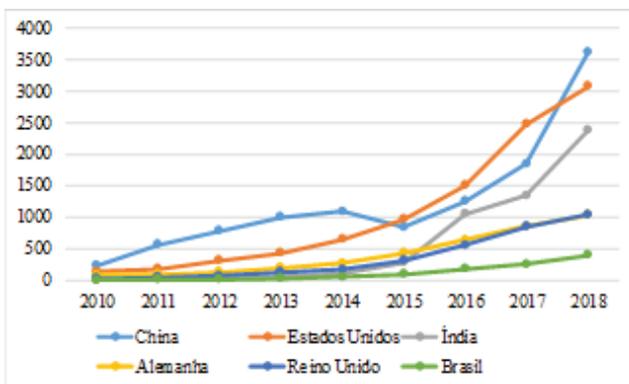
Fonte: Scopus. Elaboração própria.

GRÁFICO 3
Tecnologias Habilitadoras: Número de publicações dos países de maior frequência e Brasil (2010-2018)



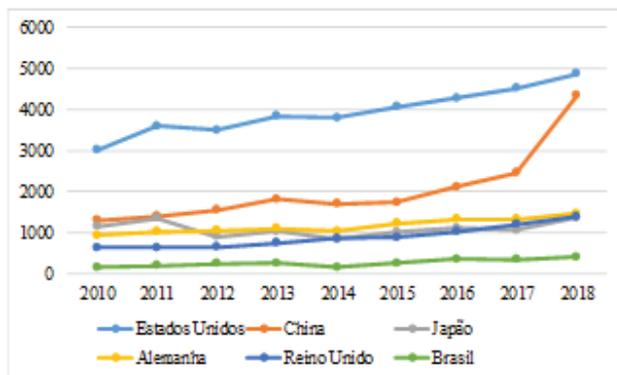
Fonte: Scopus. Elaboração própria.

GRÁFICO 4
Tecnologias básicas: Número de publicações dos países de maior frequência e do Brasil (2010-2018)



Fonte: Scopus. Elaboração própria.

Gráfico 5
Áreas promissoras: Número de publicações dos países de maior frequência e Brasil (2010-2018)



Fonte: Scopus. Elaboração própria.