


unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Ciências e Letras
Campus de Araraquara - SP

FAÍQUE RIBEIRO LIMA

TECNOLOGIAS EMERGENTES NA INDÚSTRIA

4.0: Uma análise bibliométrica



ARARAQUARA – S.P.
2020

FAÍQUE RIBEIRO LIMA

TECNOLOGIAS EMERGENTES NA INDÚSTRIA 4.0: Uma análise bibliométrica

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Ciências e Letras – Unesp/Araraquara, como requisito para obtenção do título de Mestre em Economia.

Linha de pesquisa: Economia da Tecnologia e da Inovação.

Orientador: Rogério Gomes.

Bolsa: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

ARARAQUARA – S.P.

2020

Lima, Faíque Ribeiro
Tecnologias emergentes na indústria 4.0: Uma
análise bibliométrica / Faíque Ribeiro Lima – 2020
106 f.

Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade
Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho",
Faculdade de Ciências e Letras (Campus Araraquara)
Orientador: Rogério Gomes

1. Análise bibliométrica. 2. Indústria 4.0. 3.
Inovação. 4. Manufatura avançada. 5. Scopus. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo sistema automatizado
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FAÍQUE RIBEIRO LIMA

TECNOLOGIAS EMERGENTES NA INDÚSTRIA 4.0: Uma análise bibliométrica

Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Ciências e Letras – Unesp/Araraquara, como requisito para obtenção do título de Mestre em Economia.

Linha de pesquisa: Economia da Tecnologia e da Inovação.

Orientador: Rogério Gomes.

Bolsa: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Data da defesa: 18/02/2020.

MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA:

Presidente e Orientador: Dr. Rogério Gomes

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP

Membro Titular: Dr. Celso Pereira Neris Júnior

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP

Membro Titular: Dr. Marcelo Silva Pinho

Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR

Local: Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências e Letras
UNESP – Campus de Araraquara

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Fábio e Rita, que me deram o suporte necessário para que pudesse percorrer essa caminhada, me ajudando e incentivando no decorrer de toda a minha jornada.

Aos demais membros de minha família que provêm suporte, compreensão e apoio para que eu enfrente as adversidades que surgem.

A todos os meus amigos e amigas que me aconselharam, incentivaram e ajudaram no decorrer do mestrado, em especial aos colegas da Pós Hugo e Luana.

Ao orientador Rogério Gomes, pela confiança, conselhos e orientações no decorrer do Mestrado.

Ao Grupo de Estudos em Economia Industrial (GEEIN), que proporcionou a oportunidade de participação em diversos debates e eventos que em muito contribuíram para meu desenvolvimento como pesquisador.

Agradeço a todos e todas que me desejam o bem e me ajudam a alcançar meus objetivos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

“a principal meta da educação é criar homens que sejam capazes de fazer coisas novas, não simplesmente repetir o que outras gerações já fizeram. Homens que sejam criadores, inventores e descobridores. A segunda meta da educação é formar mentes que estejam em condições de criticar, verificar e não aceitar tudo que a elas se propõe”.

Jean Piaget

RESUMO

O objetivo geral deste trabalho é avaliar características da produção científica internacional nas tecnologias associadas à indústria 4.0. Ademais, os objetivos específicos são: caracterizar a teoria da inovação, utilizada como base teórica do presente trabalho, e realizar uma breve síntese das revoluções industriais; caracterizar a metodologia usada para a elaboração da dissertação, abordando a análise bibliométrica e aspectos da base de dados Scopus; apresentar os conceitos, características e tecnologias da indústria 4.0; caracterizar e analisar os dados bibliométricos obtidos na Scopus. O trabalho se justifica devido à importância na utilização de tecnologias e processos de ponta por nações e empresas na competitividade internacional. A metodologia empregada foi a análise descritiva da frequência dos termos selecionados em títulos, resumos e palavras-chave das publicações científicas anexadas à base de dados Scopus. Considerando a relação entre ciência básica e inovações, o tipo de análise justifica-se devido às tecnologias utilizadas ainda estarem em desenvolvimento. Dessa forma, através das publicações científicas, podem ser traçadas características dos esforços científicos atuais que tendem a facilitar a geração de inovações futuras. A problemática que a dissertação se propôs discutir é: o que é indústria 4.0 e quais as características da produção científica mundial na área? A hipótese adotada foi que, por ainda ser um processo em andamento, a indústria 4.0 e seus conceitos ainda estão em construção, havendo, com o passar dos anos, uma intensificação das publicações sobre temas englobados pela indústria 4.0. A base teórica utilizada foi a teoria da inovação, abrangendo os conceitos de inovação e seu processo de criação e difusão. 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, pois obtiveram, nos anos posteriores, um forte crescimento no número de publicações que contêm os termos selecionados, e, dentre as instituições de financiamento, as governamentais se destacam nos patrocínios das publicações científicas que contêm os termos, em especial as chinesas. Também é possível concluir, com o exposto, que o processo da indústria 4.0 está em construção e constitui-se de tecnologias recentes, porém tem como base o paradigma da microeletrônica, habilitado na Terceira Revolução Industrial.

Palavras-chave: Análise bibliométrica; Indústria 4.0; Inovação; Manufatura avançada; Scopus.

ABSTRACT

The general objective of this work is to evaluate the resources of international scientific production in technologies related to industry 4.0. Furthermore, the objectives are: to characterize a theory of innovation, used as the theoretical basis of the present work and to carry out a brief demonstration of industrial revolutions; to characterize a methodology used for the elaboration of the dissertation, addressing a bibliometric analysis and aspects of the Scopus database; present the concepts, resources and technologies of industry 4.0; characterize and analyze the bibliometric data obtained at Scopus. The work is justified due to the importance of the use of cutting-edge technologies and processes by nations and companies in international competitiveness. The methodology used was the descriptive analysis of the frequency of the terms selected in titles, abstracts and keywords of the scientific publications attached to the Scopus database. Considering the relationship between basic science and innovations, the type of analysis is justified because the technologies used are still under development. Thus, through scientific publications, characteristics of current scientific efforts that tend to facilitate the generation of future innovations can be traced. The problem that the dissertation proposed to discuss is: what is industry 4.0 and what are the characteristics of world scientific production in the area? The hypothesis adopted was that, as industry 4.0 is still an ongoing process, its concepts are still under construction, and over the years there has been an intensification of publications on topics covered by industry 4.0. The theoretical basis used was the theory of innovation, covering the concepts of innovation and its process of creation and diffusion. 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, as they obtained in the subsequent years a strong growth in the number of publications that contain the selected terms and; among financing institutions, governmental ones stand out in the sponsorship of scientific publications that contain the terms, especially Chinese. It is also possible to conclude, with the above, that the process of industry 4.0 is under construction and constitutes of recent technologies, however it is based on the microelectronics paradigm, enabled in the Third Industrial Revolution.

Keywords: Advanced manufacturing; Bibliometric analysis; Industry 4.0; Innovation; Scopus.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparação entre os países que mais possuem publicações que contêm ao menos um dos termos conceituais.....	57
Gráfico 2 - Comparação entre os países que mais possuem publicações que contêm ao menos um dos termos apontados como tecnologias base	63
Gráfico 3 - Avaliação quantitativa das 24 áreas tecnológicas.....	68
Gráfico 4 - Comparação entre os países que mais possuem publicações que contêm ao menos um dos termos das áreas tecnológicas	72
Gráfico 5 - Comparação entre os países que mais possuem publicações que contêm ao menos um dos termos das tecnologias apontadas pela OCDE	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Conjuntos de termos selecionados para busca e análise bibliométrica	48
Quadro 2 - Números de publicações que contêm os termos conceituais representativos por ano (2010-2018)	53
Quadro 3 - Números de publicações que contêm os termos conceituais representativos por área de estudo	54
Quadro 4 - Números de publicações que contêm os termos conceituais representativos por país.....	56
Quadro 5 - Números de publicações que contêm os termos conceituais representativos por fontes de financiamento.....	58
Quadro 6 - Principais características das tecnologias envolvidas na indústria 4.0.....	59
Quadro 7 - Números de publicações que contêm os termos apontados como tecnologias base representativos por ano (2010-2018).....	60
Quadro 8 - Números de publicações que contêm os termos apontados como tecnologias base representativos por área de estudo.....	61
Quadro 9 - Números de publicações que contêm os termos apontados como tecnologias base representativos por país	62
Quadro 10 - Números de publicações que contêm os termos apontados como tecnologias base representativos por fontes de financiamento	64
Quadro 11 - Números de publicações que contêm os termos das áreas tecnológicas por ano (2010-2018).....	70
Quadro 12 - Números de publicações que contêm os termos das áreas tecnológicas por áreas de estudo.....	71
Quadro 13 - Números de publicações que contêm os termos das áreas tecnológicas por países	71
Quadro 14 - Números de publicações que contêm os termos das áreas tecnológicas por fontes de financiamento	73
Quadro 15 - Números de publicações que contêm os termos das tecnologias apontadas pela OCDE por ano (2010-2018)	76
Quadro 16 - Números de publicações que contêm os termos tecnologias apontadas pela OCDE por áreas de estudo	77

Quadro 17 - Números de publicações que contêm os termos das tecnologias apontadas pela OCDE por países	78
Quadro 18 - Números de publicações que contêm os termos das tecnologias apontadas pela OCDE por fontes de financiamento	80
Quadro 19 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “IA, big data e computação em nuvem”, “Redes de comunicações”, “IoT” e “PIC” por ano (2010-2018).....	84
Quadro 20 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “IA, big data e computação em nuvem”, “Redes de comunicações”, “IoT” e “PIC” por áreas de estudos	85
Quadro 21 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “IA, big data e computação em nuvem”, “Redes de comunicações”, “IoT” e “PIC” por países	86
Quadro 22 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “IA, big data e computação em nuvem”, “Redes de comunicações”, “IoT” e “PIC” por fontes de financiamento	87
Quadro 23 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “materiais avançados” e “nanotecnologia” por ano (2010-2018)	88
Quadro 24 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “materiais avançados” e “nanotecnologia” por áreas de estudos	89
Quadro 25 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “materiais avançados” e “nanotecnologia” por países	89
Quadro 26 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “materiais avançados” e “nanotecnologia” por fontes de financiamento.....	90
Quadro 27 - Números de publicações que contêm os termos selecionados do cluster “biotecnologia” por ano (2010-2018).....	92
Quadro 28 - Números de publicações que contêm os termos selecionados do cluster “biotecnologia” por áreas de estudos	92
Quadro 29 - Números de publicações que contêm os termos selecionados do cluster “biotecnologia” por países.....	93
Quadro 30 - Números de publicações que contêm os termos selecionados do cluster “biotecnologia” por fontes de financiamento	93
Quadro 31- Conceitos para avaliação e prospecção tecnológica.....	94
Quadro 32 - Mapa dos clusters tecnológicos.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de quadrante da pesquisa científica	26
Figura 2 – Interação das tecnologias chave para a transformação digital na indústria	75
Figura 3 - Campo de estudos do projeto Indústria 2027.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEE - Armazenamento Eletroquímico de Energia

ASJC - *All Science Journal Classification Codes*

BEIS - *Department for Business, Energy & Industrial Strategy*

BMBF - *Bundesministerium für Bildung und Forschung*

CAD - *Computer Aided Design*

CAE - *Computer Aided Engineering*

CAM - *Computer Aided Manufacturing*

CIM - *Computer Integrated Manufacturing*

CLP - Controladores Lógicos Programáveis

CN - Comandos Numéricos

CNC - Comandos Numéricos Computadorizados

CNI - Coordenação Nacional da Indústria

CoE - Centro de Excelência

CPS - Sistemas ciber-físicos

Crispr/Cas 9 - *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeat*

ERDF - *European Regional Development Fund*

EUA - Estados Unidos da América

IA - Inteligência Artificial

IDA - *Institute for Defense Analyses*

IEL - Instituto Euvaldo Lodi

IIoT - *Industrial Internet of Things*

IoS - Internet dos serviços

IoT - *Internet Of Things*

ISSN - *International Standard Serial Number*

M2M - Máquina para máquina

MEI - Mobilização Empresarial pela Inovação

MEITY - Ministério de Eletrônica e Tecnologia da Informação

MIT - *Massachusetts Institute of Technology*

NRF - *National Research Foundation of Korea*

NSERC - *Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada*

NSFC - *National Natural Science Foundation of China*

OCDE - *Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico*

PCAST - *President's Council of Advisors on Science and Technology*

PIB - *Produto Interno Bruto*

PIC - *Produção Inteligente e Conectada*

PIE - *Production in the Innovation Economy*

QKD - *Quantum Key Distribution*

SJR - *SCImago Journal Rank*

TI - *Tecnologia da Informação*

UE - *União Europeia*

UFRJ - *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

Unicamp - *Universidade de Campinas*

WoS - *Web of Science*

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
1. TEORIA DA INOVAÇÃO E BREVE HISTÓRICO DAS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS	18
1.1 Teoria da inovação	18
1.1.1 A propagação da inovação	21
1.1.2 Características das inovações	23
1.1.3 As firmas inovadoras e a relação entre ciência básica e inovações	24
1.2 Revoluções industriais	27
1.2.1 Primeira Revolução Industrial	27
1.2.2 Segunda Revolução Industrial	31
1.2.3 Terceira Revolução Industrial	35
2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA INDÚSTRIA 4.0	41
2.1 Metodologia	41
2.1.1 Análise bibliométrica	42
2.1.2 Base de dados Scopus	44
2.2 O que é indústria 4.0	49
2.2.1 Análise bibliométrica dos termos conceituais	52
2.3 Análise bibliométrica das tecnologias básicas e das suas características	58
2.4 Áreas tecnológicas promissoras	65
3. TECNOLOGIAS EMERGENTES NA INDÚSTRIA 4.0	74
3.1 Tecnologias para a “transformação digital na indústria”	74
3.2 Projeto Indústria 2027	81
CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
REFERÊNCIAS	102

INTRODUÇÃO

Na busca por maiores benefícios econômicos e competitividade, as empresas e governos investem em pesquisa e desenvolvimento (P&D) com o intuito de criar novas tecnologias que aumentem a eficiência dos negócios. Atualmente, diversos bens e processos têm surgido a partir das tecnologias da informação e da digitalização, promovendo mudanças que estão alterando relações de trabalho, produtividade, custos e a própria organização dos mercados. O conjunto de mudanças e inovações que vêm ocorrendo pode ser denominado de “indústria 4.0” ou “manufatura avançada”. Esse conjunto engloba tecnologias diversas que têm, em geral, avanços baseados na digitalização. Essas mudanças estão sendo denominadas por muitos estudos como “quarta revolução industrial”, uma alusão às revoluções industriais passadas e, dessa forma, atribuindo ao processo da “indústria 4.0” um elevado nível de alterações nos padrões econômicos e sociais.

As revoluções industriais não geraram apenas um conjunto de mudanças sociais, mas alteraram as realidades dos conhecimentos científicos, técnicos e econômicos, possibilitando o crescimento econômico e mudando qualitativamente os meios de produção. Em decorrência, houve aumento de produtividade e de qualidade dos bens ofertados, assim como a capacidade de criação de novos produtos com desempenhos superiores.

A teoria da inovação é adotada para a elaboração do trabalho por apresentar a importância das inovações, o seu processo de criação e características, os padrões e os aspectos que facilitam ou dificultam sua propagação na sociedade. Nesse sentido, essa abordagem é adequada para trabalhar com tecnologias que estão, em sua maioria, ainda em fase de desenvolvimento, mas são mudanças que estão impactando de diversas formas nas indústrias e nos mercados. Os seus impactos ainda não estão definidos, porém há estudos internacionais e estudos governamentais que preveem um amplo impacto decorrente dessas novas tecnologias. Por isso, essas tecnologias serão estratégicas para a inclusão de forma competitiva de uma nação ou empresa no mercado internacional dos novos padrões de custos e produtividade, como também à capacidade de comercializar novas mercadorias que estão surgindo com base nas novas aplicações tecnológicas.

As tecnologias e inovações encontram-se em andamento, o que faz com que o exame dos conceitos empregados nas publicações científicas seja relevante, pois o número de publicações, as regiões geográficas, as áreas de estudo, as instituições de fomento e as tecnologias em que são desenvolvidos e divulgados novos estudos científicos mostram tendências quanto aos avanços tecnológicos posteriores. A partir da identificação dos

principais conceitos e tecnologias da indústria 4.0, serão escolhidas palavras-chave para a elaboração de uma análise bibliométrica.

O objetivo geral da presente pesquisa é avaliar características da produção científica internacional nas tecnologias associadas à indústria 4.0. Nesse contexto, uma forma de avaliar a concentração e dispersão geográfica dessas tecnologias é por meio de análise bibliométrica, que permite avaliar a “produção” de conhecimento científico novo. Assim, este estudo busca fazer um levantamento das publicações que contenham termos selecionados dentro do conceito de indústria 4.0, para identificar: a evolução do número de publicações no decorrer dos anos recentes (2010-2018); as áreas de estudo que mais aparecem como do campo de pesquisa das publicações; os países que mais possuem publicações na área; e as instituições que mais patrocinam pesquisas que contenham os termos selecionados. Esses dados analisados possuem foco no período entre 2010 até o ano de 2018. Tal período foi selecionado para ser detalhado por ser um processo recente e o termo “indústria 4.0” ter surgido somente em 2012. A partir desse exame, o estudo se propõe a avaliar essas características e alguns dos possíveis impactos que os resultados apresentam.

Para alcançar o objetivo geral supracitado, os objetivos específicos desta dissertação são: caracterizar a teoria da inovação, utilizada como base teórica do presente trabalho e realizar uma breve síntese das revoluções industriais; caracterizar a metodologia usada para a elaboração da dissertação, abordando a análise bibliométrica e aspectos da base de dados Scopus; apresentar os conceitos, características e tecnologias da indústria 4.0; caracterizar e analisar os dados bibliométricos obtidos na base Scopus.

A problemática que a dissertação se propôs a discutir é: o que é indústria 4.0 e quais as características da produção científica mundial na área? A hipótese adotada é a de que, por ainda se tratar de um processo em andamento, a indústria 4.0 e seus conceitos ainda estão em construção, havendo, com o passar dos anos, uma intensificação das publicações sobre temas englobados pela indústria 4.0.

É um tema em início de discussão e, por ser um assunto de alta relevância, é importante que haja novos trabalhos que contribuam para o entendimento das implicações da indústria 4.0. Ainda é um tema em debate quanto a quais tecnologias são englobadas por esse processo. Assim, um levantamento e caracterização do conceito e tecnologias fazem-se necessários. Nesse contexto, uma análise bibliométrica do assunto justifica-se.

A partir dessa análise, poderão ser percebidas quais as tecnologias mais pesquisadas atualmente e no passado recente; quais foram as primeiras; quais os países que estão mais

avançados quanto ao nível de publicações; quais as áreas de estudo mais atuantes; e quais as fontes de financiamento das publicações científicas que contêm os termos desse processo da indústria 4.0. Isso permitirá desenhar um esboço da direção das pesquisas sobre o tema, quais as áreas tecnológicas e de estudo mais relevantes e quais os países líderes no processo.

A base de dados escolhida foi a Scopus e esta justifica-se por ter forte cobertura sobre as revistas de ciência e tecnologia; possuir maior abrangência internacional das publicações do que o Web of Science (WoS); e, por apresentar a maior parte de seu conteúdo externo aos EUA, captar mais idiomas além do inglês.

A metodologia do trabalho é a estatística descritiva. Para tal, divide-se em três etapas: (a) apresentar a teoria da inovação, expondo conceitos relacionados à inovação e sua difusão na sociedade e à relação entre ciência básica e inovação, apresentando um breve histórico das revoluções industriais e suas principais características; (b) caracterizar aspectos da análise bibliométrica e da base de dados Scopus, abordando os fatores usados para a análise realizada na presente dissertação; (c) divide-se em dois capítulos, em que se conceitua indústria 4.0 com base em autores que discutem o tema e apresentam tecnologias de destaque que a compõem, realizando-se uma análise bibliométrica simultânea à apresentação do tema.

A presente dissertação está dividida em quatro partes, além desta introdução: a teoria da inovação, que é a base teórica do trabalho, juntamente com uma breve síntese das revoluções industriais; uma caracterização da análise bibliométrica e da base de dados Scopus e uma discussão sobre o conceito de indústria 4.0, suas tecnologias base e áreas tecnológicas, realizando uma análise bibliométrica dos termos selecionados como representativos; uma discussão sobre tecnologias específicas apontadas como componentes da indústria 4.0, produzindo uma análise bibliométrica; e, por fim, as considerações finais da dissertação.

1. TEORIA DA INOVAÇÃO E BREVE HISTÓRICO DAS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS

Este capítulo tem como objetivo apresentar a base teórica utilizada para a elaboração desta dissertação e um breve histórico das revoluções industriais. O embasamento teórico escolhido foi a teoria da inovação devido ao fato de o tema englobar mudanças tecnológicas, produtivas e de gestão que estão alterando estruturas de mercados, produtivas e organizacionais.

Dessa forma, é relevante entender a dinâmica da inovação, observar os seus conceitos e relatar a importância do processo de difusão das tecnologias para abordar as estruturas de propagação e os fatores que afetam a velocidade de criação e difusão das inovações. Uma característica das inovações trabalhada no capítulo é a correlação destas com a ciência básica, ou seja, há um grau de influência entre as publicações científicas e a geração de inovações.

Na segunda seção, é exposto um breve histórico das revoluções industriais com o intuito de apresentar uma síntese de aspectos, como as principais nações e empresas envolvidas nas fases iniciais das revoluções, os setores mais atuante, como vetores das mudanças do período, dentre outras características.

1.1 Teoria da inovação

A presente seção tem o intuito de abordar a base teórica desta dissertação e está dividida em três subseções: na primeira, são conceituadas as estruturas que influenciam no processo de difusão das inovações, que são o sistema tecnológico, a trajetória tecnológica, o paradigma tecnológico e o paradigma tecnoeconômico; são apresentadas características das inovações que afetam sua difusão e desenvolvimento; e, por fim, trata-se sobre a relação entre ciência básica e inovação.

O primeiro autor a discutir “inovação” como central para o desenvolvimento socioeconômico foi Joseph Alois Schumpeter (1883-1950). A inovação advém da criação, melhoramentos e/ou combinação das tecnologias já existentes e pode manifestar-se de diversas formas: um novo bem, ou um bem com que os consumidores não estejam familiarizados, ou que possua uma nova qualidade; a introdução de um método de produção novo, ainda não praticado pelo mercado; a viabilização de um novo mercado, um ramo de produção antes não explorado; obtenção de uma nova fonte de matérias-primas ou de bens-

manufaturados que diminuam os custos mesmo que não haja uma alteração no produto final; a reorganização da produção, das funções, ou distribuição de forma a gerar maior eficiência; ou um aperfeiçoamento nos instrumentos, ou métodos de executar inovações (SCHUMPETER, 1934, ROSENBERG; KLINE, 1986).

Para Schumpeter (1942), as guerras e revoluções políticas podem gerar mudanças no capitalismo, mas estas não são as únicas e nem os principais motivos das transformações. As principais mudanças são aquelas que afetam as estruturas econômicas do capitalismo, que destroem ou alteram profundamente ao longo do tempo as estruturas antigas que darão lugar a novas. Esse processo, denominado de “destruição criadora”, que caracteriza o sistema por sua permanente mutação, na visão de Schumpeter, é a base do desenvolvimento econômico e dá dinâmica ao sistema capitalista. A inovação é o

que revoluciona incessantemente a estrutura econômica a partir de dentro, destruindo incessantemente o antigo e criando elementos novos. Este processo de destruição criadora é básico para se entender o capitalismo. É dele que se constitui o capitalismo e a ele deve se adaptar toda a empresa capitalista para sobreviver” (SCHUMPETER, 1942, p. 110).

A inovação é empreendida pelo empresário, que não necessariamente é o capitalista. Uma característica do “empresário schumpeteriano” é que este possui uma predisposição a uma conduta diferente da tomada usualmente pelos indivíduos em direção à “inovação” e pode-se “pressupor aptidões que diferem em tipo, e não apenas em grau, daquelas do mero comportamento econômico racional” (SCHUMPETER, 1934, p. 89). A recompensa pelo comportamento empreendedor do empresário dá-se pelos “lucros extraordinários” advindos do período em que este possui o monopólio da inovação, o que faz com que haja vantagens em relação aos concorrentes, obtendo-se, assim, um lucro excedente (SZMRECSÁNYI, 2006).

As inovações podem ser realizadas de forma incremental ou radical. A primeira ocorre de forma mais ou menos contínua em atividades industriais ou de serviços, depende de diversos fatores, como concorrência, pressão de demanda, fatores socioculturais e das oportunidades e trajetórias tecnológicas que serão tratadas mais à frente. As inovações radicais são eventos descontínuos e, geralmente, são produto de atividades de P&D, seja por companhias, universidades e/ou instituições de pesquisa, e seus impactos são em termos estruturais (FREEMAN; PEREZ, 1988).

A economia para Schumpeter é composta por ciclos que, em geral, seguem uma sequência de quatro fases interligadas entre si: prosperidade, ou expansão; a recessão; a

depressão; e a recuperação. Os ciclos de conjunturas têm como base as inovações; ou seja, o surgimento e difusão da nova tecnologia dão origem à fase de “prosperidade”; e há o processo de “destruição criadora”, a qual leva às transformações das estruturas. Essas transformações criam as condições para a “recessão” e posterior “depressão”. Assim, os ciclos em Schumpeter são intrínsecos ao desenvolvimento capitalista, composto por altas e baixas na economia. No primeiro caso, ocorre em decorrência da introdução bem-sucedida de inovações que induzem à renovação do aparelho produtivo e maior produtividade e novos bens e serviços. No segundo caso, a crise decorre da ausência prolongada de novas tecnologias no mercado. Ao longo dos ciclos de conjuntura, vão ocorrendo as revoluções industriais (SZMRECSÁNYI, 2006).

Por outro lado, dentre os modelos que procuram explicar o ciclo da inovação, tem-se o modelo linear, que entende o processo de inovação como uma sequência de etapas desde a pesquisa, o que leva ao desenvolvimento e, posteriormente, à produção e às vendas. Uma falha desse modelo é não considerar os mecanismos de *feedback*, pois há adequações no processo e produtos que são descobertos e realizados ao longo desse ciclo. A necessidade de adequações e melhorias que são comunicadas entre as fases advém do ambiente de profunda incerteza, assimetria de informações e erros humanos nos quais as firmas estão inseridas (ROSENBERG; KLINE, 1986).

A inovação não é um processo linear, pois é algo complexo em um ambiente cheio de incertezas. Esse processo é um conjunto de mudanças que não somente impactam nos equipamentos, mas também no mercado, instalações produtivas, conhecimento, mecanismos de aprendizado e nos contextos sociais da organização de inovação. Uma inovação não deve ser viável somente tecnicamente, visto que isso é insuficiente para se estabelecer como algo economicamente viável. Além disso, muitas vezes as inovações advêm das necessidades do mercado, ao invés de oportunidades técnicas de origem científica. Dessa forma, uma inovação deve satisfazer o mercado e ser tecnicamente viável (ROSENBERG; KLINE, 1986). Em suma, o modelo mais apropriado para examinar o ciclo da inovação é o de Klein e Rosenberg, chamado de modelo não-linear, por prever diversos mecanismos de retroalimentação através do *feedback* entre as etapas de desenvolvimento, produção e distribuição e entre firma e usuários, detalhando os elos também com o departamento de P&D e a comunidade científica.

Os autores evolucionários ou neoschumpeterianos analisam o processo de difusão da inovação na sociedade por meio dos fatores que criam entraves ou facilidades à difusão da inovação nesse processo. Essas análises, no geral, entendem que o processo de difusão variará

de acordo com as estruturas vigentes, tais como o sistema tecnológico, a trajetória tecnológica, o paradigma tecnológico e o paradigma tecnoeconômico. No próximo tópico, será abordado o papel dessas estruturas no processo de criação e difusão das inovações.

