

**JOSÉ SALVADOR DA MOTTA REIS**

**Proposta de Framework para superar os desafios e explorar oportunidades da  
sustentabilidade por meio da indústria 4.0**

**José Salvador da Motta Reis**

**Proposta de Framework para superar os desafios e explorar oportunidades da sustentabilidade por meio da indústria 4.0**

Dissertação de Mestrado apresentado à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na área de Gestão Organizacional.

Orientador: Prof. Dr. Otávio José de Oliveira  
Coorientador: Prof. Dr. Fernando Celso de Campos

R375p	Reis, José Salvador da Motta Proposta de Framework para superar os desafios e explorar oportunidades da sustentabilidade por meio da indústria 4.0 / José Salvador da Motta Reis – Guaratinguetá, 2021 89 f. : il. Bibliografia: f. 65  Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Otávio José de Oliveira Coorientador: Prof. Dr. Dr. Fernando Celso de Campos  1. Inovações tecnológicas. 2. Indústria. 3. Sustentabilidade. I. Título.
-------	--

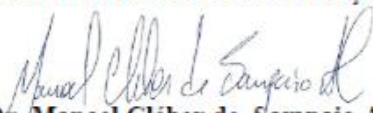
CDU 62.001.38(043)

JOSÉ SALVADOR DA MOTTA REIS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO”

PROGRAMA: ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**



**PROF. DR. OTÁVIO JOSÉ DE OLIVEIRA**

Orientador / UNESP/FEG

participou por videoconferência



**PROFa. DRa. ROSANE APARECIDA GOMES BATTISTELLE**

UNESP/FEB

participou por videoconferência

LUIS CESAR FERREIRA MOTTA  
BARBOSA:33699447820

Assinado de forma digital por LUIS CESAR  
FERREIRA MOTTA BARBOSA:33699447820  
Dados: 2021.09.28 15:34:57 -03'00'

**PROF. DR. LUIS CESAR FERREIRA MOTTA BARBOSA**

CEFET/RJ

participou por videoconferência

Setembro de 2021

## **DADOS CURRICULARES**

### **JOSÉ SALVADOR DA MOTTA REIS**

<b>NASCIMENTO</b>	05.02.1992 – Resende / RJ
<b>FILIAÇÃO</b>	Ataulgo Firmo Reis Maria Rosangela da Motta Reis
<b>2012/2016</b>	Graduação em Engenharia Mecânica, nível Bacharel, Centro Universitário de Volta Redonda.
<b>2017/2018</b>	Pós-graduação em Engenharia da Qualidade, nível Especialização, Associação Educacional Dom Bosco.
<b>2020/2020</b>	Pós-graduação em Tutoria em Educação a Distância e Docência do Ensino Superior, nível Especialização, Universidade Candido Mendes.

Dedico este trabalho aos meus amados pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pelas oportunidades de vida. Agradeço a minha Mãe e ao meu Pai, minha namorada e meu amigo Gabriel;

ao meu orientador, Professor Doutor Otávio José de Oliveira por todo conhecimento, formação que me proporcionou e que também jamais desistiu de mim e deixou de me incentivar;

ao meu coorientador Professor Doutor Fernando Celso de Campos pelo apoio, e conhecimento transferido;

ao Professor Doutor Nilo Antonio de Souza Sampaio pelo apoio, amizade e compartilhamento de experiências;

aos meus caros colegas de estudo, em especial ao Professor Mestre Maximilian Espuny.

A presente pesquisa foi realizada com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.



“Não há nada bom nem mau a não ser estas duas coisas: a sabedoria que é um bem e a ignorância que é um mal.”