1.1.1 A propagação da inovação

A inovação tecnológica busca, em sua maioria, criar e resolver questões relacionadas aos novos produtos, problemas produtivos ou de processo para torná-los viável técnica e economicamente. Assim, o sentido das soluções inovativas depende da estrutura tecnológica e de conhecimento e dos problemas existentes em um determinado momento. Além disso, depende de como se dá sua criação, de como decorre sua difusão e de fatores externos às indústrias, como as tendências macroeconômicas, políticas públicas, dentre outros (DOSI, 1988). Os principais conceitos que permeiam esse processo serão abordados na presente subseção.

Um conjunto de tecnologias utilizado para um propósito é denominado de sistema tecnológico. Com base nos sistemas tecnológicos existentes, serão buscadas formas de aperfeiçoamento dos produtos e processos. Essa procura tende a gerar inovações, sejam elas radicais ou incrementais. Com o intuito de aprimorar os sistemas tecnológicos, são identificados os problemas mais relevantes, os princípios científicos que melhor tendem a solucionar os obstáculos e a tecnologia material para tal. Esse “padrão” estabelecido de resolução dos problemas técnicos e de viabilidade econômica (problemas tecnoeconômicos) é chamado de paradigma tecnológico (DOSI, 1984; 1988).

Baseado no paradigma tecnológico, há possíveis direções de soluções para tais padrões de resolução. Esses agrupamentos de direções tecnológicas podem ser denominados de trajetória tecnológica (DOSI, 1984; 1988), sendo “as atividades do progresso tecnológico que ocorrem dentro de *trade-offs* econômicos e tecnológicos definidos por um paradigma” (DOSI, 1988, p. 9).

Na busca de expandir o conceito de paradigma tecnológico de Giovanni Dosi, foi criado por Freeman e Perez (1988) o conceito de paradigma tecnoeconômico. Para estes, o primeiro conceito abrangia somente as mudanças técnicas em produtos e processos produtivos, sem considerar as condições de produção e distribuição que afetam diretamente os custos (LA ROVERE, 2006). O conceito de paradigma tecnológico dá um foco maior nas mudanças técnicas, desconsiderando fatores institucionais que podem ser de grande

importância para a geração de inovações e modernização de empresas, em especial nos países em desenvolvimento (LA ROVERE, 1990, p. 12-6 *apud* LA ROVERE, 2006, p. 290).

Paradigma tecnoeconômico é conceituado por Freeman e Perez (1988) como um salto elevado de produtividade para a maior parte da economia, abrindo uma ampla gama de possibilidade de novos investimentos e lucros. Esse salto é uma combinação de inovações de produto, processo, técnico, organizacional e gerencial. A mudança de um paradigma advém de uma nova combinação de vantagens técnicas e econômicas cruciais. Os paradigmas tecnoeconômicos possuem uma dinâmica específica as estruturas de custos de todos os insumos de produção. Tal conjunto é denominado de “fator-chave” e possui características de impactos diversos, tratados mais à frente. Ademais, conceitua-se “revolução tecnológica” quando há uma mudança de paradigma tecnoeconômico (FREEMAN; PEREZ, 1988).

O fator-chave de cada paradigma tecnoeconômico possui três características básicas: (i) a queda dos custos relativos de forma perceptível e rápida (esse tipo de mudança elevada e contínua impacta nos moldes de decisões e procedimentos considerados de “senso comum” pelos engenheiros e gerentes); (ii) existência de uma fonte ilimitada de fornecedores do insumo por um longo período, pois somente com a confiança de que o fornecimento pode permanecer no longo prazo é que decisões de investimentos elevados serão tomadas; (iii) um potencial perceptível de que o “fator-chave” pode ser aplicado em diversos produtos e processos, englobando grande parte do sistema econômico (FREEMAN; PEREZ, 1988, p. 48).

O paradigma tecnoeconômico engloba diversos elementos quando se consolidam uma forma considerada como a melhor prática de se organizar a firma e a planta; novo perfil de força de trabalho, alterando a qualidade e a quantidade deste; um novo *mix* de produtos, que passa a ser a escolha preferida para investimentos e que representará uma maior proporção do Produto Interno Bruto (PIB); novas tendências de formas de geração de inovações incrementais e radicais, utilizando-se dos novos fatores-chave em detrimento dos insumos relativamente mais caros; as mudanças nos custos relativos acarretam em uma mudança nas vantagens comparativas, alterando os padrões de investimento local em nível nacional e internacional; investimento em infraestrutura para propiciar um ambiente favorável aos novos processos e produtos; novas firmas empreendedoras adentram em setores devido aos novos padrões e, em alguns casos, criam-se novos setores de produção; as grandes empresas expandem participação, o que pode ser via crescimento ou por diversificação nos ramos da economia que usam e produzem mais intensivamente os fatores-chave; ocorre um novo

padrão de consumo de bens e serviços e novas formas na sua distribuição e consumo (FREEMAN; PEREZ, 1988, p. 59).

Em suma, as estruturas que caracterizam o ambiente no qual a inovação foi gerada e se difunde possuem características particulares de acordo com os padrões que foram assumidos pela inovação. A inovação terá um sistema tecnológico peculiar, uma determinada trajetória tecnológica, inserida dentro de um paradigma tecnológico, que expandem os conceitos para além de impactos técnicos. As inovações possuem características que vão influenciar diretamente na sua criação e difusão, facilitando ou criando empecilhos, o que será apresentado na próxima subseção.

1.1.2 Características das inovações

Na busca por benefícios econômicos e proteção contra as perdas, caso um concorrente realize antes a inovação, as empresas investem em P&D e adotam em tecnologias. No entanto, os incentivos a tais investimentos variam de acordo com a estrutura de mercado. Os incentivos serão mais ou menos intensos, dependendo de fatores como a cumulatividade do progresso técnico, a oportunidade tecnológica e a apropriabilidade, que são características importantes para entender o processo de difusão (DOSI, 1984).

O conceito de *cumulatividade* está relacionado ao *know-how* incorporado, ao conhecimento adquirido a partir da realização de certas atividades capazes de agregar saberes que podem ser utilizados para a criação de novas inovações ou aperfeiçoamentos diversos e que conduzem ao progresso técnico. Esses conhecimentos vão além dos manuais, pois estão estritamente relacionados à realização prévia das tarefas, podendo ou não ser transferidos de forma direta. Quanto maior a *expertise*, ou conhecimento anterior, necessária para a realização de determinadas atividades, maiores serão as barreiras à difusão dessa inovação (DOSI, 1984; 1988).

Essa concepção ajuda a explicar a dificuldade que os países em desenvolvimento possuem para criar ou copiar tecnologias avançadas. O conhecimento acumulado em diferentes áreas tecnológicas pelos países em desenvolvimento é bem menor do que o acumulado por países que possuem indústrias já consolidadas na área. Isso prejudica a capacidade de inovações e, conseqüentemente, do progresso técnico realizado pelos países que buscam o *catching-up*.

O segundo conceito é o de *oportunidades tecnológicas*, que diz respeito às facilidades que surgem para a criação de inovações advindas das condições técnicas-científicas que uma tecnologia está fundamentada. Se os avanços técnicos são promissores, se a exploração de novos paradigmas tecnológicos, ou novas trajetórias tecnológicas, são vislumbradas, maior é a atratividade da tecnologia (DOSI, 1984).

Por fim, a *apropriabilidade* influencia a intensidade de incentivos para as empresas inovarem. Se os conhecimentos incorporados na tecnologia impõem barreiras à sua assimilação, será maior o grau de segurança que a empresa terá para criar ou adotar e desenvolver a inovação (incluindo o *trade off* entre gastos em P&D e os investimentos necessários). Dentre as formas para proteção da inovação, estão as patentes; segredos industriais; *lead time*; o nível de recursos e tempo necessários para a imitação; os efeitos da curva de aprendizagem; e o domínio das tecnologias complementares às inovações (DOSI, 1984). A força de cada um desses fatores que permitem a apropriação por parte da firma inovadora é um incentivo para atividades inovativas.

De acordo com os três elementos acima, haverá ou não incentivos à inovação. Se há cumulatividade elevada de conhecimentos, dificulta-se a entrada de novas empresas no setor, altas oportunidades tecnológicas incentivam os investimentos (atraem firmas para o mercado), assim como quanto maiores as condições de apropriabilidade privada de uma tecnologia, maior o interesse da empresa em adotá-la. Na criação de uma inovação, o componente de conhecimento tácito é forte. Para que uma inovação seja viável em termos de mercado, faz-se necessário que se alcance um consenso técnico (no sentido de poder ser realizada); e econômico (algo de interesse do mercado e que, quando empregada, gerará retornos econômicos).

Há outros fatores que impactam as mudanças tecnológicas e que induzem, restringem ou estimulam os resultados das próprias mudanças. Dentre eles, os problemas tecnológicos em atividades inter-relacionadas; escassez ou abundância de insumos vitais para a atividade; grandes choques de preços ou de oferta; as mudanças e níveis dos preços relativos, em especial do capital por trabalho; e os padrões de conflitos industriais (DOSI, 1988).

1.1.3 As firmas inovadoras e a relação entre ciência básica e inovações

As competências para criação e aperfeiçoamento das inovações não são conhecimentos aplicados de forma generalizada e reproduzidos de modo simples. Além das

características e estruturas abordadas anteriormente, outro fator que influencia a criação e propagação de inovações são as particularidades setoriais. O setor afeta fortemente a mudança tecnológica, pois cada um deles obedece a certos padrões inovativos.

Esse tema é trabalhado em detalhe no artigo “Padrões setoriais de mudança tecnológica: rumo a uma taxonomia e uma teoria”, de Keith Pavitt (1984), em que é realizada uma divisão de fontes e usuários da inovação. Para o autor, as indústrias podem ser classificadas em dominada pelo fornecedor; intensiva em produção, que pode ser subdividida em intensiva em escala e fornecedores especializados; e baseadas em ciências. Na primeira, atividades como agricultura, construção civil, manufatura tradicional, dentre outras, as tecnologias aplicadas nesses setores – em geral, em processos – advêm dos equipamentos e serviços desenvolvidos pelos fornecedores e os grandes demandantes ou “usuários”, sendo que esses são sensíveis ao preço de oferta. A apropriabilidade das tecnologias utilizadas ocorre por meio de mecanismos técnicos, como promoção da marca e estratégias de marketing e, em geral, as inovações ocorrem nos processos da firma.

Nas indústrias intensivas em escala, atividades que envolvem materiais volumosos, como o aço e o vidro, além de montagens, como os automóveis e outros bens de consumo duráveis, as fontes de tecnologia são a engenharia de produção das empresas, os fornecedores e a P&D, ou seja, são internas e externas à firma. Os usuários são sensíveis aos preços e os instrumentos para apropriação dos avanços inovativos são os segredos industriais, o *know-how* dos processos, patentes e as economias dinâmicas de aprendizado. Nessa categoria, as inovações surgem predominantemente nos processos. A categoria fornecedores especializados, abrangendo maquinaria e instrumentos de precisão, emprega tecnologias advindas de projetos e desenvolvimentos internos na empresa e os usuários são sensíveis ao desempenho das firmas. A proteção das inovações dá-se pelo *know-how* de projeto, conhecimento dos usuários e patentes, que ocorrem em sua maioria nos produtos (PAVITT, 1984).

Por último, na categoria das firmas inovadoras baseadas em ciência, dos setores farmacêutico, eletrônicos/elétricos e o químico, as inovações se originam da P&D interna das firmas, da engenharia de produção e da ciência pública. Os usuários são sensíveis tanto ao preço quanto ao desempenho das firmas e as inovações são apropriadas através do *know-how* em P&D, patentes, os segredos de conhecimentos acumulados nos processos e as economias dinâmicas de aprendizado. Essas inovações surgem tanto nos produtos quanto nos processos e as empresas inovadoras são de grande porte (PAVITT, 1984).

A categoria de firmas inovadoras baseadas em ciência merece destaque no presente trabalho, já que esta dissertação estuda o nível de publicação científica no tema indústria 4.0. Nas segunda e terceira revoluções industriais, a ciência básica teve um papel fundamental para o desenvolvimento das inovações dos setores químico, elétrico e eletrônico. Assim como nas revoluções passadas, as atuais mudanças inovativas que vêm ocorrendo possuem forte base na pesquisa científica.

Outros trabalhos demonstram a importância da ciência para a geração de inovações, como “*Pasteur's quadrante: basic science and technological innovation*”, de Donald E. Stokes (1997), que, em linhas gerais, buscou compreender a pesquisa científica. A Figura 1 (usa uma matriz 2x2) mostra no quadrante superior esquerdo a pesquisa que não pressupõe uma aplicação imediata (usa, como exemplo, o modelo da estrutura atômica de Niels Bohr). No quadrante inferior direito, a pesquisa é elaborada com o intuito de ser aplicada com determinados propósitos, sem buscar um entendimento aprofundado do fenômeno no campo científico (usa como exemplo os produtos inovativos de Thomas Edison). O quadrante superior direito inclui pesquisas que, além de expandir o conhecimento científico, é inspirado nas considerações de uso (exemplos: os estudos de Louis Pasteur no século XIX e as teorias de Keynes). O quadrante esquerdo inferior são as pesquisas motivadas por particularidades do pesquisador, sem ser necessariamente pelo uso ou conhecimento (STOKES, 1997).

Figura 1 – Modelo de quadrante da pesquisa científica

		Considera o uso?	
		Não	Sim
Procura o entendimento fundamental?	Sim	Pesquisa básica pura (Bohr)	Pesquisa básica inspirada no uso (Pasteur)
	Não		Pesquisa aplicada pura (Edison)

Fonte: Elaboração própria, com base em Stokes (1997, p. 73).

Pode-se perceber, assim, que há uma relação entre o nível de pesquisa científica e a geração de inovações. Dessa forma, uma análise bibliométrica no tema indústria 4.0 tem o potencial de traçar perspectivas quanto às tecnologias mais promissoras e os países que

melhor estão inseridos no tema. Os resultados permitirão avaliar o esforço científico que as nações empenham nos temas correlatos à indústria 4.0.

As firmas inovadoras baseadas em ciência estão bastante interligadas ao processo da indústria 4.0, as empresas farmacêuticas, química e eletrônica possuem um papel fundamental nesse processo, como será tratado mais à frente. O quadrante de *Pasteur* mostra que a pesquisa básica possui um papel importante para as aplicações inovativas. Nesse quadrante, especialmente, é englobada a biotecnologia que assume um papel importante na indústria 4.0, abrange estudos que se utilizam de tecnologias baseadas na digitalização que geram diversas aplicações na saúde, alimentos e desenvolvimento sustentável.

1.2 Revoluções industriais

A presente seção tem o intuito de realizar uma breve síntese das revoluções industriais, abordando o ambiente em que foram geradas as inovações radicais, as tecnologias e algumas das suas principais características, para mostrar, posteriormente, como essas inovações se difundiram e incorporaram aperfeiçoamentos. O intuito é mostrar os países que foram os principais vetores das revoluções, as tecnologias base e aspectos quanto à forma que o desenvolvimento das inovações se deu. Serão utilizados amplamente como principais fontes Hobsbawm (1968) e Freeman e Soete (2008).

A seção está dividida em três subseções, a saber: a primeira trata da Primeira Revolução Industrial; em seguida, é abordada a Segunda Revolução Industrial; e a última subseção discute a evolução dos equipamentos eletrônicos, tecnologias que caracterizam a Terceira Revolução Industrial.

1.2.1 Primeira Revolução Industrial

O processo denominado de Revolução Industrial vai para além da aceleração do crescimento econômico por si só, pois tem como consequência a transformação econômica, em que houve uma mudança qualitativa nos meios de produção. Antes da Primeira Revolução Industrial, houve fases de rápido desenvolvimento tecnológico, porém este foi o primeiro momento em que ocorreu um processo de crescimento autossustentado, baseado em inovações tecnológicas e transformações sociais que se perpetuaram, mudando profundamente diversos aspectos da produção e das relações sociais.

Na Grã-Bretanha da segunda metade do século XVIII, teve início um conjunto de inovações técnicas que alteraram bruscamente o nível de produtividade e de crescimento econômico. Por volta da década de 1780, as condições favoreciam que as mudanças econômicas e produtivas acontecessem na Grã-Bretanha. Entre os motivos, estavam o nível de desenvolvimento das empresas, acesso a amplo mercado externo, elevada acumulação de capital, sistema político estável, estrutura social relativamente flexível, ideologia que favorecia inovações e transações, dentre outros (SUPPLE, 1963 *apud* FREEMAN; SOETE, 2008, p. 66).

No período que antecedeu a Revolução Industrial, a Grã-Bretanha tinha a maior parte de suas atividades econômicas e manufatureiras localizadas na zona rural. As aldeias foram substituídas por vilas industriais que, em sua maioria, posteriormente se tornaram cidades industriais. Esse sistema de “indústria doméstica” rural fez com que o processo e as transações de manufaturas fossem espalhados pelo interior. Essas trocas incentivaram as aldeias a se especializarem em um tipo de manufatura, e, dessa forma, criou-se uma rede interligada de transações. Tal modelo fez com que a elite local tivesse interesse em realizar investimentos em transportes com o intuito de baratear os produtos transacionados pela área.

Tais fatores favoreceram a criação de inovações para além das propriedades técnicas das máquinas, ocorrendo também inovações organizacionais e de marketing. Houve a mudança do sistema de produção domiciliar para o sistema de produção em fábricas, que gerou conflitos políticos diversos, assim como mudanças culturais na sociedade. No período da Revolução Industrial, a produtividade na agricultura manteve-se crescente, porém em taxas menores do que o setor industrial. No entanto, a disseminação do processo de expansão da produtividade não se deu de forma homogênea em todos os ramos industriais: a indústria que “amparou” as inovações que sustentaram a Primeira Revolução Industrial foi a têxtil (FREEMAN; SOETE, 2008).

As inovações da Primeira Revolução Industrial são relatadas, por vezes, como criadas por construtores sem uma formação educacional, que, por um acaso, criaram algo inovador, essa forma de interpretar tal processo é incorreta por subestimar o pensamento sistemático que ocorria na prática industrial da época. Várias das inovações juntavam mais de uma ideia e/ou processos existentes que atuavam de formas independentes. Assim, com base nesses conhecimentos, os inventores desenvolveram mecanismos mais avançados que resultaram em melhor desempenho dos equipamentos. Esse tipo de inovação ocorreu em algumas das principais máquinas de fiação (ASHTON, 1963 *apud* FREEMAN; SOETE, 2008).

A maioria das invenções não podem ser consideradas de forma isolada, pois possuem um nível de relação entre si. Assim, em geral, uma inovação decorre de um processo gradual. Não obstante, os resultados podem (como as máquinas de Hargreaves, Arkwright, Crompton dentre as de outros inventores) causar um impacto revolucionário e uma mudança brusca de produtividade. As inovações da primeira Revolução Industrial, em sua maioria, advinham de conhecimentos práticos, habilidades no processo existente e testes para descobrir se a nova forma se adequava (FREEMAN; SOETE, 2008).

As inovações tinham como principal objetivo primário a economia de tempo, economias relacionadas ao trabalho, recursos naturais, capital de giro e fixo na produtividade geral (VON TUNZELMANN, 1995 *apud* FREEMAN; SOETE, 2008). Esse objetivo e suas consequências difundidas pela produção geograficamente descentralizada, como citado anteriormente, permitiram flexibilidade na indústria e uma relativa mobilidade social maior do que a de outros países no período.

O período de maior expansão da produtividade na Primeira Revolução Industrial foi entre 1780 e 1800, e teve continuidade nas décadas posteriores, porém a taxas menores. Esse desempenho decorreu da incorporação de inovações incrementais subsequentes e difusão das tecnologias criadas. Desse modo, a indústria têxtil se tornou o principal ramo industrial da Grã-Bretanha, o que se consolidou como uma vantagem competitiva da nação no mercado internacional. Depois da difusão das tecnologias, houve uma estabilidade quanto ao padrão do tamanho das firmas e poucas grandes empresas fabricavam cerca de um terço da produção total (FREEMAN; SOETE, 2008).

Algumas das principais inovações subsequentes ocorreram na indústria de ferro, em que se possibilitou a utilização do carvão mineral e permitiu-se um novo processo de fundição, que acarretou outros métodos de produção, aumentando a rapidez e a eficiência. Os produtos dessa indústria foram usados para a fabricação de máquinas a vapor, mas assumiu um papel ainda mais importante com as estradas de ferro a partir de 1830. As máquinas a vapor assumiram também papel de suma importância na indústria têxtil por flexibilizar a localização em que estas poderiam ser instaladas, já que a energia hidráulica demandava que a fábrica estivesse localizada próxima de fontes de água (DATHEIN, 2003; HOBSBAWM, 1968).

Apesar do crescimento econômico que vigorou desde o início da Revolução Industrial, houve uma intensa crise econômica, com auge na década de 1830. Nesse período, o mercado interno não era o suficiente para absorver a produção e havia resistência para as vendas no

mercado externo. Esse período foi conturbado política e socialmente na Grã-Bretanha e constituiu-se na fase de declínio da indústria têxtil e ascensão da indústria de carvão e do ferro, uma era da construção ferroviária. A produção de ferro, além de incentivar as atividades que demandavam esse material, também incentivou a produção de carvão, que, em 1842, tinha 25% de sua produção consumida pela siderurgia, utilização da máquina a vapor e transporte. Com o advento das estradas de ferro, em 20 anos, triplicou-se a produção de carvão e ferro na Grã-Bretanha. Vale ressaltar que, com exceção da indústria têxtil e dos grandes estabelecimentos produtores de carvão e ferro, no geral, as fábricas mecanizadas só foram consolidar-se na segunda metade do século XIX (HOBSBAWM, 1968).

O período de avanço da indústria têxtil algodoeira incentivou o desenvolvimento de outros setores industriais e a intensificação do processo de urbanização. Este último incentivou a expansão da utilização do carvão e, conseqüentemente, a busca de mudanças produtivas que aumentassem a capacidade dos processos. Grande parte do carvão consumido no mundo ocidental ocorreu na Grã-Bretanha, mas os processos de extração eram bastante primitivos (picaretas em passagens subterrâneas). O aumento da demanda incentivou avanços técnicos na mineração. Recorde-se que, até antes da Primeira Revolução Industrial, a Grã-Bretanha teve dificuldades na indústria de ferro, pois a quantidade e a qualidade dos produtos ofertados não eram elevadas (HOBSBAWM, 1968).

Uma das razões que favoreceram o sucesso da economia britânica na era do carvão e ferro foi o processo de industrialização de outros países, que abriram mercado para os produtos dessas indústrias entre 1840 e 1860; foi um período de crescimento das exportações. Os avanços dos transportes marítimos e ferroviários também contribuíram para a viabilização das exportações de produtos britânicos.

A primeira Revolução Industrial foi um processo que gerou avanços para além da capacidade produtiva, influenciando mudanças técnicas posteriores, gerando inovações organizacionais, alterando as relações de comércio exterior e trabalhistas na sociedade e o modo de vida como um todo da população. Por ser a primeira revolução, ela possui características particulares que a diferenciam estruturalmente quanto às posteriores, podendo ser dividida em duas fases: a primeira, basicamente sustentada na indústria têxtil algodoeira, com base principalmente na energia hidráulica; e a segunda, com energia a vapor e ferrovias, tendo como principais ramos industriais a siderurgia (ferro) e a extrativa (carvão). A nação vetor da revolução foi a Grã-Bretanha.

1.2.2 Segunda Revolução Industrial

A Segunda Revolução Industrial teve início aproximadamente na década de 1890 e tem como uma de suas características fundamentais que a diferenciam estruturalmente da primeira a participação da ciência e da tecnologia. Enquanto a primeira envolveu em maior parte conhecimentos práticos e habilidades, no período da segunda, o nível de desenvolvimento da economia mundial demandou o avanço de indústrias em que se fazia necessário o conhecimento científico, como a indústria do petróleo e da borracha. Para haver avanços, tornou-se necessário, desde a segunda metade do século XIX, a utilização de ciência pura, de experimentação científica e comprovação prática (HOBSBAWM, 1968).

Duas indústrias vitais para a Segunda Revolução Industrial foram a da eletricidade e a química; ambas estavam fortemente embasadas no conhecimento científico. A modificação do padrão pode ser percebida no fim do século XIX na indústria química alemã: os progressos decorreram do emprego de mão de obra qualificada, investimentos em equipamentos e em projetos sistematizados de pesquisas. Uma importante invenção do período foi a lâmpada, que serve bem como exemplo para que se possa perceber a relevância da ciência nessa nova fase; foi criada por Thomas Alva Edison a partir de diversos experimentos laboratoriais iniciados em 1876 (HOBSBAWM, 1968).

Vários produtos e ferramentas importantes para a Segunda Revolução Industrial foram criados antes de 1890, data em que é tomada como início dessa revolução. Alguns exemplos desses produtos e ferramentas são a máquina de escrever, de 1843; a fechadura Yale, de 1855; o torno revólver, de 1845; a fresa universal, de 1861; e o torno automático, de 1870. Uma característica base dessa revolução foi o aumento da escala das empresas, que expandiram o nível de concentração e os modelos de concorrência que passaram a predominar. Esse processo, que já podia ser observado na década de 1880, reforçou os monopólios, oligopólios e trustes.

Os EUA foram o país que mais produziu avanços nas tecnologias de impactos da Segunda Revolução Industrial. Entre os motivos para que diversas inovações ocorressem e fossem difundidas nos EUA, estão: por ser uma colônia Britânica, a cultura de pesquisa científica foi transferida; abundância de recursos naturais; amplo mercado interno que favoreceu a implantação de produções em massa de bens padronizados. Ademais, o elevado custo da mão de obra nessa nação incentivou a substituição de trabalho por capital, induzindo os investidores ao desenvolvimento de um modelo intensivo em capital. As indústrias que

mais aumentaram a produtividade no período foram a siderúrgica e a do petróleo, de vital importância para o desenvolvimento de outras, como a de bens de capital, transporte e distribuição de energia (FREEMAN; SOETE, 2008).

Nos EUA, houve uma abrupta expansão da capacidade produtiva do aço (de um milhão de toneladas de aço em 1880, para trinta e um milhões em 1913). Essa conquista foi graças, em primeiro lugar, a uma inovação radical, que foi o processo de Bessemer ainda na metade do século XIX; e, em segundo lugar, por diversas inovações incrementais criadas pelas firmas norte-americanas. A produção do aço é vital por ser um material que permitia, por exemplo, uma durabilidade aproximadamente cinco vezes maior dos trilhos do que os feitos de ferro. Além de sua aplicação nos trilhos, o aço foi vital para o desenvolvimento de equipamentos elétricos. As contínuas invenções de processos e maquinários permitiram a exploração do amplo mercado interno (FREEMAN; SOETE, 2008).

A eletricidade é uma das tecnologias basilares da Segunda Revolução Industrial. As pesquisas científicas na área começaram em países europeus no início do século XIX. Faraday, na década de 1820, estabeleceu o princípio do motor elétrico e, em 1831, publicou um artigo científico com o princípio da indução eletromagnética. Os motores elétricos começaram a ser produzidos na década de 1840, porém a eletricidade nesse período teve maior uso nas comunicações com o telégrafo. Apesar de casos de utilização de eletricidade na década de 1860, sua aplicação em larga escala, permitindo a geração e distribuição de energia, somente ocorreu com a criação de novas invenções, como o núcleo de arame, alternadores, rotores e principalmente os geradores auto impulsionados (dínamos). Esses inventos geraram inovações na década de 1880, como as lâmpadas de filamento de carbono (FREEMAN; SOETE, 2008).

A expansão do uso da eletricidade e do telefone elétrico alterou o posicionamento e a forma de gestão de diversas indústrias de transformação. Com o desenvolvimento das capacidades de telecomunicação, as firmas puderam ficar geograficamente mais distantes entre si, facilitando a gestão de grandes organizações. Assim, com a máquina de escrever juntamente com o telefone, houve um processo de mecanização dos escritórios e do aperfeiçoamento dos processos administrativos internos. Em conjunto com a produção de aço de baixo custo, a utilização intensiva da eletricidade demandou não somente uma infraestrutura física para difusão, mas também de alterações da estrutura regulatória, legislação e coordenação de investimentos públicos e privados (FREEMAN; SOETE, 2008).

A liderança nas inovações na indústria de petróleo e produtos químicos pelos EUA teve como uma das causas a exploração desde a década de 1850 do petróleo como combustível para uso doméstico. Um dos principais inventos que permitiram a expansão da qualidade e da produtividade da exploração na indústria química foi a alteração do processo por lotes para o de fluxo contínuo. Alguns dos acontecimentos que favoreceram as mudanças técnicas neste setor foram o crescimento do mercado de produtos químicos básicos; a alteração da base de carvão para a de petróleo e gás natural; o contínuo aumento da disponibilidade de eletricidade; a melhora da qualidade dos insumos, que permitiu a operação em maior escala, tempo e condições de temperaturas e pressões elevadas; as novas formas de monitoramento do processo; a aplicação de conhecimentos científicos na produção; e a criação da disciplina engenharia química (FREEMAN; SOETE, 2008).

Um dos segmentos da indústria química que mais cresceu foi o de materiais sintéticos, as principais matérias primas derivadas do petróleo e do gás natural. A maioria dos materiais sintéticos foram criados por grandes empresas, exceto, na maioria dos casos, nas etapas iniciais, devido à profissionalização dos centros e laboratórios de pesquisa e desenvolvimento (P&D) industriais no decorrer do século XX. Um dos principais materiais desse segmento foi a borracha sintética, que tinha diversas vantagens quando comparada com a borracha natural, dado que as possibilidades de modificações eram bem maiores e passíveis de serem aplicadas e adequadas a situações específicas.

Nessa indústria, as inovações relacionadas a novos instrumentos científicos foram vitais para o desenvolvimento de novos materiais e mecanismos, como controladores de sensores analógicos, sensores e transformadores especializados, que aumentaram a produtividade e qualidade dos processos. Uma das principais invenções foi o espectroscópio, que permitiu analisar a estrutura de moléculas. Dessa forma, o desenvolvimento das indústrias químicas estava intimamente ligado à evolução dos equipamentos, revelando a importância dos cientistas que criaram suas próprias empresas de instrumentos (FREEMAN; SOETE, 2008).

Um aspecto importante da Segunda Revolução Industrial foi quanto às inovações da gestão da produção, em que se usou da “administração científica” e do processo de produção em fluxo planejado, decompondo as atividades mecânicas e humanas. O método da administração científica começou na década de 1880, com forte influência do engenheiro mecânico Frederick Taylor, criador inicial desse modelo de gestão. Essas propostas tiveram início também nos EUA, principalmente porque havia escassez de mão de obra qualificada,

requerendo a simplificação do processo de produção, de forma que estes pudessem ser realizados por mão de obra não qualificada ou semiquificada (HOBSBAWM, 1968).

Outra característica dessa Revolução Industrial foi a divisão da produção em processos mais simples ligados a uma máquina específica para tal. Esse processo gerou o sistema de “produção em massa”, que buscava níveis mais elevados de automação. Para isso, foi necessário que houvesse demanda por produtos padronizados para determinados tipos de máquinas, inicialmente aplicadas ao setor armamentista. A produção em massa estava voltada ao consumo de classes de menor poder aquisitivo, uma vez que os trabalhadores, obtendo maiores rendimentos, representavam um forte mercado para escoamento de produtos padronizados. Até então, o consumo da população em geral se baseava em alimentos, habitação e vestuário (HOBSBAWM, 1968).

Apesar de as aplicações do sistema de peças intercambiáveis já existirem, o modelo apenas foi implantado por completo com Henry Ford em sua indústria automobilística. Anteriormente a Ford, o sistema utilizado ainda possuía peças artesanais, que exigiam profissionais qualificados para lidar. Esse modelo de produção afetou fortemente o modo de consumo da população e as tecnologias utilizadas em diversos setores industriais, como na produção de eletrodomésticos, bens de consumo duráveis ofertados a preços relativamente baratos e acessíveis. Além desses setores, o modelo de produção em massa foi amplamente utilizado para a produção de caminhões, tanques, aviões, equipamentos navais, para utilização na Segunda Guerra Mundial. Após a guerra, esse modo de produção e consumo se consolidou nos EUA e difundiu-se pela Europa e Japão (FREEMAN; SOETE, 2008).

O modelo fordista de produção trouxe ótimos resultados, fazendo com que fosse necessário aos concorrentes que aderissem à linha de montagem. O mais importante adversário na época foi a General Motors (GM). Alfred Sloan, o principal arquiteto da GM, aderiu parcialmente as ideias de Ford, promovendo alterações, como, por exemplo, aumento da variedade de modelos e aplicação de inovações incrementais advindas da engenharia de produção e investimentos em P&D. A indústria automobilística foi possibilitada pelo surgimento e viabilização técnica e econômica do motor de combustão interna. Essa inovação, que surgiu durante a Segunda Revolução Industrial, está estritamente ligada ao desenvolvimento da indústria petroleira.

No período posterior à Segunda Guerra Mundial, no Japão, houve a criação e a aplicação de um conjunto de inovações organizacionais denominado de “sistema de produção enxuta” ou Ohnismo, criado por Taiichi Ohno, engenheiro-chefe da Toyota. Para a criação

desse modelo, Ohno analisou o modo de produção fordista e percebeu os pontos fracos, como o excesso de materiais, capital e mão de obra, além de considerar o momento da economia japonesa. Com o fim da Guerra, o Japão se encontrava com um mercado interno reduzido e escassez de capital, inviabilizando o sistema de produção em massa. Após 20 anos de vigência, o modelo toyotista de produção consolidou-se e superou a concorrência mundial, a partir de um conjunto de mudanças que diminuiu os custos e aumentou a qualidade (FREEMAN; SOETE, 2008).

Dentre as mudanças de produção que caracterizam o toyotismo, estão a produção em pequenos lotes, que permitia a identificação de defeitos, assim, economizando desperdícios; e o trabalhador tinha maiores responsabilidades e qualificação, gerando mais motivação ao operário do que no modelo fordista. Durante o período de amadurecimento desse modelo de produção e da indústria automobilística japonesa, o governo se utilizou de políticas protecionistas, como a proibição de investimentos estrangeiros e a imposição de tarifas protecionistas à importação (FREEMAN; SOETE, 2008).

Na Segunda Revolução Industrial, ocorreram diversas inovações radicais, em especial em indústrias de base, que serviram para o incentivo de desenvolvimento de outras indústrias. As mudanças geradas pelas inovações radicais e as incrementais criaram fortes alterações no modo de vida das pessoas, alterando padrões de consumo, de produção, culturais e de relações de trabalho. Além das inovações mecânicas, é visível a importância fundamental que tiveram as inovações organizacionais para os desenvolvimentos produtivos que ocorreram no século XX. A fonte de energia base foi a eletricidade e o petróleo, que embasou diversos outros setores da economia. O principal país vetor da criação dessa Segunda Revolução foram os EUA.

1.2.3 Terceira Revolução Industrial

A Terceira Revolução Industrial se dá em um contexto de crise econômica mundial, que tem como principal estopim o choque dos preços do petróleo na década de 1970. Nesse período, houve o surgimento de novos métodos de gestão e organização da produção em virtude do esgotamento do modelo fordista de produção, cuja rigidez da manufatura dificultava a adaptação à nova conjuntura. Os problemas do fordismo se davam no sentido de enrijecer os investimentos de longo prazo e propor um sistema de produção em massa que prejudicava o planejamento.

Nesse cenário de crise, com o intuito de diminuir custos e aumentar produtividade, buscaram-se alternativas tecnológicas, com o aumento do uso da microeletrônica e automação. No Japão, as mudanças organizacionais e tecnológicas se iniciaram antes do que no ocidente, em implantação desde a década de 1950, como discutido anteriormente. O conjunto de grandes transformações sociais, técnicas, econômicas e culturais ganham força na década de 1980.

A indústria eletrônica teve sua base inicial com a comunicação por rádio, tecnologia utilizada desde a década de 1890, ampliada, na década 1930, com a televisão. As principais aplicações iniciais dos equipamentos eletrônicos foram para sistemas de navegação e detecção na forma de radares. Após a Segunda Guerra, houve aplicações também em setores civis, como tráfego aéreo e navegação marítima. Durante as décadas de 1950 e 1960, ocorreram diversos avanços na comunicação eletrônica e nos sistemas de computadores que elevaram a capacidade de processamento e armazenamento de dados e queda de custos, permitindo aplicações dos computadores ao controle de processos industriais. Já nas décadas de 1970 e 1980, surgiram os microcomputadores que aumentaram o número de componentes por centímetro cúbico e, ao mesmo tempo, diminuíram custos (FREEMAN; SOETE, 2008).

Outro invento eletrônico foi a televisão (TV). Com os investimentos em P&D realizados a partir de 1924 e, depois, em 1939, a RCA lançou comercialmente a TV. A EMI começou as pesquisas mais tarde, porém avançou mais rápido, investindo no desenvolvimento de transmissores, o que possibilitou que o canal BBC transmitisse regularmente programas de televisão em 1936. Ainda nesse ano, a EMI e RCA fizeram um acordo de licenciamento e partilha de conhecimentos adquiridos pelas empresas. A EMI tinha, antes da Segunda Guerra mundial, o mesmo tipo de acordo com a *Telefunken*, capaz de produzir um sistema de televisão antes da Guerra, o que inviabilizou a implantação de um sistema regular, apesar da empresa ter preparativos de vendas em massa de um receptor popular (FREEMAN; SOETE, 2008).

Uma das formas de aumento de qualidade e diminuição de custos de produção nas indústrias japonesas foi a criação e incorporação de circuitos integrados nas TV's a cores. Essa tecnologia foi criada a partir de esforços inovativos que tiveram início em 1966 e contou fortemente com o apoio do Ministério do Comércio e Indústria do Japão (MITI), envolvendo cinco fabricantes de TV's, sete fabricantes de semicondutores, quatro universidades e dois institutos de pesquisa. Por meio desse amplo esforço conjunto, o Japão alcançou a liderança na produção de TV's a cores. Além das inovações técnicas, houve inovações gerenciais que,

assim como na produção automobilística, diminuíram o tempo de programação e acabamento do produto, integrando pesquisa, desenvolvimento, produção e *marketing*, gerando capacidades de inovações técnicas e de processos (FREEMAN; SOETE, 2008).

Outra importante invenção que foi uma das principais bases para a utilização da microeletrônica foi o computador. As primeiras máquinas eletrônicas tinham uma capacidade de velocidade mais de mil vezes maiores que as máquinas eletromecânicas para a resolução de cálculos. Zuse foi um dos primeiros a trabalhar com essa tecnologia, tendo o suporte da companhia alemã *Telefunken*. Porém, com a Segunda Guerra, houve interrupções nos trabalhos e, assim, a liderança nesse ramo foi transferida da Alemanha, principalmente para os EUA e para a Grã-Bretanha. Nos EUA, o primeiro computador eletrônico começou a ser elaborado em 1942 e finalizado em 1946, o ENIAC na Universidade da Pensilvânia, com propósitos militares. Até 1955, vários avanços foram feitos, contudo, ainda não havia perspectivas sobre o uso de forma ampla dos computadores, sendo a maior demanda por parte dos militares (FREEMAN; SOETE, 2008).

Até início da década 1950, os computadores eram, em sua maioria, calculadoras em cartões perfurados e havia uma resistência para a introdução dos computadores eletrônicos. As principais indústrias do setor na época eram a IBM, nos EUA, e a BTM e Power-Samas, na Grã-Bretanha. Com relação aos computadores eletrônicos, após o ENIAC, em 1946, foi criado o EDVAC também na Universidade da Pensilvânia pela IBM. Posteriormente, foram criadas inovações pela empresa *Remington Rand* e pelo MIT, a armazenagem magnética da memória principal, a tradução mecânica de instruções, discos e tambores magnéticos. Na década de 1960, a IBM realizou altos investimentos no desenvolvimento de máquinas e *software*, todavia as criações não alcançaram as especificações esperadas, sendo vendidas poucas unidades a um baixo preço. Os prejuízos foram menores devido à participação estatal nos custos de desenvolvimento (FREEMAN; SOETE, 2008).

Os computadores eletrônicos vieram gerar lucros somente na década de 1960, ainda que diversas empresas atuassem no setor. Porém, até a década de 1970, a IBM permaneceu com o controle do mercado. A partir dessa década, a empresa passou a enfrentar desafios em segmentos específicos do setor, como os microcomputadores e os sistemas maiores. Até o momento, a IBM tinha um maior foco nos grandes computadores *mainframe*, mas o advento dos computadores pessoais promoveu uma mudança no mercado mundial. Somente em 1980, lançou seu programa de desenvolvimento para concorrer nesse mercado, enfrentando empresas já bem estabelecidas no segmento. Apesar de ter ingressado no ramo de

computadores pessoais, a concorrência já consolidada fez com que a empresa, nas décadas de 1980 e 1990, reduzisse sua força de trabalho pela metade, sofrendo um declínio abrupto de sua rentabilidade (FREEMAN; SOETE, 2008).

Na década de 1980, os computadores mais potentes se baseavam nos “*transputers*”, que eram microprocessadores com memória integrada; e no processamento paralelo, que possibilitava a integração e processamento conjunto de diversos computadores. Assim, como nos períodos anteriores, no desenvolvimento de novos sistemas e tecnologias, foi importante a interação entre o P&D industrial e os pesquisadores de universidades e a relação entre as empresas de semicondutores e as de computadores. O desenvolvimento e inovações na indústria de bens de capital de eletrônicos teve como base a criação de novos componentes, novos métodos de montagens, processos que demandaram gastos elevados em P&D (FREEMAN; SOETE, 2008).

Com os avanços tecnológicos da microeletrônica no período, em particular na informática e robótica de precisão, houve principalmente inovações quanto aos sistemas de telecomunicações, possibilitando uma nova capacidade de captação, processamento, armazenamento e distribuição de informações. Assim, as bases do paradigma microeletrônico que fundamenta a chamada Terceira Revolução Industrial surgiram anos antes e decorreram dos empenhos em P&D, sistematizando ainda mais a coordenação entre os setores de P&D das empresas e as universidades, do apoio inicial dos governos, em especial para propósitos militares.

A microeletrônica se tornou a base de um conjunto de mudanças em diversas indústrias, segmentos e setores, gerando novos produtos e serviços. Esse “complexo eletrônico” estava interligado fortemente com a tecnologia da informação. Desde a década dos anos 70, nas economias capitalistas avançadas, havia as condições técnicas para a constituição do “complexo eletrônico”, com as bases tecnológicas citadas, como computadores e periféricos, telecomunicações, parte da eletrônica de consumo e segmentos da área de automação industrial (COUTINHO, 1992).

O conjunto de mudanças advindas da microeletrônica preencheu condições para que se pudesse afirmar que houve o surgimento de um novo paradigma tecnológico. As condições que podem ser apontadas são a amplitude de aplicação em bens e serviços; oferta crescente e suficiente para atender à demanda; queda rápida nos preços relativos dos produtos que contêm inovações; impactos nas estruturas organizacionais, financeiras e nos processos de trabalho; aumento da produtividade do trabalho e nos custos de capitais. Um importante impacto

advindo da microeletrônica foi a substituição da eletromecânica pela eletrônica na base da automação com a utilização de controladores lógicos programáveis, permitindo maior controle da linha de montagem e da automação, advinda na segunda metade dos anos 70 e que se intensificou na década dos anos 80 (COUTINHO, 1992).

O paradigma da microeletrônica impactou fortemente nos processos de produção industrial, alterando o modo como se dava a automação nas indústrias. Os microprocessadores passaram a guiar os sistemas de máquinas ou parte destas. Os processos de automação tiveram sua capacidade incrementada: os processos contínuos de produção incorporaram controladores lógicos programáveis (CLP), sensores, medidores digitais, que permitiram um maior controle do processo industrial; os processos de automação discretos-interrompíveis também incorporaram os CLP e o *Computer Aided Manufacturing* (CAM), que permitiram a otimização através da programação; processos de automação fragmentada (linhas de montagem) substituíram em certos movimentos repetitivos operações manuais por robôs dedicados, expandindo as economias de escala; por fim, os processos de produção do tipo manufatureiro-artesanal, voltados para a produção de bens “customizados”, foram introduzidos na utilização de comandos numéricos (CN) e dos comandos numéricos computadorizados (CNC) nas máquinas operatrizes e usinagem, havendo a alteração do patamar de produção estritamente mecânico-artesanal para a automação programável. Isso cria as bases para avanços que permitem formas mais flexíveis de automação (COUTINHO, 1992).

Os incrementos à automação através da programação tiveram sua difusão inicial nos anos da década de 1980, criando os fundamentos para computadores de controle (*Computer Integrated Manufacturing* - CIM). Já nesse período, havia técnicas que se utilizavam de computadores para desenho (*Computer Aided Design* – CAD) e engenharia (*Computer Aided Engineering* - CAE). Assim, o paradigma da microeletrônica permite uma fusão profunda da mecânica e da eletrônica digital (COUTINHO, 1992).

Percebe-se que Luciano Coutinho, em seu artigo, “A Terceira Revolução Industrial e Tecnológica: as grandes tendências de mudança”, no ano de 1992, traçou um perfil do paradigma da microeletrônica que possui tecnologias utilizadas atualmente que vêm sendo aperfeiçoadas para incrementos produtivos. O paralelo entre a Terceira Revolução Industrial, o paradigma da microeletrônica e o que se tem como processo da indústria 4.0 e manufatura avançada será tratado nas considerações finais desta dissertação, em que já terão sido apresentados os conceitos e as tecnologias que compõem a indústria 4.0.

Ocorreram diversas alterações nas relações internacionais de trabalho e produtivas no decorrer da Terceira Revolução Industrial, mudando também a forma de investimentos em P&D. Tais alterações permitiram a criação de diversos produtos que alteraram as relações nos mercados financeiros e na troca de informações. Quanto à base energética, não houve a difusão de tecnologias que substituíssem a eletricidade e o petróleo. Os principais países a serem o vetor dessas mudanças foram os EUA e o Japão, que tinham algumas das principais empresas do setor da microeletrônica.

2. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA INDÚSTRIA 4.0

O presente capítulo tem como intuito apresentar a metodologia utilizada na dissertação e o conceito de “indústria 4.0”, suas tecnologias base, características e as áreas tecnológicas mais promissoras. Na primeira seção, é exposta a metodologia, que é constituída de uma análise bibliométrica das publicações científicas que contenham os termos selecionados na base de dados Scopus. Além dos conceitos relacionados à análise bibliométrica, também são apresentados aspectos técnicos da Scopus relevantes para o entendimento de como estes dados são tabulados e as características relacionadas à nomenclatura utilizada pela literatura para referir-se ao processo da indústria 4.0.

Nas três seções posteriores, o foco é o conceito de indústria 4.0, suas características e tecnologias base. Essas seções se dividem da seguinte forma: (i) fazer uma discussão sobre o tema indústria 4.0 e uma análise bibliométrica nos termos que conceituam o processo estudado, observando sua amplitude de forma geral; (ii) apresentar algumas das tecnologias bases e suas características, feita uma análise bibliométrica com tais tecnologias; (iii) abordar um estudo do MIT que indique as áreas tecnológicas mais promissoras dentro do processo no futuro recente e fazer uma análise bibliométrica das áreas principais.

As tecnologias e áreas apresentadas no decorrer do presente capítulo abrangem não somente as consideradas como chave nos estudos em que são utilizados com ênfase, mas também são abordadas como fundamentais em outras publicações de importantes instituições, como a PCAST (2011), IDA (2012), McKinsey (MGI, 2012), OCDE (2015; 2016; 2017), BMBF (2010), Heng (2014) e Wübbecke *et al.* (2016). Desse modo, parte das tecnologias e áreas selecionadas são citadas como basilares por publicações não somente de renomadas instituições de pesquisa, como também no planejamento estratégico da Alemanha, dos EUA e da China.

2.1 Metodologia

Esta seção tem como objetivo apresentar as questões metodológicas para a elaboração da dissertação. A análise está baseada na estatística descritiva dos dados de produção científica extraídos da base de dados Scopus. Para melhor compreender os dados, esta seção aborda os mecanismos utilizados para o levantamento das publicações que contenham os termos selecionados como representativos da indústria 4.0. A primeira subseção trata da

análise bibliométrica e de como se deu a escolha da base de dados, enquanto a segunda trata de aspectos técnicos da Scopus e dos termos utilizados no presente trabalho.

2.1.1 Análise bibliométrica

A bibliometria é um método de pesquisa originário do campo da Ciência da Informação utilizado para a investigação do progresso científico. A análise bibliométrica consiste em técnicas de análise estatística qualitativas e quantitativas das publicações científicas para medir os níveis dessa produção, a disseminação do conhecimento, o sentido quanto às técnicas e tecnologias adotadas para resolução de problemas das pesquisas em determinada área científica, os padrões de autoria das publicações, dentre outros dados. O estudo bibliométrico pode, portanto, ser usado para avaliar a produção científica. Tais avaliações podem ser utilizadas no reconhecimento dos elaboradores das investigações e das agências financiadoras junto à comunidade científica em nível nacional e internacional (SANCHO, 2002; ARAÚJO, 2006 apud LOPES *et al.*, 2012).

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 atualmente.

A análise estatística de informações bibliográficas tem sido feita desde o século XIX, sendo, desde então, formulados modelos e leis, mas foi no século XX que houve uma maior sistematização desses métodos (BOUSTANY 1997 apud SANTOS; KOBASHI 2009).

Alguns dos principais autores da quantificação dos produtos da atividade científica são Lotka, Bradford, Zipf, que atribuíram algumas leis à análise bibliométrica. A principal contribuição de Lotka foi a lei do quadrado inverso, utilizado para mensurar produtividade de autores a partir do tamanho e frequência dos trabalhos de determinado autor. A lei de Bradford tem como objetivo primário descobrir os periódicos principais e que mais difundem um tema específico, usando como critério a reputação do periódico e medindo o grau de atração deste. A lei de Zipf tem o intuito de estimar temas mais recorrentes nas publicações, correlatos a um campo do conhecimento, tendo como critério uma lista de temas e usando como medida a frequência das palavras-chave selecionadas (CHUEKE; AMATUCCI, 2015; SANTOS; KOBASHI, 2009). A de Zipf é a que melhor se encaixa na metodologia e objetivos

da presente dissertação, em que será observada a frequência dos termos selecionados para analisar as características das publicações relacionadas à indústria 4.0.

Os indicadores podem ser divididos em quatro instrumentos de avaliação: (1) indicadores de qualidade científica são baseados nas opiniões de pesquisadores que avaliam o conteúdo das publicações; (2) indicadores de atividade científica, que permitem o levantamento do número de publicações e a distribuição entre as áreas, instituições, autores, o nível de produtividade destas, a distribuição das referências, dentre outras características que podem ser observadas; (3) indicadores de impacto científico podem ser divididos em impacto dos trabalhos e impactos das fontes: o primeiro considera o número de citações e o segundo diz respeito ao fator de impacto das revistas e o índice de citações imediatas; (4) indicadores de associações temáticas medem o nível de correlação entre temas de diferentes publicações, isso através de citações, referências, dentre outras formas (SANCHO, 2002 apud LOPES *et al.*, 2012).

São vários os indicadores utilizados para o cálculo de impacto, como o Fator de Impacto, o H-index, o Eigenfactor Metrics e SCImago Journal Rank (SJR). Para tais cálculos, são utilizadas as bases de dados que contêm ampla gama de informações sobre publicações em diversas áreas. Algumas das principais ferramentas bibliométricas são as bases de dados Web of Science e Scopus.

A Web of Science (WoS), anteriormente conhecida como Web of Knowledge, da Thomson Reuters, uma ampla base de dados multidisciplinar que permite o cálculo de diversos indicadores bibliométricos, foi desenvolvida na década de 1950. Possui diversas vantagens, como a cobertura temporal, que vai desde 1900 até os dias atuais para algumas revistas e inclui anais de eventos e monografias. Algumas de suas desvantagens são a pouca cobertura de acesso aberto, falta de padronização de autores, instituições e filiações, além de privilegiar conteúdo anglo-saxão (LOPES *et al.*, 2012).

A Scopus tem como principal intuito a pesquisa por autor e assunto. Indexa mais de 22.800 títulos de mais de 5.000 revistas, que faz com que esta seja a maior base de dados de resumos e referências bibliográficas de literatura científica revisada por pares. Possui forte cobertura sobre as revistas de ciência e tecnologia. A base tem ferramentas especiais para a identificação de autores e assunto que aumenta a eficiência desse instrumento, gera automaticamente o H-índice. Ademais, possui mais conteúdos europeus que o WoS, mais idiomas além do inglês e a maior parte de seu conteúdo é externo aos Estados Unidos. Dentre

as desvantagens, estão a cobertura temporal, pois não é tão extensa, problemas no cálculo do H-índice antes de 1996 (ELSEVIER, 2017; FALAGAS *et al.*, 2008; LOPES *et al.*, 2012).

Para a elaboração desta dissertação, a base de dados escolhida foi a Scopus, para o levantamento dos dados e posterior criação de indicadores de atividade científica. Justifica-se a seleção desta base de dados para a pesquisa proposta em virtude de: (1) o período a ser analisado é recente (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.

Por ser um tema atual, que engloba tecnologias recentes e possui predominância nas áreas das engenharias e ciências exatas, a base Scopus é a que melhor se adéqua para a pesquisa. As palavras-chave utilizadas na pesquisa serão escolhidas a partir da identificação das principais tecnologias e características base do processo da indústria 4.0, conforme autores e instituições que trabalham o tema.

Apesar da relevância da análise bibliométrica, é uma metodologia que apresenta algumas limitações, como, por exemplo, o indicador da quantidade de produção oferecer valores absolutos, porém sem tratar da qualidade dos trabalhos realizados. Há dificuldades também de comparar áreas temáticas, pois, de acordo com estas, ocorrerão diferentes níveis de produtividade e hábitos de publicação. Dentro de uma mesma área, pode haver distintas disciplinas que apresentam distintos modelos de publicações (SILVA; BIANCHI, 2001).

2.1.2 Base de dados Scopus

A Scopus foi lançada em novembro de 2004. Com o passar dos anos, vem expandindo sua base de dados e as ferramentas de pesquisa disponíveis. Até agosto de 2017, possuía indexados 22.800 títulos; destes, 31% das publicações advindas das ciências sociais; 27% das ciências físicas; 26% das ciências da saúde; e 17% das ciências biológicas. A base indexa publicações que possuem ISSN (*International Standard Serial Number*), como periódicos, periódicos comerciais, livros e materiais de conferências. Há exceções pontuais quanto a artigos de conferências que são inclusos por métodos diferentes na Scopus. Os periódicos são a grande maioria das publicações indexadas à base (ELSEVIER, 2017).

Dentre os mecanismos de busca, o que se utilizou para a captação dos dados na presente dissertação foram termos (conceitos e tecnologias) considerados importantes para o entendimento da indústria 4.0, inseridos no mecanismo de busca no idioma inglês, que é

utilizado pela Scopus para a pesquisa nos títulos (*article titles*), resumos (*abstracts*) e nas palavras-chave (*keywords*) das publicações.

Os termos são inseridos entre aspas (“”) para que os resultados apresentem publicações em que apareçam os vocábulos juntos e na sequência em que foram inseridos, incluindo as variações em singular e plural. Símbolos, como o hífen, a saber, não afetam os resultados nessa forma de busca, assim como a pesquisa com as letras em maiúsculo ou minúsculo. Por exemplo, o termo “sistema ciberfísico” será buscado em inglês através do termo “*cyber-physical system*”, que retornará como resultado as publicações que contenham na ordem inserida as palavras no título, resumo e/ou palavras-chave. Os resultados apresentam publicações que podem conter o termo “*cyber-physical system*”, “*cyber physical system*”, “*cyber-physical systems*”, “*cyber physical systems*”. A busca, no entanto, não é feita por publicações que contenham “*cyberphysical system*”, sendo necessário, assim, outra pesquisa à parte. Esse é um termo que exemplifica a utilização do hífen, do espaço e do singular ou plural.

Além da pesquisa através de um determinado conceito ou tecnologia, buscou-se também realizar a partir da junção de mais de um termo, para que, assim, perceba-se o número total de publicações que englobam determinadas palavras-chave e que possuem características em comum e ao todo para que se verifiquem as frequências gerais dos termos escolhidos como representativos da indústria 4.0. Para a busca em conjunto, o termo foi inserido entre aspas e entre estes “*or*” a fim de que os resultados retornassem às publicações que tivessem um e/ou outro termo inserido. Por exemplo, os termos a seguir foram também pesquisados em conjunto por representarem denominações na literatura quanto ao processo atual de mudanças inovativas (“*advanced manufacturing*” *or* “*industry 4.0*” *or* “*fourth industrial revolution*” *or* “*industrial internet*” *or* “*integrated industry*” *or* “*smart industry*” *or* “*smart manufacturing*”), retornando a todas as publicações que contenham ao menos um desses termos em seu *abstract*, título ou palavras-chave.

Os resultados da pesquisa disponibilizados pela base de dados são divididos em treze parâmetros: o tipo de acesso, que divide em aberto e “outros”; ano da publicação; nome do autor; área de estudo; tipo do documento; estágio da publicação, e se já foi feita ou não a publicação oficial; título da fonte de origem da publicação; as frequências de palavras-chave que aparecem nos resultados; instituição a que os autores são afiliados; fundação patrocinadora; país/território de origem das instituições em que os autores são filiados; tipo da fonte da publicação; e, por fim, o idioma da publicação.

Para a presente dissertação, os parâmetros levantados para a análise bibliométrica foram: o ano da publicação, para que se pudesse perceber quando surgiram publicações que contivessem os termos escolhidos e como se dá a evolução da frequência de publicações que as contenham; área de estudo, para identificar as áreas que mais têm participação na indústria 4.0; os países de origem, para verificar quais estão mais avançados nas pesquisas no tema; e, por fim, as fontes de financiamento. Com relação aos anos, foi feito o levantamento dos dados até 2018 com foco a partir do ano 2010, quando o número de publicações, na maioria dos termos, passa a ter um crescimento acelerado. As publicações científicas podem conter mais de uma área de estudo, mais de um país e mais de uma fonte de financiamento, o que faz com que os valores em porcentagem em relação ao todo, quando somados, possam resultar em mais de cem por cento.

As áreas de estudo em que a Scopus divide as publicações são baseadas nas classificações da *All Science Journal Classification Codes* (ASJC), que são escolhidas manualmente quando uma publicação é submetida para a Scopus, sendo que a área será a mesma que foi designada na revista em que foi publicada (ELSEVIER, 2019). Os países/territórios que resultam da pesquisa na base de dados são referentes à nacionalidade das instituições dos autores da publicação. É relevante entender quais as fontes de financiamento das publicações por permitir observar quais as instituições que fomentam a pesquisa em determinada área, observando se estas são instituições governamentais, universidades ou empresas.

O financiamento também é inserido pelo autor e é referente à instituição que o financia para a elaboração da publicação. Das fontes de financiamento das publicações, a maioria consta na base de dados em uma categoria denominada “indefinido”, ou seja, não há uma instituição ou empresa vinculada à publicação. Para os propósitos do presente trabalho, na classificação dos patrocinadores que mais possuem publicações, é desconsiderada a categoria “indefinido”. As porcentagens apresentadas nas tabelas relacionadas ao financiamento são em relação ao número total de publicações que possuem financiamento, excluindo, assim, as que são inseridas com a fonte de financiamento “indefinido”.

No decorrer das próximas seções e capítulo desta dissertação, são feitas discussões sobre indústria 4.0 e as tecnologias que caracterizam esse processo com base em autores e instituições que trabalham com o tema. São três as próximas seções deste capítulo: (i) é apresentado o conceito de indústria 4.0 e discutidos os outros termos utilizados para denominar o processo representado pelas novas tecnologias englobadas pela indústria; (ii) são

expostas tecnologias base da indústria 4.0 e suas características de acordo com o artigo “*Design principles for industrie 4.0 scenarios: a literature review*” de Hermann, Pentek, Otto (2015); (iii) são discutidas as áreas tecnológicas mais promissoras para os próximos anos, de acordo o estudo do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) “*Trends in Advanced Manufacturing Technology Innovation*”, de De Weck *et al.* (2014). Conforme o exposto, foram selecionadas palavras-chave para a busca na base de dados Scopus de publicações que contêm os termos para a análise bibliométrica, podendo ser dividida cada seção em uma categoria, como mostrado no quadro abaixo. No terceiro capítulo, são trabalhadas as tecnologias consideradas componentes da indústria 4.0 para a OCDE, na primeira seção; e para o Projeto Indústria 2027, uma iniciativa da Coordenação Nacional da Indústria (CNI), na segunda seção, sendo escolhidas tecnologias com base no que é trabalhado para a análise bibliométrica.

O quadro 1 apresenta os termos que, no decorrer da dissertação, foram selecionados para o levantamento na base de dados Scopus e análise bibliométrica. Os termos são apresentados divididos em categorias, como mostrado no parágrafo anterior. Tais termos, no geral, aparecem em português primeiramente e depois entre parênteses, já que foram buscados na base de dados Scopus. Alguns não possuem tradução para o português e, por isso, aparecem entre aspas e sem tradução. Foram pesquisados conforme aparecem no quadro, com o termo em inglês entre aspas, a exemplo de “*blockchain*”. Foram pesquisados um total de 42, alguns destes com mais de um termo na Scopus por abrangerem a mesma tecnologia ou conceito, tal qual “sistemas ciber-físicos” que, no inglês, aparece nas publicações em duas formas “*cyber-physical systems*” e “*cyberphysical systems*”.

Quadro 1 - 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 BASE	Internet das coisas (“ <i>internet of things</i> ”), internet dos serviços (“ <i>internet of services</i> ”), sistemas ciber-físicos (“ <i>cyber-physical systems</i> ” or “ <i>cyberphysical systems</i> ”), fábrica inteligente (“ <i>smart factory</i> ”).
ÁREAS TECNOLÓGICAS	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> ”).
OCDE	“ <i>Big data</i> ”, 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> ”), simulações* (“ <i>simulations</i> ”), sistemas autônomos (“ <i>autonomous systems</i> ”).
PROJETO I2027	“ <i>Blockchain</i> ”, “ <i>crispr/cas9</i> ”, “ <i>deep learning</i> ”, “ <i>dna microarrays</i> ”, “ <i>machine learning</i> ”, “ <i>quantum key distribution</i> ”, materiais autorreparáveis (“ <i>self healing materials or functional materials</i> ”), materiais de alto desempenho (“ <i>high performance materials</i> ”), materiais de valor agregado (“ <i>value-added materials</i> ”), medicina de precisão (“ <i>precision medicine</i> ”), nanoeletrônica (“ <i>nanoelectronics</i> ”), nanomateriais (“ <i>nanomaterials</i> ”), nanomedicina (“ <i>nanomedicine</i> ”), robótica autônoma (“ <i>autonomous robotics</i> ”), robótica colaborativa (“ <i>collaborative robots</i> ” or “ <i>collaborative robotics</i> ”).

*O termo “simulações” não foi exposto na pesquisa por possuir valores muito superiores que os demais e englobar temas que fogem ao escopo da indústria 4.0.

Fonte: Elaboração própria.

Os termos dentro de suas divisões apresentadas no quadro também foram pesquisados em conjunto para mensurar as publicações científicas que contêm ao menos um dos termos selecionados. Essa forma foi utilizada na categoria “OCDE”, excluindo o termo “simulações” devido a este apresentar uma frequência muito superior aos demais e abranger temas divergentes à indústria 4.0. Não foram pesquisados em conjunto os termos da divisão “Projeto

I2027” devido a estes serem divididos em diversos *clusters*, com número de tecnologias representativas bastante diversos.

O termo “indústria 4.0” se tornou publicamente conhecido em 2011 com a divulgação de uma iniciativa na Alemanha (intitulada “*Industrie 4.0*”, indústria 4.0 em alemão) que reuniam empresários, políticos e membros de universidades, com o intuito de analisar e propor medidas para fortalecer a competitividade da manufatura alemã (KAGERMANN; LUKAS; WAHLSTER, 2011 apud HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015). A partir de então, o governo alemão passou a apoiar e incorporou o conceito em seu planejamento governamental, que era o “*High-Tech Strategy 2020 for Germany*”.

Outros termos surgiram para referir-se ao processo que envolve a indústria 4.0. Nos Estados Unidos da América (EUA), o termo mais utilizado é “*advanced manufacturing*” (manufatura avançada em inglês). Mas são utilizados termos similares como “indústria integrada”, “indústria inteligente” e “manufatura inteligente” (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015). No entanto, os termos “indústria 4.0” e “manufatura avançada” são as principais referências nas novas aplicações para a manufatura. Apesar disso, o emprego das tecnologias fruto das mudanças inovativas atribuídas à “indústria 4.0” vem ocorrendo em diversas áreas, ultrapassando limites para além da manufatura.

2.2 O que é indústria 4.0

O conceito de “manufatura avançada” ou “indústria 4.0” é trabalhado no estudo apresentado no artigo “*Trends in Advanced Manufacturing Technology Innovation*”, De Weck *et al.* (2014), elaborado pelos pesquisadores norte-americanos De Weck, Reed, Sarma e Schmidt. Neste trabalho, este conceito é tido como um conjunto de soluções integradas que resulta em bens físicos que possuem conexões com softwares e serviços, utilizando-se destas para a produção de materiais personalizados e processos que possuem uma eficiência muito maior do que os usados atualmente. Esse estudo será abordado mais adiante com detalhes.

Advanced Manufacturing is the creation of integrated solutions that require the production of physical artifacts coupled with valued-added services and software, while exploiting custom-designed and recycled materials and using ultra-efficient processes (DE WECK *et al.* 2014, p. 26).

O termo “quarta revolução industrial” faz referência a um processo que engloba mudanças produtivas que tendem a alterar bruscamente modos de produção e interação entre

os agentes econômicos. Como ocorreram nas revoluções industriais passadas: a primeira revolução, com a máquina a vapor no século XVIII; a segunda revolução, que se baseou na eletricidade, na década de 1870; e a terceira, baseada na eletrônica e nos processos de automação. A quarta revolução surge com os avanços tecnológicos da digitalização e informação (OCDE, 2017).

As “megatendências” relacionadas à indústria 4.0, denominada de “quarta revolução industrial” por alguns autores, podem ser amplamente agrupadas em tecnologias físicas, digitais e biológicas. Todas estão interligadas por possuir como base principal as tecnologias digitais. Dentre as físicas, estão veículos autônomos, que são capazes de captar estímulos do ambiente e realizar funções de acordo, impressão 3D ou manufatura aditiva, robótica avançada e novos materiais. As digitais estão relacionadas a sensores, à internet das coisas (*Internet Of Things – IOT*), *big data* e à tecnologia *blockchain*. As inovações na área biológica se dão principalmente na genética através de computadores cada vez mais potentes. A construção genética ocorre não mais por tentativa e erro, mas através de modelos digitais (SCHWAB, 2016).

A manufatura aditiva permite que, através da digitalização de modelos, seja feita a impressão de produtos diversos, o que permite a criação de bens com formas geométricas diversas. Assim, há uma flexibilização da linha de produção que possibilita a customização em massa. Em robótica avançada, existem máquinas e equipamentos capazes de se adaptarem a atividades programadas, utilizando inteligência artificial para tal, com conexão remota e comunicação integrada entre si, o que leva ao aumento da produtividade e automação e à diminuição de falhas na produção (CNI, 2017).

Com os avanços tecnológicos, novos materiais estão sendo criados, materiais baseados principalmente na nanotecnologia, capazes de se regenerar, auto limpar-se, metais capazes de retornar a sua forma originais, dentre outros. Nanomateriais, como o grafeno (uma forma cristalina do carbono, duzentas vezes mais resistente do que o aço e eficiente condutor de calor e eletricidade), atualmente não têm um preço de produção competitivo. Todavia, com os avanços tecnológicos, nanomateriais como este podem vir a se viabilizar economicamente. 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 registram informações a partir de estímulos, como movimentos, luminosidade, dentre outros, e agem com atuadores que geram uma ação com base nesses estímulos. Tais sensores permitem que as máquinas obtenham informações úteis e

transmitam entre si. Esses dados recolhidos são armazenados e tratados na central composta pela tecnologia big data, interligada à computação em nuvem, que, em linhas gerais, é uma infraestrutura de armazenamento de dados bastante superior quanto à capacidade e desempenho se comparado com os métodos atuais. A transmissão dessas informações é realizada com base nas IoT, que permitem a conexão de equipamentos à internet e, desse modo, viabiliza a troca de dados entre si (CNI, 2017).

Em combinação com a robótica avançada, esse conjunto de informações pode permitir a interligação entre componentes físicos e virtuais que geram os sistemas ciber-físicos. Aumentam a capacidade de captar e trocar informações, acarretando em uma eficiência maior não somente da produção, mas também aumenta o *feedback* do “chão de fábrica”, o que permite 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 entre as plantas da empresa. Com o maior controle do que é produzido e vendido, é expandida 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. Diversas doenças incuráveis estão ligadas a fatores genéticos. Com a expansão da eficácia de identificação e mapeamento dos genes, tem-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 e atender a interesses específicos (VASCONCELOS; FIGUEIREDO, 2015).

Percebe-se que há um elevado grau de amplitude da influência das tecnologias que englobam o processo da indústria 4.0, permitindo impactos para bem além da manufatura, influenciando outros setores da sociedade. Conseqüentemente, afeta também os modos de gestão, produção e interação entre produtor e consumidor, porque são capazes de dinamizar não somente a produtividade de uma indústria, mas também a adequação da produção às características de mercado e maior velocidade quanto ao processo de desenvolvimento de novos produtos e processos.

Por ser um processo ainda em andamento, observa-se que os impactos das tecnologias e processos da indústria 4.0 ainda se encontram bastante no nível da previsão. Isso faz com que haja um grau maior de complexidade para afirmar se esse processo constitui-se ou não em uma “nova revolução industrial”. Apesar dessa questão, já são notáveis as potencialidades de impacto na sociedade que as tecnologias possuem (constitua ou não uma “revolução industrial”), e destacam-se também os esforços estratégicos empregados por países na área das tecnologias da indústria 4.0.

Os avanços na tecnologia da digitalização estão permitindo que cada vez mais se expandam as suas funções em atividades realizadas por empresas e pessoas. O desenvolvimento dessas tecnologias permite aplicações na resolução de problemas de vários setores, como de mobilidade urbana, saúde e produtividade industrial (CNI, 2016). 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 uma maior produtividade, maior interligação entre as áreas de produção e que, em alguns casos, podem gerar novos produtos e serviços (OCDE, 2017).

2.2.1 Análise bibliométrica dos termos conceituais

O Quadro 2 mostra as frequências dos termos apresentados acima. A expressão “Indústria 4.0” foi a que apresentou maior frequência, com um número de 7.187. Apesar de ter surgido somente em 2011, ele já aparece nas publicações de 2012. Apesar do termo constar de publicações desde 1966, a “manufatura avançada” ocupa a segunda posição com 4.806 citações. Quando se consideram os anos de 2016 a 2018, percebe-se que, com exceção de “indústria integrada”, todos possuem elevado crescimento, especialmente “indústria 4.0”, que apresentou valores bastante superiores aos demais. Quando se consideram todas as publicações que possuam ao menos um dos termos selecionados, o total é 15.378.

Quadro 2 - Números de publicações que contêm os termos conceituais representativos por ano (2010-2018)

Termo	Indústria 4.0	Manufatura Avançada	Industrial Internet	Quarta Revolução Industrial
Publicações	7.187	4.806	1.849	1.371
2010	-	159	-	-
2011	-	189	5	1
2012	2	169	-	1
2013	31	223	10	8
2014	92	207	25	10
2015	208	229	92	22
2016	544	252	204	87
2017	1.133	312	293	224
2018	2.118	500	590	448
Termo	Indústria Integrada	Indústria Inteligente	Manufatura Inteligente	Ao menos um
Publicações	174	175	1.506	15.378
2010	9	-	2	170
2011	8	1	3	207
2012	4	1	9	184
2013	9	3	10	289
2014	10	5	42	379
2015	9	4	79	593
2016	4	21	137	1.117
2017	10	30	223	1.941
2018	8	60	407	3.532

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

O Quadro 3 mostra os conceitos e as respectivas áreas de estudo de todas as publicações contempladas na base Scopus, em valores absolutos (o número de publicações que apresentam determinada área de estudo) e sua participação relativa ao total. Ressalta-se que os valores maiores do que cem por cento podem ocorrer, porque uma publicação pode pertencer a mais de uma área de estudo. Observa-se que, no geral, as “engenharias” são áreas de estudo em 65% de todas as publicações que contenham ao menos um dos termos; seguida, por “ciência da computação” (47%). Como os termos estão bastante voltados para a indústria e manufatura, é de se esperar uma forte participação das engenharias. Ademais, como o novo conjunto de mudanças inovativas está bastante centrado na digitalização, a participação da ciência da computação é fundamental para esses desenvolvimentos. Para a criação e programação de algoritmos, faz-se necessária a Matemática, área de estudo que aparece na quarta posição em publicações que contêm ao menos uma ocorrência dos conceitos.

Outras áreas de estudo que se destacam são “negócios, gestão e contabilidade” e “ciências da decisão”, áreas voltadas para a gestão empresarial. 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. Percebe-se a relação dos termos para além de mudanças produtivas, alcançando também estudos quanto ao aprimoramento da gestão dos negócios.

Quadro 3 - Números de publicações que contêm os termos conceituais representativos por área de estudo

	Indústria 4.0	7.187		Manufatura Avançada	4.806	
1º	Engenharias	4.481	62%	Engenharias	3.606	75%
2º	Ciência da Computação	3.907	54%	Ciência da Computação	1.414	29%
3º	Matemática	1.156	16%	Negócios, Gestão e Contabilidade	903	19%
4º	Negócios, Gestão e Contabilidade	1.053	15%	Ciência de materiais	752	16%
5º	Ciências da decisão	992	14%	Matemática	456	9%
	Quarta Revolução Industrial	1.371		Indústria Integrada	174	
1º	Engenharias	669	49%	Engenharias	66	38%
2º	Ciência da Computação	607	44%	Negócios, Gestão e Contabilidade	45	26%
3º	Negócios, Gestão e Contabilidade	276	20%	Economia, Econometria e Finanças	33	19%
4º	Ciências Sociais	264	19%	Ciências Sociais	25	14%
5º	Ciências da decisão	180	13%	Energia	18	10%
	Industrial Internet	1.849		Indústria Inteligente	175	
1º	Ciência da Computação	1.233	67%	Ciência da Computação	112	64%
2º	Engenharias	1.132	61%	Engenharias	106	61%
3º	Matemática	219	12%	Negócios, Gestão e Contabilidade	24	14%
4º	Ciências da decisão	171	9%	Física e Astronomia	24	14%
5º	Física e Astronomia	160	9%	Ciências da decisão	18	10%
	Manufatura Inteligente	1.506		Ao menos um	15.378	
1º	Engenharias	1.066	71%	Engenharias	10.053	65%
2º	Ciência da Computação	889	59%	Ciência da Computação	7.208	47%
3º	Matemática	206	14%	Negócios, Gestão e Contabilidade	2.299	15%
4º	Ciências da decisão	187	12%	Matemática	1.958	13%
5º	Negócios, Gestão e Contabilidade	149	10%	Ciência de materiais	1.758	11%

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

Quando se consideram os termos que apresentam maiores frequências nas publicações por país, a Alemanha destaca-se com o termo “indústria 4.0” e os EUA com “manufatura avançada”. A China também se destaca, aparecendo entre os três primeiros em seis dos sete termos conceituais selecionados vide, Quadro 4. Nenhum dos países aparecem entre os cinco primeiros em todos os conceitos selecionados; apesar de aparecer em vários, os EUA não

aparecem no termo “indústria inteligente” nem a Alemanha no termo “manufatura avançada”. Os cinco que possuem maiores frequências em publicações que contenham ao menos um dos termos implementam estratégias nacionais voltadas especificamente para o desenvolvimento da indústria 4.0, os EUA, Alemanha, China, Itália e Reino Unido.

Nos EUA, são encontradas estratégias no “*Report to the president on ensuring american leadership in advanced manufacturing*” de 2011, elaborado pelo Conselho Consultivo do Presidente em Ciência e Tecnologia (PCAST, 2011). Na Alemanha, há o “*High-Tech Strategy 2020 for Germany*”, BMBF (2010), que posteriormente incorporou o termo indústria 4.0. Na China, há o “*Made in China 2025*”, de 2015. Em 2017, a Itália lançou um plano nacional para a indústria 4.0 (EC, 2019). Também em 2017, o Reino Unido publicou a “*Industrial strategy: Building a Britain fit for the future*” do “*Department for Business, Energy & Industrial Strategy - BEIS*” (BEIS, 2017).

Assim, quando levantados os dados bibliométricos relativos aos conceitos, pode-se perceber uma relação entre a implantação de políticas voltadas para a indústria 4.0 e o desempenho quanto às frequências de publicações que contêm as expressões. Os EUA, como mostrado no Capítulo 1, foi o país que atuou como principal vetor de geração da Terceira Revolução Industrial, o que implica em um *know-how* relativo a diversas tecnologias e criando um ambiente propício à P&D, pois as mudanças da terceira revolução estão bastante ligadas à pesquisa científica.

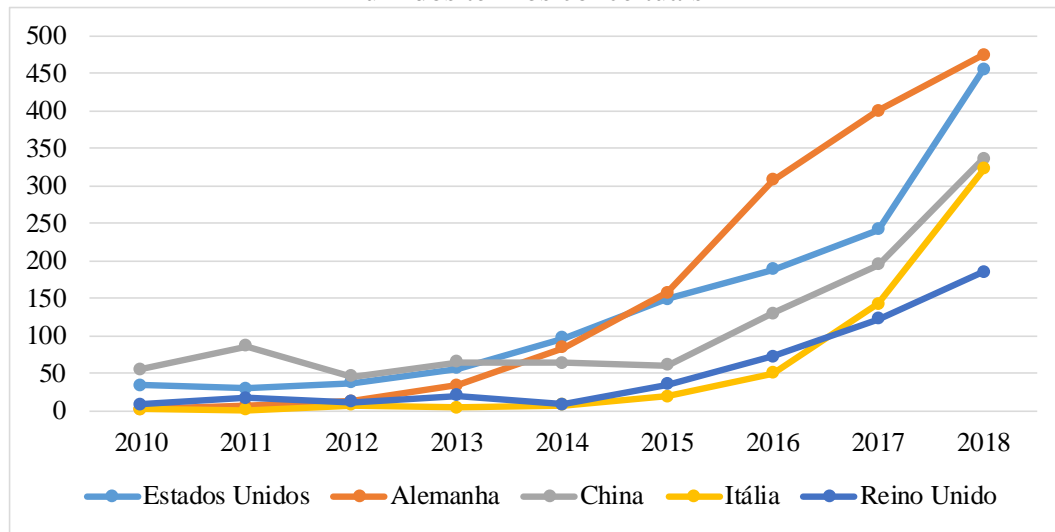
Quadro 4 - Números de publicações que contêm os termos conceituais representativos por país

	Indústria 4.0	7.187		Manufatura Avançada	4.806
1º	Alemanha	1.467	20%	Estados Unidos	1.320 27%
2º	Itália	747	10%	China	818 17%
3º	China	443	6%	Reino Unido	449 9%
4º	Estados Unidos	409	6%	Índia	189 4%
5º	Reino Unido	358	5%	Malásia	180 4%
	Quarta Revolução Industrial	1.371		Indústria Integrada	174
1º	Coreia do Sul	200	15%	Estados Unidos	46 26%
2º	Alemanha	165	12%	China	17 10%
3º	Itália	118	9%	Reino Unido	17 10%
4º	Rússia	97	7%	Alemanha	12 7%
5º	Estados Unidos	82	6%	Taiwan	7 4%
	Industrial Internet	1.849		Indústria Inteligente	175
1º	China	363	20%	Índia	23 13%
2º	Estados Unidos	326	18%	Alemanha	22 13%
3º	Alemanha	260	14%	China	19 11%
4º	Itália	114	6%	Itália	12 7%
5º	Reino Unido	95	5%	Coreia do Sul	12 7%
	Manufatura Inteligente	1.506		Ao menos um	15.378
1º	Estados Unidos	376	25%	Estados Unidos	2.399 16%
2º	China	262	17%	Alemanha	1.983 13%
3º	Coreia do Sul	165	11%	China	1.772 12%
4º	Alemanha	114	8%	Itália	993 6%
5º	Itália	101	7%	Reino Unido	983 6%

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

O gráfico 1 mostra a evolução do número de publicações que contêm ao menos um dos termos selecionados, no período 2010 a 2018, nos países que apresentaram as maiores frequências de publicações que contêm os conceitos selecionados. Percebe-se que há uma aceleração no avanço da frequência dos termos em todos os países a partir de 2015. Destaca-se também o comportamento da Alemanha, que se inicia em 2013, ano posterior à publicação da iniciativa “*Industrie 4.0*”. A partir de 2015, a Alemanha passa a superar os EUA, mas a diferença é reduzida consideravelmente em 2018. A China aumenta a frequência das publicações a partir de 2015, ano em que foi anunciada a estratégia nacional para a manufatura com ênfase nas tecnologias da indústria 4.0, o plano “*Made in china 2025*”, também conhecido como “*China Manufactured 2025*”. No ano de 2016, o Ministério do Desenvolvimento Econômico da Itália publicou um plano nacional para a indústria 4.0, período de aceleração dos números do país.

Gráfico 1 - Comparação entre os países que mais possuem publicações que contêm ao menos um dos termos conceituais



Fonte: Scopus. Elaboração própria.

Como exposto na seção 2.1, a maioria das fontes de financiamento das publicações aparece como “indefinido”. Para os propósitos do presente trabalho, o Quadro 5 desconsidera para a classificação “indefinido” e apresenta as frequências relacionadas às publicações que possuem fontes de financiamento e contêm os termos selecionados. A porcentagem apresentada no quadro é relativa ao número de publicações que possuem financiamento e que contêm a expressão selecionada. Percebe-se que, dentre os cinco patrocinadores que mais possuem publicações financiadas, não há empresas. A “*National Natural Science Foundation of China*” (NSFC) possui o maior número de publicações nos termos de maior frequência, que são “indústria 4.0” e “manufatura avançada”; e também quando considerado ao menos um dos termos. É uma instituição ligada ao Estado chinês, com a tarefa de administrar o Fundo Nacional de Ciências Naturais do Governo Central (NFSC, 2019). Percebe-se o esforço chinês quanto à pesquisa que contém os conceitos selecionados. Vale ressaltar que o sistema de mercado chinês é marcado pela forte presença do Estado.

Em segundo lugar, no que se refere ao número de instituições financiadoras, aparece a “*European Commission*”, que acompanha a execução e gera o orçamento da União Europeia (UE). Em terceiro, tem-se a “*National Science Foundation*”, uma instituição norte-americana de fomento à pesquisa e à educação. A seguir, vem o Ministério Federal de Educação e Pesquisa (*Bundesministerium für Bildung und Forschung – BMBF*), da Alemanha; e, por fim,

há a “*European Regional Development Fund*” (ERDF), que é outra instituição governamental de investimento da UE.

Quadro 5 - Números de publicações que contêm os termos conceituais representativos por fontes de financiamento

Indústria 4.0		1.827		Manufatura Avançada		769	
1º	National Natural Science Foundation of China	157	9%	National Natural Science Foundation of China	151	20%	
2º	European Commission	152	8%	National Science Foundation	87	11%	
3º	Bundesministerium für Bildung und Forschung	99	5%	Universiti Teknikal Malaysia Melaka	70	9%	
4º	European Regional Development Fund	89	5%	Engineering and Physical Sciences Research Council	32	4%	
5º	Fundação para a Ciência e a Tecnologia	61	3%	U.S. Department of Energy	28	4%	
Quarta Revolução Industrial		335		Indústria Integrada		17	
1º	National Research Foundation of Korea	41	12%	European Commission	2	12%	
2º	European Commission	23	7%	National Basic Research Program of China	2	12%	
3º	Ministry of Science ICT and Future Planning	23	7%	*	1	6%	
4º	Ministry of Education	19	6%	*	1	6%	
5º	Bundesministerium für Bildung und Forschung	14	4%	*	1	6%	
Industrial Internet		618		Indústria Inteligente		33	
1º	National Natural Science Foundation of China	177	29%	European Commission	5	15%	
2º	Fundamental Research Funds for the Central Universities	42	7%	National Research Foundation of Korea	4	12%	
3º	National Basic Research Program of China	33	5%	National Natural Science Foundation of China	3	9%	
4º	National Research Foundation of Korea	29	5%	Horizon 2020	2	6%	
5º	European Commission	27	4%	Ministry of Science and Technology, Taiwan	2	6%	
Manufatura Inteligente		449		Ao menos um		3.571	
1º	National Natural Science Foundation of China	119	27%	National Natural Science Foundation of China	549	15%	
2º	National Science Foundation	26	6%	European Commission	205	6%	
3º	National Basic Research Program of China	24	5%	National Science Foundation	138	4%	
4º	European Commission	22	5%	Bundesministerium für Bildung und Forschung	124	3%	
5º	National Research Foundation of Korea	19	4%	European Regional Development Fund	123	3%	

*Instituições empatadas com uma única publicação.

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

2.3 Análise bibliométrica das tecnologias básicas e das suas características

Em 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 decorrentes exclusivamente da indústria 4.0, pois foram habilitadas nas “revoluções” anteriores, como, por exemplo, os produtos inteligentes, a comunicação máquina para máquina (M2M), *big data* e a computação em nuvem. Entretanto, essas tecnologias são habilitadoras da indústria 4.0. A partir dos quatro conjuntos de tecnologias e conceitos ligados à organização das cadeias de valor, tem-se seis características básicas da indústria 4.0:

interoperabilidade, virtualização, descentralização, capacidade de adaptação em tempo real, orientação de serviço e modularidade (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015).

Quadro 6 - Principais características das tecnologias envolvidas na indústria 4.0

	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, criação de um ambiente virtual, gerando capacidade de 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 no 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, geram uma nova dinâmica de agregação de valor e de distribuição (FIRJAN, 2016; HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015).

Fábrica inteligente faz referência a um novo tipo de indústria “mais inteligente” do que a do passado e é um dos fatores-chave para a indústria 4.0, em que são aplicadas as tecnologias acima citadas e permite-se que haja uma interação entre as pessoas e máquinas de forma que estas últimas auxiliem os trabalhadores. São “mais inteligentes” por possuírem sistemas que consideram a posição e o status dos bens e processos, dando uma maior precisão

de monitoramento e troca de informações quanto às necessidades da produção (FIRJAN, 2016; HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015).

Conforme exposto no Quadro 7, no decorrer de oito anos, o número de publicações que contêm o termo “sistemas ciber-físicos” teve o elevado crescimento de mais de 15 vezes, especialmente a partir do ano de 2014. A tecnologia base “internet dos serviços” é a que menos aparece em publicações e o único dentre os termos que apresentou valores menores em 2018 do que em 2010. O termo “internet das coisas” foi a tecnologia base de maior frequência em relação ao total das publicações no período selecionado, com um crescimento acelerado de 40 vezes de entre 2010 e 2018.

Apesar de haver publicações pontuais em anos anteriores, a evolução do número de publicações que contêm o termo “fábrica inteligente” deu-se de fato nos últimos anos. Essa expansão foi a maior dentre os termos analisados. Quando se consideram todas as publicações que contêm ao menos uma das tecnologias base selecionadas, pode-se perceber que houve um crescimento de mais de 30 vezes nessas publicações, confirmando que os termos (tecnologias) apontados estão sendo cada vez utilizados (pesquisadas).

Quadro 7 - Números de publicações que contêm os termos apontados como tecnologias base representativos por ano (2010-2018)

Termo	Sistemas Ciber-físicos	Internet dos Serviços	Fábrica Inteligente	Internet das Coisas	Ao menos um
Publicações	13.552	379	1.497	65.426	78.008
2010	179	60	7	397	629
2011	332	43	3	831	1.183
2012	517	33	13	1.285	1.831
2013	739	30	28	1.847	2.590
2014	903	30	25	2.813	3.679
2015	1.162	17	82	4.184	5.297
2016	1.662	29	151	7.454	8.969
2017	2.309	31	265	11.297	13.353
2018	2.804	21	445	16.675	19.153

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

A área “ciência da computação” apresenta elevada participação nos trabalhos científicos que contêm as tecnologias selecionadas, ocupando a primeira posição nos termos CPS, IoS, IoT e na pesquisa do conjunto. Este resultado é um indício de que as mudanças inovativas atuais na produção demandam softwares que se adequam às necessidades diversas

da indústria 4.0. Também há uma indicação de que se relaciona ao entendimento da literatura de que as mudanças inovativas atuais são baseadas na digitalização e a indústria 4.0 trata-se de um conjunto de transformações digitais. Em última instância, as mudanças industriais em curso têm forte base nas atividades de serviços.

As demais áreas científicas que mais se destacam são as “engenharias”, a “matemática” e “física e astronomia”. Além destas, dentre as áreas que aparecem a partir dos termos selecionados das tecnologias bases, tem-se “energia”, “negócios, gestão e contabilidade” e “ciências da decisão”, sendo que esta última aparece entre as cinco principais quando se consideram todos os termos em conjunto. Ciências da decisão são a aplicação de algoritmos, *machine learning*, inteligência artificial para análise de dados que permitem uma decisão que gere maiores benefícios. Isso mostra que as tecnologias base apresentadas por Hermann, Pentek, Otto (2015) possuem ênfase nas áreas científicas voltadas não apenas para o desenvolvimento de tecnologias, mas também para os estudos quanto ao aprimoramento da gestão dos negócios.

Quadro 8 - Números de publicações que contêm os termos apontados como tecnologias base representativos por área de estudo

Sistemas Ciber-físicos		13.552		Internet dos Serviços		379	
1º	Ciência da Computação	10.075	74%	Ciência da Computação	324	85%	
2º	Engenharias	6.891	51%	Matemática	88	23%	
3º	Matemática	3.007	22%	Engenharias	79	21%	
4º	Ciências da Decisão	879	6%	Ciências da Decisão	39	10%	
5º	Energia	785	6%	Negócios, Gestão e Contabilidade	24	6%	
Internet das Coisas		65.426		Fábrica Inteligente		1.497	
1º	Ciência da Computação	49.767	76%	Engenharias	930	62%	
2º	Engenharias	30.099	46%	Ciência da Computação	889	61%	
3º	Matemática	9.185	14%	Matemática	207	14%	
4º	Física e Astronomia	6.299	10%	Ciências da Decisão	190	14%	
5º	Ciências da Decisão	5.526	8%	Negócios, Gestão e Contabilidade	179	10%	
Ao menos um						78.008	
1º	Ciência da Computação				58.963	76%	
2º	Engenharia				36.493	47%	
3º	Matemática				12.037	15%	
4º	Física e Astronomia				6.786	9%	
5º	Ciências da decisão				6.297	8%	

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

Quando os termos são pesquisados em conjunto, a China ocupa a primeira posição, com 20% de todas as publicações, à frente dos EUA. Nesse país, a maior frequência de citações entre os quatro termos selecionados foi do termo IoT. Ressalte-se que, para o termo IoS, os EUA e a China não aparecem entre os cinco países com maior número de publicações. Nessa tecnologia, a Alemanha é o país que mais emprega o termo nas suas publicações, assim como acontece com “fábrica inteligente”. Porém, essas tecnologias possuem poucas publicações se comparadas com as demais. A IoT é uma das tecnologias fundamentais para que uma indústria se torne conectada. Dessa forma, a transição para modelos de manufatura com maior digitalização passa pela implantação do sistema IoT. A economia chinesa possui uma forte participação da indústria, o que explica em parte o forte interesse da China em pesquisas nessa tecnologia.

A Índia se destaca na terceira posição, tanto no termo IoT quanto na pesquisa dos termos em conjunto. O Ministério de Eletrônica e Tecnologia da Informação (MEITY) possui um programa para o desenvolvimento da IoT no país, uma proposta de política focada na capacitação e P&D (MEITY, 2015).

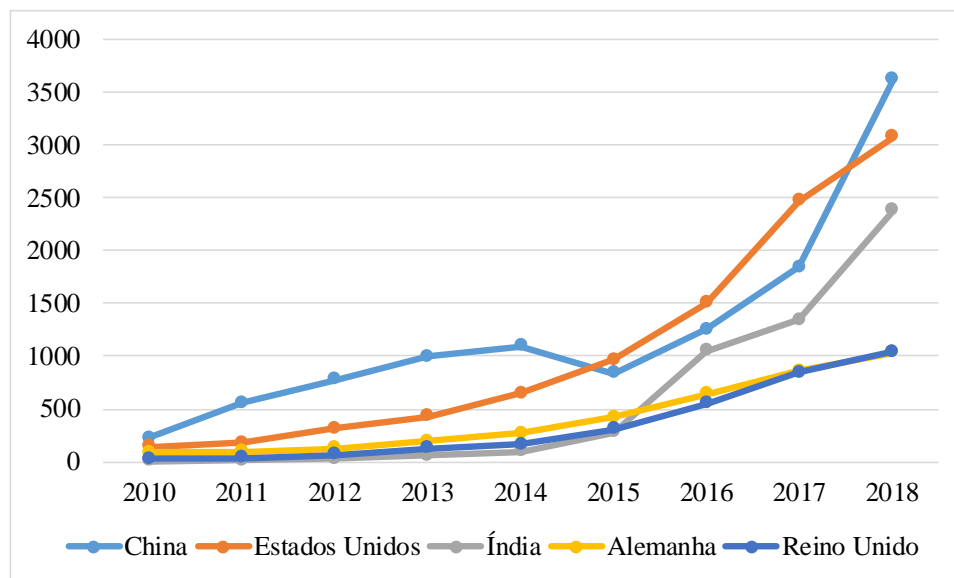
Quadro 9 - Números de publicações que contêm os termos apontados como tecnologias base representativos por país

	Sistemas Ciber-físicos	13.552		Internet dos Serviços	379	
1º	Estados Unidos	3.925	29%	Alemanha	131	35%
2º	China	2.346	17%	Itália	61	16%
3º	Alemanha	1.610	12%	Reino Unido	36	9%
4º	Itália	716	5%	Espanha	29	8%
5º	Reino Unido	636	5%	França	24	6%
	Internet das Coisas	65.426		Fábrica Inteligente	1.497	
1º	China	13.096	20%	Alemanha	318	21%
2º	Estados Unidos	9.328	14%	Coreia do Sul	213	14%
3º	Índia	8.077	12%	China	152	10%
4º	Reino Unido	3.796	6%	Itália	120	8%
5º	Coreia do Sul	3.540	5%	Estados Unidos	98	7%
Ao menos um					78.008	
1º	China				15.302	20%
2º	Estados Unidos				12.901	17%
3º	Índia				8.420	11%
4º	Alemanha				4.798	6%
5º	Reino Unido				4.321	6%

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

O Gráfico 2 mostra a evolução, entre os anos 2010 e 2018, do número de publicações que contêm ao menos um dos termos selecionados nos países de maior frequência; ou seja, engloba as tecnologias apontadas por Hermann, Pentek, Otto (2015) como essenciais para o avanço na indústria 4.0. Com o passar dos anos, há uma tendência geral de crescimento do número de publicações, em especial a partir de 2015. Há um destaque para a Índia, que acelera o número de publicações a partir de 2015, superando a Alemanha e o Reino Unido.

Gráfico 2 - Comparação entre os países que mais possuem publicações que contêm ao menos um dos termos apontados como tecnologias base



Fonte: Scopus. Elaboração própria.

Os dados referentes aos financiamentos das pesquisas que precederam as publicações com os termos selecionados mostram a atuação destacada da chinesa “*National Natural Science Foundation of China*” (NSFC), instituição que mais apoiou tais pesquisas. Ao se considerarem todos os termos em conjunto, percebe-se que a NSFC possui um número de publicações financiadas aproximadamente três vezes maior do que o segundo colocado, a instituição governamental norte-americana “*National Science Foundation*”. Além de IoT, nota-se o esforço chinês em investimentos relacionados a publicações na área dos termos apontados como tecnologias base da indústria 4.0, por Hermann, Pentek, Otto (2015).

Ainda quando se consideram todos os termos em conjunto, tem-se em terceira posição a “*National Research Foundation of Korea - NRF*”, uma instituição governamental sul-coreana. A instituição busca direcionar a pesquisa acadêmica básica e aplicada da nação,

liderando mudanças em ecossistemas de pesquisas voltadas para o futuro. Engloba diversas áreas do conhecimento e é uma facilitadora da interação entre universidades, institutos de pesquisa e pesquisadores (NRF, 2019).

Quadro 10 - Números de publicações que contêm os termos apontados como tecnologias base representativos por fontes de financiamento

	Sistemas Ciber-físicos	4.213		Internet dos Serviços	28
1º	National Natural Science Foundation of China	940	22%	European Commission*	6 21%
2º	National Science Foundation	659	16%	National Natural Science Foundation of China*	6 21%
3º	European Commission	161	4%	European Social Fund	5 18%
4º	Fundamental Research Funds for the Central Universities	145	3%	Bundesministerium für Bildung und Forschung*	2 7%
5º	National Basic Research Program of China (973 Program)	106	3%	European Regional Development Fund*	2 7%
	Internet das Coisas	17.958		Fábrica Inteligente	423
1º	National Natural Science Foundation of China	4.282	24%	National Natural Science Foundation of China	64 15%
2º	National Research Foundation of Korea	997	6%	National Research Foundation of Korea	48 11%
3º	National Science Foundation	961	5%	Ministry of Science ICT and Future Planning	38 9%
4º	Fundamental Research Funds for the Central Universities	784	4%	Ministry of Education	34 8%
5º	European Commission	667	4%	European Commission	20 5%
	Ao menos um				26.681
1º	National Natural Science Foundation of China				5.155 19%
2º	National Science Foundation				1.555 6%
3º	National Research Foundation of Korea				1.086 4%
4º	Fundamental Research Funds for the Central Universities				915 3%
5º	European Commission				798 3%

* Empatados em número de publicações financiadas, o que faz com que estejam na mesma classificação.
Fonte: Scopus. Elaboração própria.

Além das tecnologias base, Hermann, Pentek, Otto (2015) elencam algumas características comuns a esse conjunto de tecnologias. A interoperabilidade de forma ampla 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, está relacionado às capacidades das tecnologias anteriormente citadas de interagirem entre si e com as pessoas no decorrer do processo de produção.

A virtualização está ligada à capacidade de criar em sistemas virtuais, a partir dos dados recolhidos, os CPS, simulando comportamentos reais no ambiente virtual. Caso algo ocorra fora do padrão do processo, o erro será identificado em tempo real. Com a descentralização, os processos não precisam mais ser centralizados, dado que, a partir dos

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 ou 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 às demandas de imediato (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 desses módulos individuais, o que contribui para mudanças de produção decorrentes da sazonalidade e de alterações nos produtos (CLAUDIA, *et al.*, 2017).

Percebe-se, então, o importante papel da digitalização nas tecnologias base expostas, sendo a produção baseada nas tomadas de decisões advindas de dados captados, armazenados e transformados em modelos virtuais, que permitem o monitoramento e a tomada de decisões em tempo real, na planta, na distribuição e até mesmo na pós-venda dos produtos.

A utilização de sensores e tecnologias que captam o ambiente físico e criam modelos digitais tem suas bases no paradigma microeletrônico, como mostrado na subseção 1.2.3 desta dissertação que trata da Terceira Revolução Industrial. As bases da automação surgem nesse período, nos anos de 1980. Como foi mostrado no decorrer dessa seção, as tecnologias da indústria 4.0 permitem novos horizontes de produtividade e aplicações para além da manufatura, desempenhos maiores que há atualmente na indústria em geral, porém com bases no paradigma microeletrônico.

2.4 Áreas tecnológicas promissoras

O estudo “*Trends in Advanced Manufacturing Technology Innovation*”, de De Weck *et al.* (2014), apresenta 24 áreas tecnológicas importantes e promissoras para a manufatura nos próximos anos. Apesar de as tecnologias no geral englobarem mais de um grupo tecnológico, serão expostas as categorias com que estas mais se identificam. Elas podem ser classificadas em sete grupos de tecnologias da indústria 4.0. As conclusões do estudo foram

alcançadas a partir de uma pesquisa realizada em quatro partes: (1) realizar um conjunto de entrevistas com pesquisadores do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), entre julho de 2011 e agosto de 2012; (2) um levantamento com 85 programas de engenharia industrial e de manufatura; (3) 200 entrevistas com firmas realizadas pelo projeto *Production in the Innovation Economy* (PIE); (4) a partir dos levantamentos realizados, foi elaborado um conceito amplo de manufatura avançada.

As tecnologias que englobam a manufatura avançada são divididas em sete categorias no estudo citado no parágrafo anterior, englobando as 24 áreas tecnológicas elencadas: (1) *nano-engenharia 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”); (7) *manufatura sustentável* (“eficiência energética”, “manufatura com reciclados” e “produção e refino de biocombustíveis”).

A categoria *nano-engenharia de materiais e superfícies* 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; e polímeros complexos, mudando não somente materiais existentes na natureza, mas criando componentes que possuem propriedades e funções distintas dos naturais. 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.*, 2014).

A categoria *robótica e automação adaptativa* contém as tecnologias que dão ênfase ao desenvolvimento de máquinas que realizem atividades com maior eficiência, assim como se adaptem às novas condições de produção, como uma manufatura customizada ou identificação de problemas no decorrer da cadeia. A *eletrônica de próxima geração* engloba o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos com semicondutores não mais baseados em silício, mas sim em outros materiais, como o arseneto de gálio, que possui potencial de gerar

transistores de ultra velocidade, diminuindo a escala dos transistores e circuitos integrados ao mesmo tempo que aumenta sua eficiência (DE WECK *et al.*, 2014).

A *fabricação contínua de produtos farmacêuticos e biomanufatura* engloba dois setores que possuem desafios diferentes. A primeira parte 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”, que são os de alto valor para doenças raras. O número de pessoas doentes que necessitam desses medicamentos é relativamente pequeno, o que faz com que a indústria farmacêutica tenha pouco interesse no desenvolvimento e comercialização destes. A biomanufatura está mais voltada para “programar” as células e bactérias de forma a fazer com estas produzam proteínas e outros componentes de acordo uma demanda específica (DE WECK *et al.*, 2014).

O *design e gestão de cadeias de fornecimento distribuídas* reúne pesquisas que envolvem o aperfeiçoamento do planejamento e gestão em larga escala e de redes de fornecedores distribuídas em cadeias de suprimentos. As tecnologias para o aprimoramento são tecnologias da informação, algoritmos e técnicas de gerenciamento de bancos de dados, assim como tecnologias de rastreamento, como o RFID, UID, dentre outras. A sétima e última categoria é a *manufatura sustentável*, que engloba 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.*, 2014).

Todas as categorias e tecnologias apresentadas acima deixam claro que há um conjunto de mudanças ocorrendo 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 do mercado de trabalho. Um novo padrão de eficiência surge, novos materiais que mudam a composição de custos, uma maior capacidade de controle dos métodos de produção distribuição e acompanhamento pós-venda, que permitem a criação de novos produtos e novos mercados, além de que o aumento da automação e das tecnologias empregadas como um todo nos processos de produção e comercialização demandam mão de obra especializada.

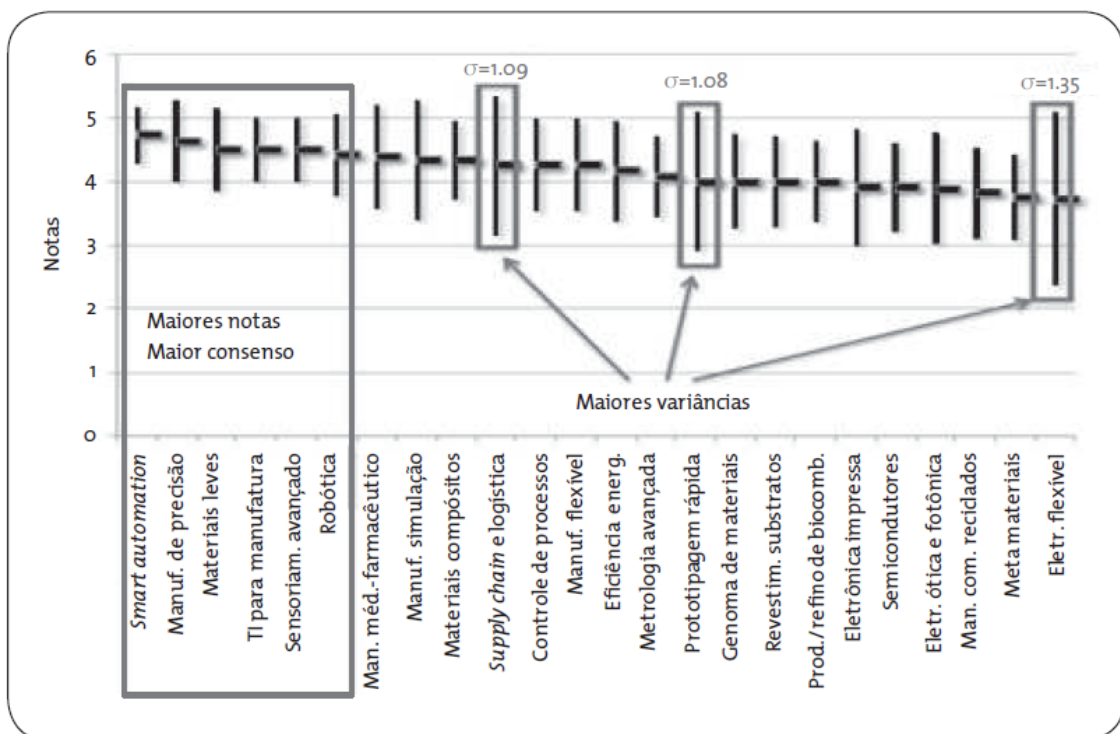
Com base nisso, pode-se concluir que os países que melhor se inserirem e desenvolverem as tecnologias da indústria 4.0 levarão vantagens não apenas no nível da eficiência de produção para o mercado interno, mas também no posicionamento quanto às relações de mercado global.

As principais tecnologias da indústria 4.0 (ou manufatura avançada, termo utilizado pelos autores para se referir ao processo) podem ser classificadas em sete categorias. Além da

pesquisa interna ao MIT, também foram realizadas entrevistas (entre os anos de 2011 e 2012) com instituições de engenharia industrial líderes nos EUA. Dos 85 programas contatados, houve retorno de 29. Dentre as perguntas, uma solicitava que fosse apontado o potencial (escala de 1 a 5) de cada uma das áreas tecnológicas levantadas pelo estudo para atingir amplos avanços nos próximos 5 a 10 anos.

O Gráfico 3 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 atribuída pelos entrevistados e a vertical mostra o desvio padrão da média. Esse último indicador aponta as tecnologias em que há um menor consenso entre os entrevistados quanto ao seu nível de potencial no futuro próximo. As seis primeiras tecnologias (a partir da esquerda para a direita) possuem notas de nível de potencial maiores do que 4,4 e, no geral, os menores desvio padrão (DE WECK *et al.*, 2014).

Gráfico 3 - Avaliação quantitativa das 24 áreas tecnológicas



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

Os resultados apontaram que a automação inteligente, a manufatura de precisão, os materiais leves, a tecnologia da informação para manufatura, o sensoriamento avançado e a robótica são as áreas tecnológicas que mais foram elencadas como promissoras para o futuro

próximo. Essas tecnologias estão interligadas entre si e, como mencionado anteriormente, envolvem a capacidade informacional da manufatura, ou seja, tecnologias relacionadas à digitalização. As três 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.

Foram escolhidas para a análise bibliométrica as seis primeiras áreas tecnológicas consideradas mais promissoras para o futuro próximo. Não foram encontradas publicações na base de dados Scopus para o termo “TI para a manufatura”, no estudo de De Weck et al. (2013, p. 16) “*information tech for manufacturing*”. O Quadro 11 apresenta os resultados anuais para os demais termos. “Robótica”, o termo que mais possui publicações, registra menções desde 1953, mas alcança mais de cem publicações apenas em 1981 e acima de mil em 1983. Na década de 2000, a publicações com o termo crescem substancialmente. Em outras palavras, o termo é antigo, ou seja, de uso bastante difundido. No entanto, ao mesmo tempo que sobrevive aos avanços científicos, ganhou força nas mudanças em curso.

Uma das áreas tecnológicas consideradas mais promissoras, mostrada no estudo de De Weck et al. (2013), é a de “sensoriamento avançado”. Se comparada com as demais, essa área apresenta um número baixo de publicações científicas que contêm o termo no decorrer dos anos. Apesar da tendência ao crescimento, o avanço é relativamente pequeno. Assim como as demais tecnologias, no período entre 2000 e 2018, o número de publicação dobra. O termo “materiais leves” é a segunda maior frequência das publicações nas áreas, apesar de que somente em 2010 ultrapasse cem. No termo “manufatura de precisão”, os trabalhos científicos, apesar de apresentarem baixo valores absolutos, apresentam uma evolução que praticamente dobrou no decorrer do período. O termo “automação inteligente” é o de menor número de citações, aparecendo pela primeira vez em 1995 e alcançando valores acima de dez somente em 2016.

Em suma, exceto “Robótica”, um termo mais difundido, todos os demais parecem estar representando tecnologias de fato novas, que estão em processo de desenvolvimento. Nesse sentido, a pesquisa realizada pelo MIT tem o mérito de ter apontado as áreas tecnológicas mais promissoras, baseado em pesquisadores de universidades e empresas de renome. O sucesso de cada uma delas dependerá dos desenvolvimentos futuros perante as tecnologias emergentes e concorrentes.

Quadro 11 - Números de publicações que contêm os termos das áreas tecnológicas por ano (2010-2018)

Termo	Automação Inteligente	Sensoriamento Avançado	Materiais Leves	Manufatura de Precisão	Robótica	Ao menos um
Publicações	107	556	2.823	955	256.839	261.517
2010	1	24	119	41	11.988	12.170
2011	5	30	127	43	12.978	13.177
2012	6	36	150	65	12.346	12.601
2013	3	31	167	52	14.506	14.754
2014	4	45	211	51	14.281	14.585
2015	8	35	207	52	15.285	15.582
2016	12	48	221	60	16.495	16.821
2017	11	58	244	67	18.558	18.938
2018	22	53	243	75	21.726	22.116

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

A área de estudo “engenharias” aparece como a área científica de maior frequência em quatro das cinco áreas tecnológicas, estando em segundo somente em “automação inteligente”, no qual o primeiro é “ciência da computação”. Quando pesquisado em conjunto, as engenharias apresentam também maior frequência, seguidas por “ciência da computação”, “matemática” e “medicina”. Ao se considerar ao menos um dos termos, ganha destaque a “matemática”, que aparece em três das cinco áreas tecnológicas. A “medicina” possui grande parte de sua frequência em publicações que contêm o termo “robótica”, que apresenta uma frequência elevada se comparada com as outras áreas tecnológicas.

Quadro 12 - Números de publicações que contêm os termos das áreas tecnológicas por áreas de estudo

	Automação Inteligente	107		Sensoriamento Avançado	556	
1º	Ciência da Computação	61	57%	Engenharias	343	62%
2º	Engenharias	60	56%	Ciência da Computação	172	31%
3º	Matemática	16	15%	Física e Astronomia	122	22%
4º	Ciência de materiais	14	13%	Ciência de materiais	121	22%
5º	Energia	12	11%	Química	68	12%
	Manufatura de Precisão	955		Robótica	256.839	
1º	Engenharias	818	86%	Engenharias	156.777	61%
2º	Ciência de materiais	290	30%	Ciência da Computação	137.079	53%
3º	Física e Astronomia	263	28%	Matemática	39.945	16%
4º	Ciência da Computação	257	27%	Medicina	38.008	15%
5º	Matemática	129	14%	Física e Astronomia	16.438	6%
	Materiais Leves	2.823		Ao menos um	261.517	
1º	Engenharias	1.992	71%	Engenharias	160.121	61%
2º	Ciência de materiais	1.242	44%	Ciência da Computação	137.931	53%
3º	Física e Astronomia	496	18%	Matemática	40.397	15%
4º	Ciência ambiental	274	10%	Medicina	38.123	15%
5º	Química	199	7%	Física e Astronomia	17.450	7%

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

Quando se analisam os termos a partir dos países das publicações, os EUA aparecem em primeiro lugar na maioria dos termos, assim como quando considerados em conjunto. Ao se considerar a busca com ao menos um dos termos, a classificação e porcentagens se assemelham às do termo “robótica”, devido a esta possuir números elevados de publicações se comparado aos demais.

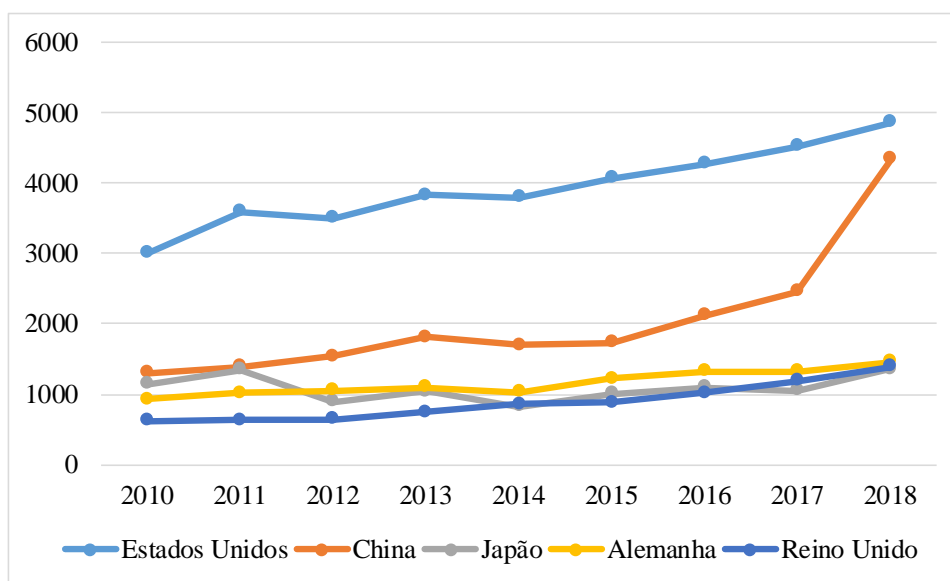
Quadro 13 - Números de publicações que contêm os termos das áreas tecnológicas por países

	Automação Inteligente	107		Sensoriamento Avançado	556		Materiais Leves	2.823	
1º	Índia	24	22%	Estados Unidos	216	39%	Estados Unidos	650	23%
2º	Alemanha	19	18%	China	80	14%	Alemanha	436	15%
3º	Estados Unidos	10	9%	United Kingdom	36	6%	China	323	11%
4º	Itália	6	6%	Itália	34	6%	Índia	158	6%
5º	Canadá	5	5%	Japão	29	5%	Reino Unido	131	5%
	Manufatura de Precisão	955		Robótica	256.839		Ao menos um	261.517	
1º	China	239	25%	Estados Unidos	67.402	26%	Estados Unidos	68.558	26%
2º	Estados Unidos	194	20%	China	28.030	11%	China	28.693	11%
3º	Alemanha	97	10%	Japão	20.531	8%	Japão	20.730	8%
4º	Reino Unido	59	6%	Alemanha	16.759	7%	Alemanha	17.340	7%
5º	Taiwan	50	5%	Reino Unido	13.911	5%	Reino Unido	14.145	5%

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

O Gráfico 4 mostra a evolução do número de publicações que contêm os termos pesquisados na Scopus em conjunto. Percebe-se que as publicações dos EUA foram bem maiores do que as da China e Japão, segundo e terceiro colocados respectivamente. Essa diferença dá-se especialmente devido ao elevado número de trabalhos científicos no termo “robótica” dos EUA. Apesar dessa diferença, pode-se perceber que o nível norte-americano cresce relativamente estável, enquanto o da China tem um salto de 2017 para 2018, chegando próximo ao nível de trabalhos científicos dos EUA. O crescimento das publicações chinesas passa a apresentar um crescimento consistente a partir de 2015, mesmo ano de anúncio da estratégia para a manufatura “*Made in China 2025*”.

Gráfico 4 - Comparação entre os países que mais possuem publicações que contêm ao menos um dos termos das áreas tecnológicas



Fonte: Scopus. Elaboração própria.

Entre as fontes de financiamento das pesquisas que resultam em publicações, destacam-se a chinesa “*National Natural Science Foundation of China*” (NSFC) e a “*National Science Foundation*” (norte americana), repetindo os resultados observados para os termos conceituais (vide seção 2.2). Ao se considerarem todos os termos em conjunto, percebe-se que a NSFC possui um número aproximadamente 60% maior do que o segundo colocado. Quando

comparado ao terceiro, a diferença aumenta para quase 5 vezes mais. A “*National Institutes of Health*” é uma instituição norte-americana voltada para a pesquisa na área da saúde.

A “*Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada*” (NSERC), que aparece em quarta posição quando se considera ao menos um dos termos, é uma instituição canadense que tem o intuito de fomentar a pesquisa e inovação no país. Atua através do financiamento de pesquisas e do intermédio entre organizações para a inovação e a ciência. Um dos objetivos da instituição é fortalecer a relação entre as descobertas científicas e as inovações, conectando as escolas, universidades, o setor privado, o governo e a sociedade civil. O foco da instituição está nas ciências naturais e nas engenharias (NSERC, 2019).

Quadro 14 - Números de publicações que contêm os termos das áreas tecnológicas por fontes de financiamento

	Automação Inteligente	12	Sensoriamento Avançado	127		
1º	Bundesministerium für Bildung und Forschung	3	25%	National Natural Science Foundation of China	23	18%
2º	Research and Development	2	17%	National Science Foundation	13	10%
3º	*	1	8%	Australian Research Council	6	5%
4º	*	1	8%	European Research Council	6	5%
5º	*	1	8%	National Research Foundation of Korea	6	5%
	Manufatura de Precisão	179	Robótica	39.895		
1º	National Natural Science Foundation of China	51	28%	National Natural Science Foundation of China	6.679	17%
2º	National Science Foundation	11	6%	National Science Foundation	4.056	10%
3º	National Basic Research Program of China (973 Program)	9	5%	National Institutes of Health	1.412	4%
4º	Deutsche Forschungsgemeinschaft	7	4%	Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada	1.296	3%
5º	Engineering and Physical Sciences Research Council	6	3%	European Commission	1.228	3%
	Materiais Leves	557	Ao menos um	40.867		
1º	National Natural Science Foundation of China	86	15%	National Natural Science Foundation of China	6.852	17%
2º	Deutsche Forschungsgemeinschaft	37	7%	National Science Foundation	4.114	10%
3º	National Science Foundation	31	6%	National Institutes of Health	1.420	3%
4º	Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada	21	4%	Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada	1.325	3%
5º	U.S. Department of Energy	16	3%	European Commission	1.248	3%

*Instituições empatadas com uma única publicação.

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

A importância do termo “robótica” pode ser atribuída a sua ascensão em décadas anteriores. No entanto, como mencionado, ainda é um conjunto de tecnologias com participação ativa desde o período da “Terceira Revolução Industrial”. No geral, percebe-se que: (i) as áreas tecnológicas apresentaram uma tendência de crescimento no número de publicações; (ii) a China obteve uma rápida evolução na frequência de trabalhos científicos; (iii) e a instituição apoio chinesa NFSC possui uma participação superior às demais, fato que pode ser apontado como um fator do desempenho chinês.

3. TECNOLOGIAS EMERGENTES NA INDÚSTRIA 4.0

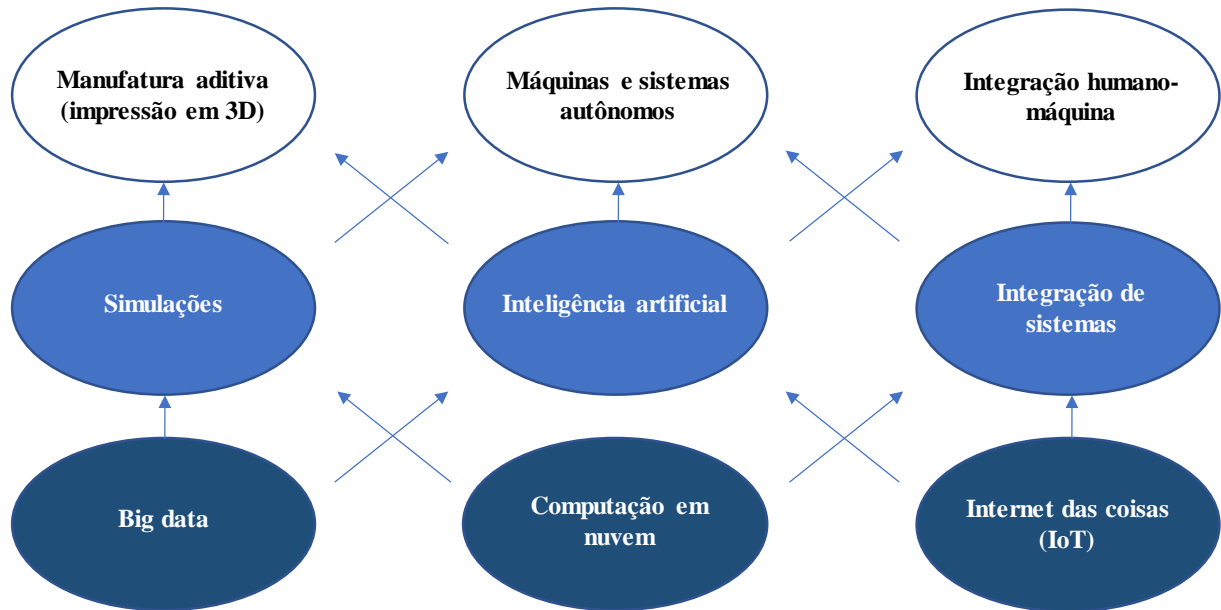
O intuito deste capítulo é apresentar as tecnologias apontadas como componentes da indústria 4.0 nos estudos da OCDE e do Projeto Indústria 2027 e, adicionalmente, como no capítulo anterior, realizar a análise bibliométrica das expressões técnicas. A OCDE definiu algumas tecnologias-chave nas quais foram realizadas as análises bibliométricas e que são apontadas pela OCDE como tecnologias-chave para a transformação digital na indústria. Outros estudos apontam a importância dessas tecnologias, atribuindo a estas um caráter de componente basilar da indústria 4.0 ou como somente habilitadoras do processo.

O Projeto Indústria 2027 foi lançado em maio de 2018 e é uma iniciativa da Coordenação Nacional da Indústria (CNI), que englobou diversas outras instituições. O intuito foi analisar as tecnologias com potencial disruptivo para cinco a dez anos após, identificando tendências e os possíveis impactos, tendo como foco realizar proposições para o desenvolvimento da indústria brasileira. O estudo divide as tecnologias em *clusters*, que serão apresentados na segunda seção deste capítulo, e faz uma análise bibliométrica de termos considerados representativos.

3.1 Tecnologias para a “transformação digital na indústria”

Como mencionado anteriormente, a indústria 4.0 reúne um conjunto de alterações no processo produtivo que, na visão de alguns autores, tem um potencial de gerar uma “quarta revolução industrial”. Para muitos pesquisadores, essas transformações têm como base fundamental as tecnologias da digitalização. Os estudos da OCDE (2015 e 2017) apontam algumas das tecnologias habilitadoras, base desse processo na produção industrial, que são mostradas na Figura 2. As tecnologias big data, computação em nuvem e internet das coisas (IoT) são tecnologias que permitem a captura e armazenamento de dados para que então possam ser realizadas simulações com os dados, interpretação com inteligência artificial (IA) e a integração dos sistemas. Como resultado dessas interações, tem-se a impressão 3D ou manufatura aditiva, a atuação de máquinas e sistemas autônomos e uma maior integração nas ações entre humano e máquina.

Figura 2 – Interação das tecnologias chave para a transformação digital na indústria



Fonte: Elaboração própria, com base em OCDE, 2017, p. 78.

Foram pesquisados na Scopus os termos apresentados na figura acima. O Quadro 15 apresenta as publicações que contêm os respectivos termos em seu resumo, título e/ou palavras-chave. O termo “simulações” não foi incluso na pesquisa dos termos por seus valores serem discrepantes dos demais e por ser uma expressão utilizada há vários anos e englobar muitas áreas distintas à indústria 4.0. Entre 2010 e 2018, com exceção de “integração de sistemas” (termo bastante genérico), houve um aumento no número de publicações com os termos selecionados - aproximadamente quatro vezes. A expressão “Integração humano-máquina” possui um número relativamente pequeno se confrontada com as demais.

Quadro 15 - Números de publicações que contêm os termos das tecnologias apontadas pela OCDE por ano (2010-2018)

Termo	Impressão 3D	Manufatura Aditiva	Inteligência Artificial	Big data	Computação em Nuvem	Integração Humano-máquina
Publicações	19.583	20.706	332.908	75.189	72.267	64
2010	66	189	13.969	31	2.113	2
2011	102	228	15.852	90	4.502	1
2012	149	362	17.126	686	5.442	3
2013	366	550	16.596	2.503	6.814	5
2014	926	1.094	19.635	5.042	7.165	5
2015	1.539	1.525	21.749	8.874	7.862	5
2016	2.556	2.487	23.573	12.306	8.846	3
2017	3.579	3.553	24.176	13.765	9.285	3
2018	4.581	4.799	27.742	15.851	10.110	6
Termo	Integração de Sistemas	Sistemas Autônomos	Máquinas Autônomas	Internet das Coisas	Ao menos um	
Publicações	26.354	12.603	411	65.426	589.772	
2010	1.253	583	10	397	18.464	
2011	1.234	598	11	831	23.186	
2012	1.297	574	11	1.285	26.478	
2013	1.305	551	20	1.847	29.538	
2014	1.269	662	19	2.813	36.854	
2015	1.141	670	28	4.184	44.323	
2016	1.115	760	29	7.454	54.173	
2017	1.067	847	34	11.297	61.363	
2018	1.007	953	50	16.675	73.512	

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

As publicações, segundo as áreas científicas, como no capítulo anterior, apresentam elevada participação para ciência da computação e engenharias. A OCDE entende as mudanças inovativas que vêm ocorrendo atualmente denominada de indústria 4.0 como um conjunto de transformações digitais que impactarão fortemente a indústria. Percebe-se que os termos são, em sua maioria, da área da ciência da computação, engenharias e matemática. Com menor porcentagem de participação, porém ainda entre os cinco primeiros, aparecem a medicina e a ciência de materiais.

As aplicações das tecnologias digitais na medicina são diversas, como a utilização de modelos digitais para a identificação de doenças ou até mesmo a impressão de componentes do corpo humano. A ciência de materiais estuda a propriedade de materiais de diversas escalas, interliga-se às transformações digitais devido à possibilidade de utilização de modelos computadorizados dos materiais.

Quadro 16 - Números de publicações que contêm os termos tecnologias apontadas pela OCDE por áreas de estudo

	Impressão 3D	19.583		Manufatura Aditiva	20.706		Inteligência Artificial	332.908	
1º	Engenharias	10.434	53%	Engenharias	15.034	73%	Ciência da Computação	247.961	74%
2º	Ciência de materiais	6.956	36%	Ciência de materiais	9.535	46%	Matemática	101.930	31%
3º	Ciência da Computação	4.174	21%	Física e Astronomia	4.428	21%	Engenharias	96.321	29%
4º	Física e Astronomia	3.498	18%	Ciência da Computação	4.210	20%	Medicina	17.187	5%
5º	Medicina	2.413	12%	Matemática	1.692	8%	Ciências Sociais	13.724	4%
	Integração Humano-máquina	64		Big data	75.189		Computação em Nuvem	72.267	
1º	Ciência da Computação	42	66%	Ciência da Computação	52.682	70%	Ciência da Computação	58.771	81%
2º	Engenharia	31	48%	Engenharias	21.112	28%	Engenharias	21.799	30%
3º	Matemática	14	22%	Matemática	13.847	18%	Matemática	13.245	18%
4º	Ciências Sociais	6	9%	Ciências da Decisão	10.813	14%	Ciências da Decisão	4.900	7%
5º	Medicina	5	8%	Ciências Sociais	8.411	11%	Ciências Sociais	3.722	5%
	Integração de Sistemas	26.354		Sistemas Autônomos	12.603		Máquinas Autônomas	411	
1º	Engenharias	12.686	48%	Engenharias	6.790	54%	Ciência da Computação	248	60%
2º	Ciência da Computação	7.097	27%	Ciência da Computação	6.208	49%	Engenharias	218	53%
3º	Medicina	6.730	26%	Matemática	3.709	29%	Matemática	76	18%
4º	Física e Astronomia	2.423	9%	Física e Astronomia	1.600	13%	Ciências Sociais	35	9%
5º	Matemática	2.218	8%	Ciência de materiais	628	5%	Física e Astronomia	26	6%
	Internet das Coisas			65.426			Ao menos um	589.772	
1º	Ciência da Computação			49.767		76%	Ciência da Computação	405.703	69%
2º	Engenharias			30.099		46%	Engenharias	200.970	34%
3º	Matemática			9.185		14%	Matemática	141.377	24%
4º	Física e Astronomia			6.299		10%	Medicina	34.404	6%
5º	Ciências da Decisão			5.526		8%	Ciência de materiais	32.787	6%

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

Os EUA e a China ocupam as primeiras posições na maioria dos termos. Considerando o conjunto, os EUA possuem o maior número de publicações, seguido por China, Índia, Reino Unido e Alemanha respectivamente, como mostrado no Quadro 16. O Reino Unido aparece dentre os cinco primeiros em todos os termos. Este país possui uma política pública voltada com uma estratégia que favorece as tecnologias do escopo da indústria 4.0.

O governo indiano também implementou políticas relacionadas às tecnologias da indústria 4.0. Em 2015, houve 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. Também foi formulado o “*National Policy for Advanced Manufacturing*” para aumentar a competitividade industrial da Índia.

Além dessas estratégias, outras também foram implementadas: “*National Manufacturing Policy*”, em 2017, para o avanço da indústria com foco na adoção de plataformas digitais para a indústria 4.0; criação do Centro de Excelência (CoE) em TI para a Indústria 4.0; “*National Program on Artificial Intelligence*”, buscando analisar o estado atual da tecnologia no país e desenvolver novas aplicações; “*Mission on Cyber-Physical Systems*”, que, juntamente com o CoE, para estabelecer o treinamento em robótica; IA; manufatura digital, dentre outras (JADHAV; MAHADEOKAR, 2019).

Quadro 17 - Números de publicações que contêm os termos das tecnologias apontadas pela OCDE por países

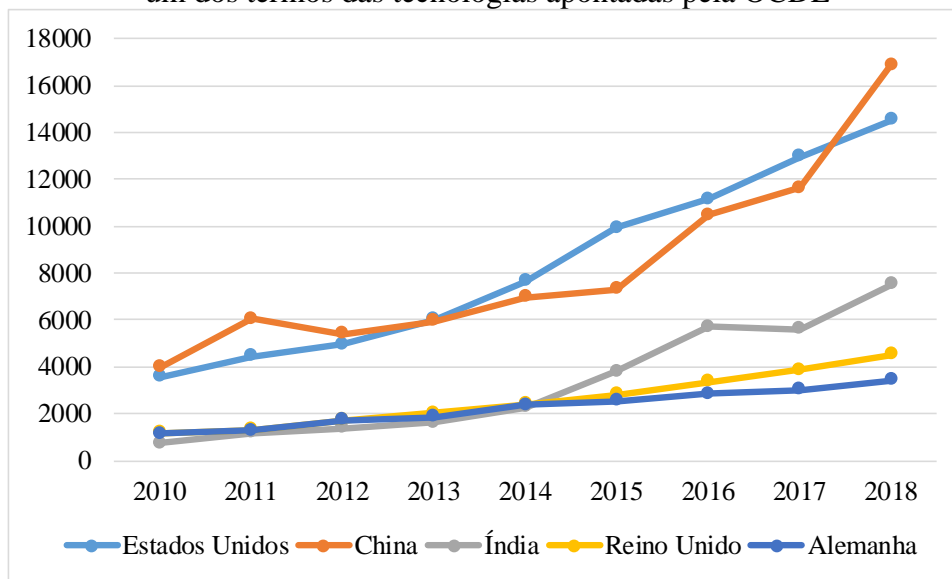
	Impressão 3D	19.583		Manufatura Aditiva	20.706		Inteligência Artificial	332.908	
1º	Estados Unidos	5.509	28%	Estados Unidos	6.869	33%	Estados Unidos	71.913	22%
2º	China	3.649	19%	China	2.296	11%	China	50.589	15%
3º	Reino Unido	1.496	8%	Alemanha	2.142	10%	Reino Unido	23.038	7%
4º	Alemanha	1.245	6%	Reino Unido	1.691	8%	Índia	18.225	5%
5º	Coreia do Sul	895	5%	Itália	1.114	5%	Alemanha	18.205	5%
	Integração Humano-máquina	64		Big data	75.189		Computação em Nuvem	72.267	
1º	China	21	33%	China	20.773	28%	China	18.853	26%
2º	Estados Unidos	19	30%	Estados Unidos	17.339	23%	Estados Unidos	11.702	16%
3º	Austrália	5	8%	Índia	5.703	8%	Índia	10.347	14%
4º	Reino Unido	4	6%	Reino Unido	4.395	6%	Reino Unido	3.605	5%
5º	Brasil	3	5%	Alemanha	3.227	4%	Alemanha	3.032	4%
	Integração de Sistemas	26.354		Sistemas Autônomos	12.603		Máquinas Autônomas	411	
1º	Estados Unidos	8.475	32%	Estados Unidos	3.314	13%	Estados Unidos	148	2%
2º	China	2.847	11%	China	1.279	5%	Alemanha	26	0%
3º	Alemanha	2.086	8%	Alemanha	904	3%	Reino Unido	24	0%
4º	Reino Unido	1.585	6%	Reino Unido	886	3%	Japão	20	0%
5º	Canadá	814	3%	França	628	2%	Canadá	19	0%
	Internet das Coisas	65.426		Ao menos um	589.772				
1º	China	13.096		20%	Estados Unidos	127.406		22%	
2º	Estados Unidos	9.328		14%	China	105.492		18%	
3º	Índia	8.077		12%	Índia	40.575		7%	
4º	Reino Unido	3.796		6%	Reino Unido	38.273		6%	
5º	Coreia do Sul	3.540		5%	Alemanha	32.437		5%	

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

O Gráfico 5 mostra a evolução do número de publicações que contêm ao menos um dos termos selecionados no decorrer dos anos 2010 a 2018 nos países de maior frequência. Os dados englobam as tecnologias apontadas como essenciais pela OCDE para a transformação

digital. Nos últimos anos, as frequências entre os dois primeiros colocados, os EUA e a China, estão próximas. Percebe-se uma aceleração da China em 2015, ano de publicação do “*Made in China 2025*”, até alcançar um número maior de publicações em 2018. Com relação à Índia, nota-se a aceleração no número de publicações que contêm os termos selecionados a partir de 2014, superando o Reino Unido e a Alemanha.

Gráfico 5 - Comparação entre os países que mais possuem publicações que contêm ao menos um dos termos das tecnologias apontadas pela OCDE



Fonte: Scopus. Elaboração própria.

As fontes de financiamento das pesquisas relacionadas às publicações que contêm os termos pesquisados repetem os resultados do capítulo anterior: a instituição chinesa “*National Natural Science Foundation of China*” (NSFC), uma instituição ligada ao Estado chinês com a tarefa de administrar o Fundo Nacional de Ciências Naturais do Governo Central, apoiou o maior número de publicações. Esses financiamentos concentram-se em três categorias de programas, que incluem promoção de pesquisa, promoção de talentos e construção de infraestrutura para pesquisa básica (NFSC, 2019).

A instituição que aparece em segundo nas publicações que contêm ao menos um dos termos é uma agência governamental dos EUA, mas a terceira e a quinta também são instituições chinesas – somente a quarta é britânica. Assim, três das instituições que estão dentre as fontes de financiamento das publicações que contêm os termos selecionados com base na OCDE são chinesas, uma norte-americana e uma britânica.

Quadro 18 - Números de publicações que contêm os termos das tecnologias apontadas pela OCDE por fontes de financiamento

Impressão 3D		7.413		Manufatura Aditiva		7.913	
1º	National Natural Science Foundation of China	1.432	19%	National Natural Science Foundation of China	961	12%	
2º	National Science Foundation	623	8%	National Science Foundation	805	10%	
3º	National Research Foundation of Korea	319	4%	U.S. Department of Energia	404	5%	
4º	National Institutes of Health	301	4%	Engenharias and Physical Sciences Research Council	379	5%	
5º	Engenharias and Physical Sciences Research Council	260	4%	Deutsche Forschungsgemeinschaft	262	3%	
Integração Humano-máquina		15		Big data		20.365	
1º	National Natural Science Foundation of China	3	20%	National Natural Science Foundation of China	6.820	33%	
2º	Alfred P. Sloan Foundation	2	13%	National Science Foundation	1.613	8%	
3º	National Aeronautics and Space Administration	2	13%	Fundamental Research Funds for the Central Universities	936	5%	
4º	Science and Engenharia Research Board	2	13%	National Basic Research Program of China (973 Program)	794	4%	
5º	*	1	7%	National Institutes of Health	672	3%	
Inteligência Artificial		54.305		Computação em Nuvem		14.285	
1º	National Natural Science Foundation of China	11.042	20%	National Natural Science Foundation of China	5.508	39%	
2º	National Science Foundation	5.766	11%	National Science Foundation	1.044	7%	
3º	National Institutes of Health	1.775	3%	Fundamental Research Funds for the Central Universities	742	5%	
4º	Engenharias and Physical Sciences Research Council	1.747	3%	National Basic Research Program of China (973 Program)	624	4%	
5º	Natural Sciences and Engenharias Research Council of Canadá	1.628	3%	European Commission	510	4%	
Integração de Sistemas		3.221		Sistemas Autônomos		2.157	
1º	National Natural Science Foundation of China	375	12%	National Natural Science Foundation of China	332	15%	
2º	National Institutes of Health	303	9%	National Science Foundation	253	12%	
3º	National Science Foundation	246	8%	Engenharias and Physical Sciences Research Council	102	5%	
4º	European Commission	151	5%	Office of Naval Research	94	4%	
5º	Engenharias and Physical Sciences Research Council	105	3%	European Commission	72	3%	
Máquinas Autônomas		68		Internet das coisas		17.958	
1º	National Science Foundation	14	21%	National Natural Science Foundation of China	4.282	24%	
2º	Natural Sciences and Engenharias Research Council of Canadá	6	9%	National Research Foundation of Korea	997	6%	
3º	Defense Advanced Research Projects Agency	5	7%	National Science Foundation	961	5%	
4º	Air Force Office of Scientific Research	3	4%	Fundamental Research Funds for the Central Universities	784	4%	
5º	Massachusetts Institute of Technology	3	4%	European Commission	667	4%	
Ao menos um						118.177	
1º	National Natural Science Foundation of China				28.326	24%	
2º	National Science Foundation				10.661	9%	
3º	Fundamental Research Funds for the Central Universities				3.840	3%	
4º	Engenharias and Physical Sciences Research Council				3.308	3%	
5º	National Basic Research Program of China (973 Program)				3.283	3%	

* Diversas instituições empatadas com uma única publicação.

Fonte: Scopus. Elaboração própria.

Ressalte-se que, como apresentado no Quadro 18, não há empresas dentre as cinco primeiras fontes de financiamento em nenhum dos termos. Quando se consideram as publicações que contenham “ao menos um” dos termos apontados pela OCDE, a empresa

com o maior número é a “Google”, com 405 publicações, ocupando a sexagésima sétima posição. Outras empresas que também aparecem são a “Microsoft” e a “Nvidia”.

Dentre os termos apontados pela OCDE como fundamentais para a transformação digital, verifica-se que os maiores números de publicações são nos termos relacionados à captação de dados (IoT), no armazenamento (big data e computação em nuvem) e na criação de matéria customizada (impressão 3D e manufatura aditiva). É perceptível a relação entre a implementação das estratégias nacionais dos EUA, China e Índia com o avanço do número de publicações nos termos apontados pela OCDE, especialmente quanto ao desempenho da Índia. O desempenho da Alemanha, apesar de sua política industrial voltada para a indústria 4.0, manteve-se relativamente constante. Apesar de a China possuir um número menor quando consideradas em conjunto as tecnologias, percebe-se o esforço realizado através das fontes de financiamentos: no ano de 2018, os chineses superaram o número de publicações em relação aos EUA. Para além das tecnologias já mostradas, serão trabalhados, na próxima seção, termos selecionados do Projeto Indústria 2027, realizado por instituições brasileiras.

3.2 Projeto Indústria 2027

O projeto Indústria 2027 é 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). Foi lançada em maio de 2018 e a motivação adveio do surgimento de novas tecnologias com potenciais disruptivos e da incorporação por diversos países de estratégias nacionais de inovação (IEL, 2018).

A iniciativa tem como principais objetivos:

- (i) identificar tendências e avaliar os impactos das tecnologias disruptivas sobre os principais sistemas produtivos no horizonte de cinco a dez anos; (ii) avaliar a capacidade de a indústria brasileira defletir riscos e aproveitar as oportunidades abertas pelas inovações disruptivas; e (iii) desenvolver recomendações para o planejamento estratégico das empresas e subsídios para a formulação de políticas públicas (IEL, 2018, p. 25).

O campo de estudo foi dividido em *clusters* tecnológicos e sistemas produtivos, sendo agrupados de acordo a proximidade de suas bases técnicas em oito *clusters*. A indústria como um todo foi dividida em dez sistemas produtivos reunidos e quatorze focos setoriais, como

pode ser visto na figura abaixo. O foco foi o estudo de soluções tecnológicas que possuem uma previsão de estarem comercialmente disponíveis até o ano de 2027.

Figura 3 - Campo de estudos do projeto Indústria 2027



Fonte IEL, 2018, p. 26.

O *cluster* “inteligência artificial (IA), *big data* e computação em nuvem” pode ser aplicado em diversas áreas, como na saúde, para diagnósticos médicos; e na gestão, para otimização logística e tomada de decisões. A IA está diretamente ligado ao *machine learning* e ao *deep learning*, a capacidade de uma máquina de aprender e realizar determinadas funções de acordo as novas variáveis que surjam, podendo ser aplicada para aumentar eficiência e produtividade de sistemas. *Big data* é um termo que se refere a grandes fluxos de dados que estão para além da capacidade dos *softwares* de base de dados usuais. Trata-se de uma tecnologia habilitadora, que permite o armazenamento de informações para análise e tomada de decisões; viabiliza, por exemplo, a memorização de dados advindos de um sistema de comunicação M2M (*machine-to-machine*). A computação em nuvem (*cloud computing*) é o fornecimento de serviços de computação pela internet (“a nuvem”), principalmente o armazenamento de dados e expansão da capacidade de computação, além de ser uma tecnologia habilitadora (OCDE, 2015).

O *cluster* “redes de comunicação” diz respeito aos sistemas de computadores, canais de transmissão e recursos para a troca de informação. Dentro dessa categoria, há as tecnologias *blockchain* e a distribuição quântica de chaves (*Quantum Key Distribution – QKD*). A primeira é uma tecnologia em que o dado é “encadeado” a um próximo dado,

utilizando-se de criptografia; a sua aplicação mais conhecida é no âmbito das moedas digitais. A segunda é uma tecnologia que distribui chaves criptografadas entre duas partes com segurança mais avançada do que a utilizada usualmente (IEL, 2017, p. 25-26).

A IoT também é elencada como um *cluster* e trata-se de um sistema de captação e troca de informações a partir de sensores e atuadores, trabalhando em conjunto com outras tecnologias habilitadoras, como a *big data* e a IA. Suas aplicações são diversas. Quando aplicada à indústria, é denominada de *Industrial Internet of Things* (IIoT) (IEL, 2017, p. 36).

Outro *cluster* é a produção inteligente e conectada (PIC), que engloba tecnologias como sistemas ciber-físicos de interconexão, digitalização e IA, podendo ser utilizada para o processamento e otimização da cadeia produtiva. É baseada na infraestrutura de comunicação de sistemas de produção em conjunto com IA. O projeto Indústria 2027 denomina como modelos de referência da PIC o norte-americano e o alemão, designados respectivamente como *advanced manufacturing* e *industrie 4.0*. Algumas das tecnologias dentro desse *cluster* que se destacam para a próxima década são a manufatura aditiva, a robótica autônoma e colaborativa (os robôs colaborativos podem ser denominados de *cobot*) e a virtualização da produção (sistemas ciber-físicos) (IEL, 2017, p. 43-45).

Das tecnologias componentes dos clusters acima, foram escolhidos os termos apresentados no quadro abaixo com base no grau de importância dado pelo Projeto I2027 e com base nas informações apresentadas no decorrer da dissertação. Dentre os termos selecionados, todos tiveram crescimento de 2010 para 2018. O termo que apresentou maior avanço em frequência foi “*blockchain*”. Termo relativamente novo, tem sua primeira aparição em 2003, posteriormente em 2010, mas se populariza entre 2015 e 2018. Os termos que mais possuem publicações são “*machine learning*” e “*deep learning*”, que são tecnologias relacionadas à inteligência artificial e apresentaram forte crescimento nos últimos anos. Como mostrado anteriormente, a inteligência artificial e suas tecnologias são fundamentais para o aumento da capacidade de interpretar grandes volumes de dados.

Quadro 19 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “IA, big data e computação em nuvem”, “Redes de comunicações”, “IoT” e “PIC” por ano (2010-2018)

Termo	Quantum Key Distribution	Blockchain	Robótica Colaborativa	Robótica Autônoma	Machine Learning	Deep Learning
Publicações	5.579	8.165	1.018	2.238	165.352	54.740
2010	292	1	27	119	4.499	127
2011	324	-	21	105	5.034	156
2012	282	-	22	85	5.680	213
2013	302	2	21	119	6.860	341
2014	407	10	31	122	8.262	653
2015	330	37	42	126	10.381	1.349
2016	389	180	106	121	13.499	3.137
2017	423	804	145	167	18.589	7.830
2018	531	2.823	222	178	29.544	16.488

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da Scopus.

Com relação às áreas de estudo, os predomínios são das “engenharias”, da “ciência da computação” e da “matemática”. Somente o termo “*Quantum Key Distribution*” “física e astronomia” está presente como área de estudo na grande maioria das publicações - fato esperado, pois é uma tecnologia diretamente relacionada com a física quântica. Na tecnologia “*blockchain*”, destacam-se as “ciências da decisão” e “negócios, gestão e contabilidade”, o que pode ser atribuído, em parte, ao papel das criptomoedas, que se utilizam dessa tecnologia por possuir aplicações diversas, apesar das moedas digitais serem seu uso mais usualmente conhecido. Nas tecnologias “*machine learning*” e “*deep learning*”, destacam-se também a “medicina” e a “bioquímica, genética e biologia molecular”, o que evidencia o papel da IA nas tecnologias da saúde.

Quadro 20 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “IA, big data e computação em nuvem”, “Redes de comunicações”, “IoT” e “PIC” por áreas de estudos

	Quantum Key Distribution	5.579		Blockchain	8.165	
1º	Física e Astronomia	4.014	72%	Ciência da Computação	6.327	77%
2º	Engenharias	1.953	35%	Engenharias	3.081	38%
3º	Ciência da Computação	1.709	31%	Matemática	1.532	19%
4º	Ciência de materiais	1.297	23%	Ciências da Decisão	1.418	17%
5º	Matemática	1.049	19%	Negócios, Gestão e Contabilidade	1.289	16%
	Machine Learning	165.352		Deep Learning	54.740	
1º	Ciência da Computação	107.319	65%	Ciência da Computação	39.310	72%
2º	Engenharias	50.028	30%	Engenharias	19.892	36%
3º	Matemática	33.000	20%	Matemática	11.673	21%
4º	Medicina	17.816	11%	Física e Astronomia	5.293	10%
5º	Bioquímica, Genética e Biologia Molecular	13.569	8%	Medicina	5.198	9%
	Robótica Colaborativa	1.018		Robótica Autônoma	2.238	
1º	Engenharias	714	70%	Engenharias	1.463	65%
2º	Ciência da Computação	693	68%	Ciência da Computação	1.432	64%
3º	Matemática	226	22%	Matemática	482	22%
4º	Física e Astronomia	63	6%	Física e Astronomia	224	10%
5º	Ciência de materiais	41	4%	Ciência de materiais	145	6%

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da Scopus.

Os países que mais se destacam nos termos selecionados são a China e os EUA, ocupando as primeiras posições em diversos dos termos. Além destes, o Reino Unido é o que mais aparece dentre os cinco primeiros, estando em cinco dos seis termos. A Índia também se destaca, em especial no termo que mais possui publicações, que é o “*machine learning*”. Pelo que se verifica, os países que aparecem com maiores níveis de publicações implantam estratégias nacionais específicas para o desenvolvimento da manufatura com ênfase na indústria 4.0, diversas estratégias nacionais já citadas no decorrer desta dissertação.

Quadro 21 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “IA, big data e computação em nuvem”, “Redes de comunicações”, “IoT” e “PIC” por países

	Quantum Key Distribution	5.579		Blockchain	8.165		Robótica Colaborativa	1.018	
1º	China	1.705	31%	China	1.630	20%	Estados Unidos	186	18%
2º	Estados Unidos	945	17%	Estados Unidos	1.422	17%	Alemanha	107	11%
3º	Japão	495	9%	Índia	568	7%	Itália	88	9%
4º	Reino Unido	479	9%	Reino Unido	553	7%	China	76	7%
5º	Canadá	413	7%	Alemanha	414	5%	França	76	7%
	Machine Learning	165.352		Deep Learning	54.740		Robótica Autônoma	2.238	
1º	Estados Unidos	46.226	28%	China	16.767	31%	Estados Unidos	697	31%
2º	China	26.285	16%	Estados Unidos	12.801	23%	Reino Unido	160	7%
3º	Índia	12.893	8%	Índia	3.492	6%	Alemanha	149	7%
4º	Reino Unido	12.068	7%	Reino Unido	3.362	6%	Japão	145	6%
5º	Alemanha	9.804	6%	Coreia do Sul	2.492	5%	Itália	128	6%

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da Scopus.

Novamente, quando se tratam das fontes de financiamento, o grande destaque é a NFSC, que possui valores bastante superiores de patrocínios nos termos selecionados. Outra instituição chinesa que se destaca é a “*National Basic Research Program of China (973 Program)*”, além da norte-americana “*National Science Foundation*”. Algo diferenciado dos demais conjuntos de termos selecionados é a aparição de uma empresa dentre as cinco principais financiadoras nas publicações, que é a “Nvidia”, em quinta posição no termo “*deep learning*”.

É uma empresa de tecnologia, voltada especialmente para o desenvolvimento de unidades de processamento gráfico. Utiliza inteligência artificial para o aprimoramento do processamento, aumentando a eficiência das unidades, não somente quanto ao rendimento relacionado a funcionalidades já existentes, mas também para novas capacidades gráficas que não eram viáveis alguns anos atrás (NVIDIA, 2019).

Quadro 22 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “IA, big data e computação em nuvem”, “Redes de comunicações”, “IoT” e “PIC” por fontes de financiamento

	Quantum Key Distribution	1.613		Block chain	2.413	
1º	National Natural Science Foundation of China	715	44%	National Natural Science Foundation of China	768	32%
2º	National Basic Research Program of China (973 Program)	161	10%	National Basic Research Program of China (973 Program)	107	4%
3º	Engineering and Physical Sciences Research Council	100	6%	Fundamental Research Funds for the Central Universities	105	4%
4º	Natural Sciences and Engenharias Research Council of Canadá	85	5%	National Research Foundation of Korea	96	4%
5º	Chinese Academy of Sciences	61	4%	National Science Foundation	84	3%
	Machine Learning	49.242		Deep Learning	23.182	
1º	National Natural Science Foundation of China	10.091	20%	National Natural Science Foundation of China	8.059	35%
2º	National Science Foundation	4.182	8%	National Science Foundation	1.187	5%
3º	National Institutes of Health	3.090	6%	National Basic Research Program of China (973 Program)	1.170	5%
4º	Fundamental Research Funds for the Central Universities	1.460	3%	Fundamental Research Funds for the Central Universities	1.118	5%
5º	National Basic Research Program of China (973 Program)	1.301	3%	Nvidia	943	4%
	Robótica Colaborativa	281		Robótica Autônoma	376	
1º	European Commission	22	8%	National Science Foundation	35	9%
2º	National Science Foundation	18	6%	National Natural Science Foundation of China	30	8%
3º	National Natural Science Foundation of China	17	6%	Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada	24	6%
4º	Natural Sciences and Engenharias Research Council of Canadá	14	5%	Japan Society for the Promotion of Science	17	5%
5º	European Regional Development Fund	13	5%	Engineering and Physical Sciences Research Council	15	4%

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da Scopus.

Os materiais avançados englobam materiais que possuem estruturas ou funcionalidades aprimoradas quanto a materiais já utilizados; podem ser chamados também de *value-added materials*. São divididos em cinco categorias: nanomateriais, seus produtos e processos, como o grafeno e nanocompósitos poliméricos; materiais autorreparáveis e/ou funcionais, como os polímeros termorreversíveis; materiais de elevado desempenho, como os metais vítreos; materiais de fontes renováveis e produtos da biorrefinaria, como os biopolímeros; terras raras, podem ser aplicados baterias (IEL, 2017, p. 48-49).

A nanotecnologia pode ser definida como a área da ciência que trabalha com materiais em escala nanoscópica. Pode ser dividida em quatro gerações: (i) nanoestruturas passivas; (ii) nanoestruturas ativas; (iii) sistemas de nanossistemas; (iv) nanossistemas moleculares. A quarta geração é a que tem o potencial de desenvolver-se na próxima década, com principais aplicações nas áreas: nanomedicina e nanocosméticos; nanoeletrônica e novos materiais para computação; vestuário e dispositivos flexíveis e vestíveis; sensoriamento para internet das coisas; nanotecnologia para energia; e, por fim, a nanotecnologia para alimentos (IEL, 2017, p. 54-55).

O Quadro 23 apresenta o número de publicações dos termos selecionados dos *clusters* “materiais avançados” e “nanotecnologia”. Dentre esses, “nanomateriais” apresenta o maior número total, ocorrendo um crescimento de mais de duas vezes entre os anos de 2010 e 2018. Com exceção do termo nanoeletrônica, todos os outros termos apresentaram crescimento. O termo “nanocosmético” apresentou menos de quinze publicações no decorrer dos anos. Portanto, não foi apresentado nos quadros que seguem.

Quadro 23 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “materiais avançados” e “nanotecnologia” por ano (2010-2018)

Termo	Nanoeletrônica	Nanomateriais	Nanomedicina
Publicações	12.755	62.320	18.840
2010	1.407	2.767	740
2011	817	3.287	878
2012	751	3.562	1.111
2013	831	4.263	1.217
2014	584	4.827	1.565
2015	989	5.401	1.960
2016	1.273	6.016	2.242
2017	1.058	6.784	2.406
2018	893	7.348	2.578
Termo	Materiais de alto desempenho	Materiais autorreparáveis	Materiais de valor agregado
Publicações	2.348	26.888	322
2010	82	1.188	10
2011	101	1.056	25
2012	99	1.254	12
2013	101	1.621	19
2014	119	1.836	10
2015	140	2.709	20
2016	179	2.696	27
2017	172	2.865	31
2018	220	3.116	44

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da Scopus.

Como já era de se esperar, a área de estudo que mais se destaca é a “ciências de materiais”, dado que, em essência, a nanotecnologia é a manipulação da matéria em escala nanométrica. As engenharias e a química possuem elevada participação nos termos. Ciências da computação, que se destacou em várias das outras análises bibliométricas elaboradas no decorrer desta dissertação, aparece somente em nanoeletrônica com uma participação relativamente pequena. O estudo da química destaca-se nesse cluster por aparecer dentre os cinco primeiros em todos os termos selecionados.

Quadro 24 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “materiais avançados” e “nanotecnologia” por áreas de estudos

	Materiais de valor agregado	322		Nanoeletrônica	12.755	
1º	Engenharias	118	37%	Engenharias	8.464	66%
2º	Ciência de materiais	112	35%	Ciência de materiais	5.629	44%
3º	Química	86	27%	Física e Astronomia	4.784	38%
4º	Engenharia Química	82	25%	Ciência da Computação	2.195	17%
5º	Ciência ambiental	82	25%	Química	1.897	15%
	Nanomateriais	62.320		Nanomedicina	18.840	
1º	Ciência de materiais	31.650	51%	Ciência de materiais	7.743	41%
2º	Química	24.314	39%	Bioquímica, Genética e Biologia Molecular	6.422	34%
3º	Engenharias	21.119	34%	Farmacologia, Toxicologia e Farmacêutica	6.403	34%
4º	Física e Astronomia	17.897	29%	Engenharias	5.941	32%
5º	Engenharia Química	13.644	22%	Engenharia Química	5.781	31%
	Materiais de alto desempenho	2.348		Materiais autorreparáveis	26.888	
1º	Ciência de materiais	1.329	57%	Ciência de materiais	16.211	60%
2º	Engenharias	1.301	55%	Engenharias	14.112	52%
3º	Química	540	23%	Física e Astronomia	9.620	36%
4º	Física e Astronomia	456	19%	Química	8.411	31%
5º	Engenharia Química	324	14%	Engenharia Química	3.779	14%

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da Scopus.

Quadro 25 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “materiais avançados” e “nanotecnologia” por países

	Nanomateriais	62.320		Nanoeletrônica	12.755	
1º	China	18.118	29%	Estados Unidos	2.910	23%
2º	Estados Unidos	14.273	23%	China	2.314	18%
3º	Índia	4.993	8%	Rússia	1.070	8%
4º	Coreia do Sul	3.040	5%	Japão	939	7%
5º	Alemanha	2.821	5%	Alemanha	821	6%
	Materiais de valor agregado	322		Nanomedicina	18.840	
1º	Estados Unidos	60	19%	Estados Unidos	5.565	30%
2º	Canadá	24	7%	China	4.038	21%
3º	Japão	24	7%	Índia	1.530	8%
4º	Índia	22	7%	Itália	1.079	6%
5º	Coreia do Sul	19	6%	Reino Unido	1.066	6%
	Materiais de alto desempenho	2.348		Materiais autorreparáveis	26.888	
1º	Estados Unidos	559	24%	China	12.292	46%
2º	China	366	16%	Estados Unidos	3.608	13%
3º	Alemanha	282	12%	Japão	2.105	8%
4º	Japão	137	6%	Alemanha	1.439	5%
5º	Índia	105	4%	Coreia do Sul	1.135	4%

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da Scopus.

Em termos de países, a China e os EUA se destacam no termo “nanomateriais”, que consta em mais publicações na base Scopus do que as demais. A China se destaca com um valor bastante superior em relação aos demais. Índia e Japão aparecem entre os cinco primeiros em quatro dos seis termos.

Quanto às fontes de financiamento, percebe-se que as instituições que mais patrocinaram publicações com os termos selecionados foram chinesas, a NFSC e a *National Basic Research Program of China (973 Program)*. No termo “nanomateriais”, que é o de maior frequência, verifica-se que o número de publicações financiadas é cerca de cinco vezes maior do que a do segundo colocado. No termo “materiais de valor agregado”, aparecem três instituições brasileiras entre as cinco que mais financiam, entretanto o termo possui um número relativamente pequeno de publicações em relação às que são patrocinadas, o que faz com que o número seja ínfimo quando comparado a outras instituições nos termos de maior frequência.

Quadro 26 - Números de publicações que contêm os termos selecionados dos clusters “materiais avançados” e “nanotecnologia” por fontes de financiamento

Materiais de valor agregado		101		Nanoeletrônica		3.145	
1º	National Basic Research Program of China (973 Program)	7	7%	National Natural Science Foundation of China	725	23%	
2º	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico	5	5%	National Science Foundation	318	10%	
3º	Australian Research Council*	4	4%	Российский Фонд Фундаментальных Исследований	142	5%	
4º	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo*	4	4%	National Basic Research Program of China (973 Program)	134	4%	
5º	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	3	3%	National Research Foundation of Korea	122	4%	
Nanomateriais		26.105		Nanomedicina		8.027	
1º	National Natural Science Foundation of China	8.952	34%	National Natural Science Foundation of China	2.293	29%	
2º	National Science Foundation	1.700	7%	National Institutes of Health	1.079	13%	
3º	Fundamental Research Funds for the Central Universities	1.160	4%	National Basic Research Program of China (973 Program)	419	5%	
4º	National Basic Research Program of China (973 Program)	1.139	4%	National Science Foundation	362	5%	
5º	National Research Foundation of Korea	922	4%	Fundamental Research Funds for the Central Universities	282	4%	
Materiais de alto desempenho		566		Materiais autorreparáveis		8.733	
1º	National Natural Science Foundation of China	161	28%	National Natural Science Foundation of China	3.523	40%	
2º	National Science Foundation	46	8%	National Science Foundation	525	6%	
3º	U.S. Department of Energy	35	6%	Fundamental Research Funds for the Central Universities	492	6%	
4º	Deutsche Forschungsgemeinschaft	26	5%	National Basic Research Program of China (973 Program)	400	5%	
5º	Fundamental Research Funds for the Central Universities	23	4%	Japão Society for the Promotion of Science	296	3%	

* Instituições empatadas no número de publicações, o que faz com que estejam na mesma posição dentro da classificação.

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da Scopus.

A biotecnologia pode ser conceituada como técnicas para modificar organismos vivos para a obtenção de produtos ou serviços. É classificada em três tipos: (i) a biotecnologia vermelha, que é aplicada na saúde humana; (ii) biotecnologia verde, que é aplicada na agricultura; e, por fim, (iii) a biotecnologia branca, aplicada à indústria para produzir compostos químicos, materiais e energia (IEL, 2017, p. 58). A biotecnologia assume um papel de destaque atualmente devido aos debates quanto ao crescimento demográfico mundial elevado e à intensa discussão quanto aos impactos ambientais do crescimento econômico.

As novas tecnologias na área são resultado da combinação de tecnologias genômica, biologia molecular e bioinformática, de forma a permitir o aprimoramento do entendimento do mecanismo molecular e, sendo assim, compreender o funcionamento de doenças diversas. Alguns dos principais avanços na biotecnologia são advindos da tecnologia ainda em aperfeiçoamento (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeat – CRISPR/CRISPR-associated nucleasase protein – Cas*), que é de edição gênica (IEL, 2017, p. 59).

Outros avanços importantes na saúde estão na “medicina de precisão”, que engloba terapias de acordo com o mecanismo molecular da doença de forma a individualizar a terapia e estratificar os pacientes; e no “*DNA microarray*”, que é uma tecnologia que permite a edição de DNA e RNA através da identificação de pontos de DNA, utilizando-se de métodos da bioinformática (IEL, 2017, p. 62).

Os termos selecionados no *cluster* biotecnologia foram três, os quais aparecem no Quadro 27 organizados nas publicações por ano. Percebe-se que a tecnologia “*DNA microarrays*” possui uma tendência de queda desde 2010, enquanto que as demais são relativamente mais novas e tiveram uma forte aceleração nos últimos anos, em especial a partir de 2013. Essa é uma tecnologia que aparece com frequência maior do que cem publicações no ano desde 1999; antiga, se comparada com as outras duas, o que mostra certa consolidação dessa tecnologia.

Quadro 27 - Números de publicações que contêm os termos selecionados do cluster “biotecnologia” por ano (2010-2018)

Termo	DNA microarrays	Medicina de precisão	Crispr/Cas9
Publicações	64.378	16.291	11.946
2010	4.195	6	0
2011	3.276	4	0
2012	2.700	34	1
2013	2.342	95	32
2014	3.117	406	248
2015	3.225	1.946	654
2016	2.523	3.142	1.368
2017	1.817	3.575	2.255
2018	1.687	3.957	3.321

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da Scopus.

Quadro 28 - Números de publicações que contêm os termos selecionados do cluster “biotecnologia” por áreas de estudos

	Medicina de precisão	16.291
1º	Medicina	11.434 70%
2º	Bioquímica, Genética e Biologia Molecular	6.015 37%
3º	Farmacologia, Toxicologia e Farmacêutica	1.867 11%
4º	Ciência da Computação	750 5%
5º	Imunologia e Microbiologia	728 4%
	Crispr/Cas9	11.946
1º	Bioquímica, Genética e Biologia Molecular	8.182 68%
2º	Medicina	3.123 26%
3º	Imunologia e Microbiologia	1.803 15%
4º	Ciências Biológicas e Agrícolas	1.713 14%
5º	Multidisciplinar	1.049 9%
	DNA microarrays	64.378
1º	Bioquímica, Genética e Biologia Molecular	40.251 63%
2º	Medicina	26.466 41%
3º	Ciências Biológicas e Agrícolas	8.310 13%
4º	Imunologia e Microbiologia	7.450 12%
5º	Ciência da Computação	4.568 7%

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da Scopus.

Como era de se esperar, as áreas de estudo que mais compõem as publicações que contêm os termos são a “medicina” e a “bioquímica, genética e biologia molecular”, juntamente com outras áreas relacionadas à saúde. Fora dessas, encontra-se a “ciência da computação”, o que mostra a importância dos processos computacionais no estudo dessas tecnologias.

Nos três termos selecionados, os EUA é o país com maior número de publicações, com valores bastante superiores ao demais, especialmente no termo que mais possui publicações, que é o “*DNA microarrays*”. Sua diferença em relação ao segundo colocado é de 19255 publicações, um elevado valor. Os países EUA, China, Alemanha e Reino Unido aparecem dentre os cinco primeiros nos três termos selecionados, o que demonstra o desempenho com relação ao número de publicações na área.

Quadro 29 - Números de publicações que contêm os termos selecionados do cluster “*biotecnologia*” por países

	Medicina de precisão	16.291		Crispr/Cas9	11.946		DNA microarrays	64.378	
1º	Estados Unidos	7.607	47%	Estados Unidos	5.174	43%	Estados Unidos	26.534	41%
2º	Reino Unido	1.730	11%	China	3.066	26%	China	7.279	11%
3º	China	1.494	9%	Japão	964	8%	Japão	6.363	10%
4º	Itália	1.283	8%	Alemanha	947	8%	Alemanha	5.573	9%
5º	Alemanha	1.215	7%	Reino Unido	914	8%	Reino Unido	4.771	7%

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da Scopus.

Quadro 30 - Números de publicações que contêm os termos selecionados do cluster “*biotecnologia*” por fontes de financiamento

	Medicina de precisão	5.922	
1º	National Institutes of Health	1.608	27%
2º	National Natural Science Foundation of China	564	10%
3º	National Cancer Institute	352	6%
4º	Foundation for the National Institutes of Health	207	3%
5º	National Human Genome Research Institute	168	3%
	Crispr/Cas9	7.971	
1º	National Institutes of Health	1.889	24%
2º	National Natural Science Foundation of China	1.629	20%
3º	National Basic Research Program of China (973 Program)	362	5%
4º	Japão Society for the Promotion of Science	358	4%
5º	National Science Foundation	270	3%
	DNA microarrays	15.333	
1º	National Institutes of Health	2.984	19%
2º	National Natural Science Foundation of China	1.830	12%
3º	Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology	794	5%
4º	Japão Society for the Promotion of Science	556	4%
5º	National Cancer Institute	524	3%

Fonte: Elaboração própria, com base nos dados da Scopus.

Das instituições de financiamento, a instituição norte-americana “*National Institutes Of Health*” possui a maior frequência em todos os três termos selecionados no *cluster*. Em

segunda posição em todos os termos, aparece a NFSC, já citada anteriormente. Percebe-se que, nas tecnologias selecionadas, os EUA possuem o maior número de publicações financiadas e o maior número de publicações associadas ao país.

No *cluster* armazenamento de energia ou armazenamento eletroquímico de energia (AE ou AEE), há a contenção de eletricidade a partir de uma reação química (*reação redox*). Busca-se a criação de um equipamento que extraia energia da reação química, podendo haver diversas combinações de elementos químicos (IEL, 2017, p. 63).

Os *clusters* acima apresentados são trabalhados no Projeto I2027. Sua avaliação e previsões são realizadas com base em categorias analíticas, que podem ser sintetizadas no quadro abaixo. Foge do escopo dessa dissertação aprofundar o debate quanto às categorias utilizadas pelo projeto. No Quadro 31, tem-se uma síntese dos conceitos e categorias utilizados pelo Projeto para avaliação e análise das tecnologias que compõem os *clusters*.

Quadro 31– Conceitos para avaliação e prospecção tecnológica

CARACTERIZAÇÃO	ESPECIFICAÇÃO	CATEGORIAS
PARA DESCREVER O PROGRESSO TÉCNICO		
TIPO DE INOVAÇÃO	Define onde a inovação se manifesta	Em processos; produtos; modelos organizacionais; mercados; insumos
ESTÁGIO DE DESENVOLVIMENTO	Determina se normas e padrões já podem ser determinados	Madura: padrão tecnológico estabelecido
		Em seleção: padrões técnicos em competição
		Em mutação: soluções ainda em desenvolvimento
INTENSIDADE DA MUDANÇA TECNOLÓGICA	Estabelece o grau de inovatividade de uma tecnologia	Incremental
		Radical
RELAÇÃO ENTRE TECNOLOGIAS	Define a extensão em que uma tecnologia habilita outras	Geral
		Localizada
PARA DESCREVER RELAÇÕES ENTRE INOVAÇÕES E ATIVIDADES PRODUTIVAS		
ESPECTRO	Define a amplitude de aplicação em diferentes atividades econômicas	Propósito geral
		Propósito ou aplicação em atividades específicas
IMPACTO	Influência sobre modelos de negócio, padrão de concorrência e estruturas de mercado	Moderado
		Disruptivo
		Potencialmente disruptivo

Fonte: IEL, 2018, p. 34

No Quadro 32, tem-se um mapa geral dos *clusters* tecnológicos apresentados acima, associando estes às categorias analíticas escolhidas para a avaliação e a prospecção, relacionando-os entre si quanto a alguns aspectos: tipos de inovação, o estágio de desenvolvimento, intensidade da mudança tecnológica, contribuição do *cluster* para outros,

espectro e impacto. Nota-se uma interligação entre a maioria dos termos. Nenhum deles está isolado sem que esteja relacionado a outro, que tem potencial para gerar inovações radicais e possui também, em sua maioria, propósitos de aplicação de maneira a englobar diversos setores.

Quadro 32 - Mapa dos clusters tecnológicos

CATEGORIAS ANALÍTICAS	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, BIG DATA, NUVEM (IA)	REDES DE COMUNICAÇÃO (REDES)	INTERNET DAS COISAS (IOT)	PRODUÇÃO INTELIGENTE E CONECTADA (PIC)	MATERIAIS AVANÇADOS (MA)	NANOTECNOLOGIA (NANO)	BIOTECNOLOGIA (BIO)	ARMAZENAMENTO DE ENERGIA (AE)
TIPOS DE INOVAÇÕES	Produto, processos, insumos, organizacional, infraestrutura e mercado	Produto, infraestrutura e mercado	Produto, processos, insumos, organizacional, infraestrutura e mercado	Processo, organizacional e mercados	Produto, insumos e mercados	Produto, insumos, processos e mercados	Produto, insumos, processos e de mercados	Produto, processo e de mercado
ESTÁGIO DE DESENVOLVIMENTO	Predominam tecnologias em mutação	Convivem tecnologias maduras e em seleção	Predominam tecnologias em mutação	Convivem tecnologias em seleção e em mutação	Convivem tecnologias maduras, em seleção e em mutação	Convivem tecnologias em seleção e em mutação	Convivem tecnologias maduras e em mutação	Convivem tecnologias maduras e em seleção
INTENSIDADE DA MUDANÇA TECNOLÓGICA	Incremental com potencial radical	Predomina incremental	Incremental com potencial radical	Incremental com potencial radical	Predomina incremental	Predomina radical	Incremental com potencial radical	Predomina incremental
CONTRIBUIÇÃO DO CLUSTER PARA OUTROS	Geral: IoT, REDES, PIC, MA, NANO, BIO, AE	Localizada: IA, IoT, PIC, AE	Geral: IA, REDES, PIC, MA, NANO, BIO, AE	Localizada: MA, NANO, BIO	Localizada: REDES, NANO, AE	Geral: IoT, REDES, PIC, MA, BIO, AE	Localizada MA, NANO	Localizada IoT, REDES, PIC
ESPECTRO	Propósito geral	Propósito geral	Propósito geral	Propósito específico: processos industriais	Propósito específico: equipamentos	Propósito geral	Propósito específico: humana, indústria, agricultura	Propósito específico: eletrificação autônoma e conservação de energia
IMPACTO	Predomina potencial disruptivo até 2027	Convivência: moderado e potencial disruptivo até 2027	Predomina potencial disruptivo até 2027	Predomina potencial disruptivo até 2027	Convivência: moderado, potencial disruptivo e disruptivo	Predomina potencial disruptivo até 2027	Disruptivo	Predomina moderado

Fonte: IEL, 2018, p. 35.

O estudo entende como potencial disruptivo a maioria dos *clusters*, conjuntos de inovações radicais. Assim como os outros estudos apresentados no decorrer desta dissertação, o estudo brasileiro apresenta expectativas de que as tecnologias que englobam a indústria 4.0 impactem de forma profunda nos mais diversos setores da sociedade, alterando mercado de trabalho, processos de produção e gestão, a lógica de diversos mercados e até mesmo impactando nas relações de competitividade internacional.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Alguns estudos denominam as mudanças atuais como “quarta revolução industrial”, uma alusão às revoluções industriais passadas, dando um caráter abrangente e profundo quanto às consequências das novas tecnologias. Este estudo limitou-se, especialmente no capítulo 2, a analisar as tecnologias associadas à “indústria 4.0” e “manufatura avançada”, termos utilizados segundo os programas governamentais que lhes deram origem (Europa e EUA). Fizemos no capítulo 3 uma rápida avaliação das tecnologias da indústria 4.0, que são apontadas como componentes de uma “revolução”.

A análise realizada permitiu identificar padrões que possibilitam traçar um perfil das tecnologias e conceitos que mais vêm sendo tratados como componentes da indústria 4.0. Com base nas características das publicações científicas, os aspectos tratados foram o número de publicações, as áreas de estudo, os países e as instituições de financiamento das publicações. As frequências dos termos selecionados em publicações, em especial nos últimos anos, mostram o “compromisso” (crescimento nos últimos anos) das instituições por meio das pesquisas relacionadas a determinadas tecnologias, com as tecnologias que estão emergindo na indústria 4.0.

Apesar de apresentar limitações, a análise bibliométrica utilizada na presente dissertação 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; (iv) diversas pesquisas são realizadas internamente nas empresas, o que faz com que haja pesquisas não divulgadas, por exemplo, por estarem relacionadas a segredos industriais. Os nossos resultados mostraram que as empresas pouco apoiaram as pesquisas que produziram publicações. Este último aspecto pode representar um obstáculo à mensuração das atividades de desenvolvimento tecnológico internas nas empresas. Entretanto, faz-se importante destacar que as etapas iniciais de tecnologias nascentes são, em geral, financiadas por instituições públicas. Exemplos podem ser encontrados no primeiro capítulo, que trata das “Revoluções Industriais”.

A discussão sobre o termo “indústria 4.0” teve o intuito de observar as aplicações das novas tecnologias na manufatura. Dessa forma, o termo por si só já possui um viés para as aplicações das tecnologias voltadas para o processo da transformação digital na indústria. Todavia, nossos resultados mostram que muitas das tecnologias analisadas podem abranger aplicações em diversos setores da sociedade. O conjunto de tecnologias selecionado, que sustenta as transformações em curso, tem diversas denominações e, aparentemente, amplo leque de possibilidades.

A presença dos termos que se referem à indústria 4.0 é, em sua ampla maioria, recente nas publicações analisadas e apresentam elevada taxa de crescimento nos últimos anos. O recente e elevado crescimento no interesse científico nesse campo é um bom indicador de que as tecnologias selecionadas são nascentes ou emergentes, avalizando a proposta deste estudo.

As publicações científicas com o termo indústria 4.0 surgem em 2011 e, desde então, teve um crescimento acelerado. Outros termos também apareceram recentemente e apresentam comportamento similar, especialmente “manufatura inteligente” e “quarta revolução industrial”. Quanto à frequência de publicações, “indústria 4.0” e “manufatura avançada” destacam-se. A utilização desses termos parece estar fortemente relacionada com o país/região da publicação, Europa ou EUA, respectivamente.

Com relação às tecnologias base selecionadas na seção 2.3, conforme Hermann, Pentek, Otto (2015), um único termo, internet dos serviços, sofreu queda nas citações do período. As demais expressões apresentaram frequências cada vez maiores nos anos recentes. Os termos “sistemas ciberfísicos” e “IoT” são de fato tecnologias fundamentais para a indústria 4.0, especialmente o primeiro, que possui aplicações em diversas áreas e setores e é imprescindível para a transformação digital.

As áreas tecnológicas discutidas, selecionadas no estudo realizado no MIT, retornaram uma frequência relativamente baixa dos termos, com exceção da “robótica”. Essa tecnologia tornou-se relevante e apresentou elevadas frequências já na década de 1980, pois integrava as tecnologias da Terceira Revolução Industrial. Apesar de bibliometricamente as demais áreas apresentarem frequências baixas, a importância delas é corroborada não somente pelo estudo realizado pelo MIT, mas também pelas tecnologias apontadas por outros estudos analisados na presente dissertação.

Por exemplo, as tecnologias relacionadas à digitalização nas indústrias são viabilizadas pela captação de informações do ambiente real e engloba-se na área “sensoriamento avançado”. Outro exemplo é o termo “*smart automation*”, que representa um

fundamento da indústria 4.0, que é a automação inteligente (interligada e com capacidade de adaptação e aprendizado), aparece como a área tecnológica mais promissora no estudo do MIT, entretanto possui uma frequência baixa. Essa área abrange diversas outras tecnologias que são fundamentais ao processo. Além da discussão realizada no decorrer da dissertação, isso pode ser percebido também bibliometricamente, em que tecnologias com o intuito de aumentar a “inteligência” da automação como a IoT, IA, entre outras, aparecem com valores significativos.

Nos termos selecionados com base na OCDE (2017), percebe-se que as tecnologias que habilitam a capacidade de captação, armazenamento, interpretação dos dados e incremento da capacidade de customização da manufatura e de bens (representado pelos termos “impressão 3D” e “manufatura aditiva”) possuem destaque. Essas tecnologias estão associadas não somente às aplicações na manufatura, mas também a diversos setores, como saúde e serviços.

Uma tecnologia que chama a atenção é a inteligência artificial. Desde 2010, além dos resultados serem elevados, o que indica ser um termo pesquisado há mais tempo, houve uma aceleração no número de estudos científicos, fato corroborado pelos resultados bibliométricos para os termos “*machine learning*” e “*deep learning*”. A primeira, é uma parte integrante da IA, são sistemas que conseguem acessar um grande número de dados, analisá-los e aprender a partir deles sem que seja explicitamente programado para isso, sendo um programa capaz de aprender. O “*deep learning*” vai além do “*machine learning*”; também é um componente da IA e busca simular decisões humanas utilizando redes neurais. Essas tecnologias possuem destaque por serem tecnologias-chave na capacidade de interpretação de dados por máquinas.

Apesar de este estudo estar focado nos termos que possuem aplicações na manufatura, durante o desenvolvimento da dissertação foi perceptível a relevância das tecnologias digitais na saúde, especialmente na medicina e na biotecnologia. As novas tecnologias permitem tratamentos personalizados, maior rapidez e diminuição de custos no mapeamento genético e a edição genética. Ademais, possibilitam a criação de métodos de produção de medicamentos e organismos sintéticos antes inviáveis. Os resultados bibliométricos dos termos “medicina de precisão” e “Crispr/Cas9” corroboram a afirmação de que há pesquisas em tecnologias novas da genética, como o “Crispr/Cas9”, termo citado pela primeira vez em uma publicação em 2012, que conhece elevado crescimento até 2018.

A bibliometria das áreas de estudo revela a importância da “ciência da computação” e das “engenharias”. Isso justifica-se devido às tecnologias, em sua maioria, terem aplicações

industriais e estarem relacionadas à digitalização. Na área da saúde, a edição genética assume o protagonismo, como mostrado pelas discussões da dissertação, especialmente na seção 3.2. Na área de criação de materiais mais eficientes, “ciências de materiais” se destaca. 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 países que se destacam no número de publicações científicas que contêm os termos selecionados são os EUA e a China, responsáveis pelas publicações de grande parte dos termos. Considerando que os EUA tiveram papel destacado na Terceira Revolução Industrial, adquirindo capacitações tecnológicas e científicas essenciais para o processo atual, deve-se realçar o desempenho chinês nas publicações relacionadas ao processo da “indústria 4.0”. Especialmente nos últimos anos, a performance da China é digna de nota no tocante ao número de publicações científicas nos termos analisados. Essa evolução está associada à política para a manufatura chinesa (*Made in China 2025*). Dessa forma, percebe-se que esses países estão se empenhando para a geração de inovações, criando um ambiente com *oportunidades tecnológicas* para as instituições de pesquisa, pesquisadores e empresas.

O Brasil somente aparece entre os cinco primeiros em um termo dos selecionados para a presente dissertação, que foi na tecnologia apontada pela OCDE, “integração humano-máquina”, termo com baixa frequência, sendo que o país possui somente três publicações (vide Quadro 17). Com relação aos financiamentos, no termo dos clusters “materiais avançados” e “nanotecnologia”, no termo “materiais de valor agregado”, três instituições aparecem dentre as cinco principais (vide Quadro 26). Porém, o termo apresenta baixa frequência e são poucas publicações financiadas, um número de 12. Apesar do Projeto I2027, percebe-se o baixo desempenho a nível de publicações científicas nos termos. Assim, no primeiro passo para a geração de inovações que é a ciência, o Brasil é falho.

As fontes de financiamento que mais se destacam quanto ao patrocínio de publicações científicas analisadas são instituições de pesquisa governamentais. Com esse resultado, associado ao fato de que as empresas tiveram participação bastante reduzida, por um lado, e crescimento nos anos recentes e o apoio institucional (vide a seguir), por outro, pode-se intuir que os termos e tecnologias pesquisadas são, de fato, emergentes.

A instituição que mais se destacou foi a “*National Natural Science Foundation of China*” (NSFC), que apareceu com valores maiores do que a maioria das demais instituições.

Outra instituição chinesa que se destacou entre as que mais financiaram foi a “*National Basic Research Program of China (973 Program)*”. Isso demonstra o esforço científico chinês no que se refere a pesquisas relacionadas aos temas relativos aos termos que caracterizam a indústria 4.0. Também se destacou na maioria dos termos a instituição “*National Science Foundation*”, norte-americana. Nos termos relacionados à saúde, a “*National Institutes Of Health*” destacou-se em relação às demais. Importante ressaltar que a NFSC tem destaque em todas as categorias de termos trabalhados no decorrer da dissertação.

As inovações, sejam radicais ou incrementais, embasam a indústria 4.0. Conforme mostrado no primeiro capítulo, a inovação é fundamental para o desenvolvimento socioeconômico. No entanto, não é um processo simples, pois possui características que dificultam sua geração e difusão. A incerteza associada é um dos maiores obstáculos, especialmente nas fases iniciais de desenvolvimento das tecnologias. Assim, o financiamento público e a criação de estratégias nacionais podem criar um ambiente propício para a geração de inovações.

Como vimos no primeiro capítulo, há uma relação entre a inovação e a ciência básica, que carece de mecanismos de integração para resultar em inovações e tecnologias que poderão vir a ser comercializadas pelas empresas. Nações, como os EUA, a China, a Índia, Alemanha e Reino Unido possuem ou desenvolvem um sistema de inovações que se adequa melhor às mudanças inovativas que surgirão com o advento da indústria 4.0 por se destacarem na análise bibliométrica.

A hipótese da dissertação de que os conceitos da indústria 4.0 ainda estão em construção e que, ao longo dos anos, haveria uma intensificação das publicações científicas confirmou-se. É um tema estudado que possui conceitos e tecnologias, na maioria dos casos, recentes, cujas pesquisas estão sendo publicadas há poucos anos, com um aumento numérico, especialmente a partir de 2014. Assim, o objetivo do estudo foi alcançado, seja no que se refere aos termos representativos da indústria 4.0, seja ao traçar as características das publicações científicas anexadas à base de dados Scopus.

As tecnologias da indústria 4.0 encontram-se em desenvolvimento e, por ainda estarem em curso, as aplicações e consequências advindas estão, em sua maioria, no campo da previsão. Sendo assim, é muito difícil afirmar se realmente há uma revolução industrial em andamento. Todavia, entre os conceitos e tecnologias que compõem a indústria 4.0, é perceptível que a digitalização é parte essencial do processo, uma tecnologia que tem suas raízes diretamente ligadas ao paradigma da microeletrônica, característico da Terceira

Revolução Industrial nas décadas dos anos 1980 e 1990. Desse modo, na hipótese de uma nova revolução estar em andamento, seja “tecnológica” ou “industrial”, e fazendo um paralelo com as características das revoluções anteriores (vide item 1.2), parece que o processo da indústria 4.0 tem o setor de serviços como central.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, C. A. **Bibliometria**: evolução histórica e questões atuais. Em *Questão*. Porto Alegre: vol. 12, n. 1, p. 11-32, 2006. In: LOPES, S. *et al.* A bibliometria e a avaliação da produção científica: indicadores e ferramentas. *Actas dos Congressos Nacionais de Bibliotecários, Arquivistas e Documentalistas*, n. 11, 2012. Disponível em: <<http://www.bad.pt/publicacoes/index.php/congressosbad/issue/view/10>>. Acesso em: 1 de Abril de 2019.
- ASHTON, T. S. (1963) *The industrial revolution in Great Britain*. In: FREEMAN, C.; SOETE, L. A economia da inovação industrial. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.
- BEIS – DEPARTMENT FOR BUSINESS, ENERGY & INDUSTRIAL STRATEGY. **Industrial Strategy**: building a Britain fit for the future. Policy paper, 2019. Disponível em: <<https://www.gov.uk/government/publications/industrial-strategy-building-a-britain-fit-for-the-future>>. Acesso em: 09 de dezembro de 2019.
- BMBF - FEDERAL MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH. **High-Tech Strategy 2020 for Germany**. Berlim: Innovation Policy Framework Division, 2010. Disponível em: <<https://www.manufacturing-policy.eng.cam.ac.uk/documents-folder/policies/germany-ideas-innovation-prosperity-high-tech-strategy-2020-for-germany-bmbf/view>>. Acesso em: 25 de maio de 2019.
- BOUSTANY, J. *La production des imprimés non-périodiques au Liban de 1733 à 1920: étude bibliométrique*. 1997. Tese (Doutorado em *Sciences de l'Information et de la Communication*) – Université Michel de Montaigne – Bordeaux III, Bordeaux. 1997. In: SANTOS, R. N. M.; KOBASHI, N. Y. Bibliometria, cientometria, infometria: conceitos e aplicações. *Tendências da Pesquisa Brasileira em Ciência da Informação*, Brasília, v.2, n.1, p.155-172, jan./dez., 2009.
- CHUEKE, G. V.; AMATUCCI, M. **O que é bibliometria?** Uma introdução ao Fórum. *Revista Eletrônica de Negócios Internacionais da ESPM*. São Paulo: v. 10, n. 2, p. 1-5, mai./ago. 2015.
- CLAUDIA, A. et al. A modularização e a indústria 4.0. **II Simpósio Gaúcho de Engenharia de Produção**, Rio Grande do Sul, 17 e 18 Ago. 2017.
- CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Desafios para a indústria 4.0 no Brasil**. Brasília: CNI, 2016.
- CNI - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Oportunidades para a indústria 4.0**: aspectos da demanda e oferta no Brasil. Brasília: CNI, 2017.
- DATHEIN, R. **Inovação e Revoluções Industriais**: uma apresentação das mudanças tecnológicas determinantes nos séculos XVIII e XIX. DECON Textos Didáticos 02/2003. DECON/UFRGS, 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. Rio de Janeiro, n. 44, p. 5-45, set., 2016.

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

DOSI, G. (1984). **Mudança Técnica e Transformação Industrial: a teoria e uma aplicação à indústria dos semicondutores**. Campinas: Editora da Unicamp, 2006.

DOSI, G. (1988). *Sources, Procedures and Microeconomic Effects of Innovation*. Tradução de José Ricardo Fucidji. Journal of Economic Literature, vol. XXVI, n. 3, p. 1120-1171, set., 1988.

ELSEVIER. *Scopus: content coverage guide*. Ago., 2017. Disponível em: <https://www.elsevier.com/_data/assets/pdf_file/0007/69451/0597-Scopus-Content-Coverage-Guide-US-LETTER-v4-HI-singles-no-ticks.pdf>. Acesso em: 06 de dezembro de 2019.

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

FIRJAN. **Panorama da inovação: indústria 4.0**. Rio de Janeiro, abr. 2016.

FREEMAN, C.; PEREZ, C. (1988). *Structural crises of adjustment: business, cycles and investment behaviour*. In: Dosi *et al.* (Orgs.). **Technical change and economic theory**. London: Pinter Publishers, 1988.

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

HENG, S. **Industry 4.0: Upgrading of Germany's industrial capabilities on the horizon**. Frankfurt: Deutsche Bank Sector Research, abr., 2014. Disponível em: <http://www.dbresearch.com/PROD/RPS_EN-PROD/PROD0000000000451959/Industry_4_0%3A_Upgrading_of_Germany%E2%80%99s_industrial_ca.pdf>. Acesso em: 20 de maio de 2019.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. **Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review**. Dortmund: Technische Universität Dortmund, n. 01, 2015.

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

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. Em <<https://www.cs.vassar.edu/~ide/papers/ICGL10.pdf>> Acesso em: 19 de outubro de 2018.

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

IEL – INSTITUTO EUVALDO LODI. **Mapa de clusters tecnológicos e tecnologias relevantes para competitividade de sistemas produtivos**. Brasília: IEL/NC, 2017.

KAGERMANN, H.; LUKAS, W.; WAHLSTER, W. *Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution*. VDI nachrichten, n.13, 2011. In: HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. Dortmund: Technische Universität Dortmund, n. 01, 2015.

JADHAV, V. V.; MAHADEOKAR, R. *The Fourth Industrial Revolution (I4.0) in India: Challenges & Opportunities*. IJTSRD, Mar., 2019.

KLING, S. J.; ROSENBERG, N. *An overview of innovation*. In: LANDAU, R.; Nathan ROSENBERG, N. (Orgs.). *The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth*. California: National Academy of Engineering, 1986.

LA ROVERE, R. L. Paradigmas e trajetórias tecnológicas. In: PELAEZ, V.; SZMRECSÁNYI, T. (Orgs.). **Economia da inovação tecnológica**. São Paulo: Hucitec, 2006.

LA ROVERE, R. L. *Trajectoires de modernisation industrielle: une approche sectorielle*. Tese (doutorado em ciências econômicas). Université Paris VII, 1990. In: LA ROVERE, R. L. Paradigmas e trajetórias tecnológicas. In: PELAEZ, V.; SZMRECSÁNYI, T. (Orgs.) **Economia da inovação tecnológica**. São Paulo: Hucitec, 2006.

LOPES, S. *et al.* **A bibliometria e a avaliação da produção científica**: indicadores e ferramentas. *Actas dos Congressos Nacionais de Bibliotecários, Arquivistas e Documentalistas*, n. 11, 2012. Disponível em: <<http://www.bad.pt/publicacoes/index.php/congressosbad/issue/view/10>>. Acesso em: 1 de Abril de 2019.

NRF - NATIONAL RESEARCH FOUNDATION OF KOREA. **About NRF**. Government of Korea. Disponível em: <<http://www.nrf.re.kr/eng/page/9439993c-2105-4834-b000-7b4dc15b3f39>>. Acesso em: 20 de dezembro de 2019.

NSFC - NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA. **NSFC at a Glance**. 2019. Disponível em: <http://www.nsf.gov.cn/english/site_1/about/6.html>. Acesso em: 15 de dezembro de 2019.

NSERC - NATURAL SCIENCES AND ENGINEERING RESEARCH COUNCIL OF CANADA. **About NSERC**. 2019. Disponível em: <https://www.nserc-crsng.gc.ca/NSERC-CRSNG/Index_eng.asp>. Acesso em: 21 de dezembro de 2019.

NVIDIA. **NVIDIA Brochure**. 2019. Disponível em: <<https://www.nvidia.com/content/dam/en-zz/Solutions/about-us/documents/NVIDIA-Brochure-2019.pdf>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2019.

MEITY - MINISTRY OF ELECTRONICS AND INFORMATION TECHNOLOGY. **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 de dezembro de 2019.

MGI - MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. **Manufacturing the future: The next era of global growth and innovation.** Nov., 2012. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Operations/Our%20Insights/The%20future%20of%20manufacturing/MGI_Manufacturing%20the%20future_Executive%20summary_Nov%202012.ashx>. Acesso em: 13 de dezembro de 2019.

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

OCDE – ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. **Enabling the next production revolution: the future of manufacturing and services - interim report.** Paris: Meeting of the OECD Council at Ministerial Level, jun., 2016.

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

PAVITT, K. **Padrões Setoriais de Mudança Tecnológica: rumo a uma taxonomia e uma teoria.** Tradução de José Ricardo Fucidji. Amsterdã: Science Policy Research, vol. 13, n. 6, p. 343-373, dez., 1984.

PCAST - PRESIDENT'S COUNCIL OF ADVISORS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY. ***Report to the president on ensuring american leadership in advanced manufacturing.*** Washington: PCAST, jun., 2011. Disponível em: <<https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-advanced-manufacturing-june2011.pdf>> Acesso em: 20 de maio de 2019.

SANCHO, R. ***Indicadores bibliométricos utilizados en la evaluación de la ciencia y la tecnología: revisión bibliográfica,*** p. 77-106, 2002. In: LOPES, S. *et al. A bibliometria e a avaliação da produção científica: indicadores e ferramentas. Actas dos Congressos Nacionais de Bibliotecários, Arquivistas e Documentalistas*, n. 11, 2012. Disponível em: <<http://www.bad.pt/publicacoes/index.php/congressosbad/issue/view/10>>. Acesso em: 1 de Abril de 2019.

SANTOS, R. N. M.; KOBASHI, N. Y. **Bibliometria, cientometria, infometria: conceitos e aplicações.** Tendências da Pesquisa Brasileira em Ciência da Informação, Brasília, v.2, n.1, p.155-172, jan./dez., 2009.

SCHUMPETER, J. A. (1934). **Teoria do desenvolvimento econômico.** Tradução de Maria Sílvia Possas. São Paulo: Nova Cultural, 1997.

SCHUMPETER, J. A. (1942). **Capitalismo, socialismo e democracia.** Tradução de Ruy Jungmann. Rio de Janeiro: Fundo de Cultura, 1961.

SCHWAB, K. *The fourth industrial revolution*. Geneva: World Economic Forum, 2016.
SEADE, PORTAL DE ESTATÍSTICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Em:
<<http://www.seade.gov.br/>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2019.

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

SUPPLE, B. (1963) *The Experience of Economic Growth: Case Studies in Economic History*. New York: Random House. In: FREEMAN, C.; SOETE, L. A economia da inovação industrial. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

STOKES, D. E. *Pasteur's quadrant: basic science and technological innovation*. Washington, D.C.: Brookings Institution Press, 1997.

SZMRECSÁNYI, T. A herança shumpeteriana. In: PELAEZ, V.; SZMRECSÁNYI, T. (Orgs.). **Economia da inovação tecnológica**. São Paulo: Hucitec, 2006.

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

VON TUNZELMANN, G. N. (1995) *Technology and Industrial Progress: The Foundations of Economic Growth*. Cheltenham: Elgar. In: FREEMAN, C.; SOETE, L. A economia da inovação industrial. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

WÜBBEKE, J. et al. *Made In China 2025: The making of a high-tech superpower and consequences for industrial countries*. Berlim: MERICS – Mercator Institute For China Studies, n. 2, dez., 2016. Disponível em: <https://www.merics.org/sites/default/files/2017-09/MPOC_No.2_MadeinChina2025.pdf>. Acesso em: 20 de maio de 2019.