Platão

## RESUMO

A Sustentabilidade 4.0 (S4.0) possibilita o desenvolvimento sustentável por meio das tecnologias inteligentes para atender as demandas econômicas, ambientais e sociais. O principal objetivo desta dissertação é propor um *framework* para o desenvolvimento da S4.0 baseada na *Triple Helix* (TH), que considera ações inovadoras em conjunto ou não entre governo, organizações e academia. O *framework* foi elaborado a partir do benchmarking das políticas e iniciativas identificadas no Cenário Técnico-Científico da S4.0 (CTC-S4.0) acrescidas das análises do autor, contemplando estratégias, tecnologias e iniciativas que possam ser desenvolvidas e/ou adotadas pelos setores da TH. O estudo foi desenvolvido utilizando um método combinado de análise bibliométrica e análise de conteúdo de artigos científicos da base de dados Scopus e publicações técnicas (patentes, artigos, publicações de órgãos públicos, entre outros) da base de dados Orbit. O framework está estruturado nos três setores da TH, dentro destes três setores estão as proposições e recomendações para desenvolver a sustentabilidade por meio das tecnologias da Indústria 4.0. A principal contribuição científica deste trabalho é expandir e aprofundar o recente bloco de conhecimento sobre S4.0 baseado nos setores da TH, acrescentando-lhe estratégias, iniciativas, desafios e oportunidades para que o desenvolvimento tecnológico baseado na Indústria 4.0 se dê de forma alinhada à sustentabilidade. Quanto às contribuições aplicadas, esta dissertação contribui para tornar o mundo mais sustentável a partir dos elementos tecnológicos da Indústria 4.0 e isto contribui para o alcance dos seguintes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU: 9º (*Industries, Innovation and Infrastructure*), 11º (*Sustainable Cities and Communities*) e 13º (*Climate Action*). Baseada nessas contribuições pode-se dizer que principal novidade da pesquisa é a proposição de políticas e iniciativas voltadas a S4.0 para os setores da TH, estruturadas com base no conhecimento científico e análises do autor.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sustentabilidade 4.0. Indústria 4.0. Objetivos de desenvolvimento sustentável. Tecnologias inteligentes. Triple Helix.

## ABSTRACT

Sustainability 4.0 (S4.0) enables sustainable development through smart technologies to meet economic, environmental and social demands. The main objective of this dissertation is to propose a framework for the development of S4.0 based on the Triple Helix (TH), which considers innovative actions in conjunction or not between government, organizations and academia. The framework was developed from the benchmarking of policies and initiatives identified in the Scientific-Technical Scenario of S4.0 (CTC-S4.0) plus the author's analyses, contemplating strategies, technologies and initiatives that can be developed and/or adopted by TH sectors. The study was developed using a combined method of bibliometric analysis and content analysis of scientific articles from the Scopus database and technical publications (patents, articles, publications from public agencies, among others) from the Orbit database. The framework is structured in the three sectors of TH, within these three sectors are the propositions and recommendations to develop sustainability through Industry 4.0 technologies. The main scientific contribution of this work is to expand and deepen the recent block of knowledge about S4.0 based on the TH sectors, adding to it strategies, initiatives, challenges and opportunities so that the technological development based on Industry 4.0 takes place in a way aligned to sustainability. As for the applied contributions, this dissertation contributes to make the world more sustainable from the technological elements of Industry 4.0 and this contributes to the achievement of the following UN Sustainable Development Goals (SDGs): 9th (Industries, Innovation and Infrastructure), 11th (Sustainable Cities and Communities) and 13th (Climate Action). Based on these contributions one can say that the main novelty of the research is the proposition of policies and initiatives aimed at S4.0 for the sectors of TH, structured on the basis of the author's scientific knowledge and analysis.

**KEYWORDS:** Sustainability 4.0. Industry 4.0. Sustainable development goals. Intelligent technologies. Triple Helix.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável .....	17
Figura 2 – <i>Triple Bottom Line</i> .....	24
Figura 3 – <i>Layout</i> geral de estrutura da Indústria 4.0 .....	27
Figura 4 – Modelo da <i>Triple Helix</i> .....	33
Figura 5 – Fluxo Metodológico .....	36
Figura 6 – Classificação dos países .....	39
Figura 7 – Fluxo de elaboração do <i>framework</i> .....	40
Figura 8 – Grupos de patentes das organizações americanas.....	46
Figura 9 – Grupos de patentes das organizações chinesas .....	49

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – <i>Clusters</i> das 30 lacunas científicas sobre S4.0.....	20
Quadro 2 – Classificação da pesquisa.....	35
Quadro 3 – Palavras-chave utilizadas na busca de patentes.....	38
Quadro 4 – Oportunidades de pesquisa sobre S4.0 .....	56
Quadro 5 – Desafios para o desenvolvimento da S4.0 .....	59
Quadro 6 – Framework para desenvolvimento da S4.0 .....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS

BJUT	<i>Beijing University of Technology</i>
CD	<i>China Datang</i>
CLI	<i>The Cognitive Labor Institute</i>
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CPS	<i>Cyber-physical Systems</i>
CSUB	<i>California State University Bakersfield</i>
CTC-S4.0	Cenário Técnico-Científico da S4.0
CU	<i>Chongqing University</i>
DUT	<i>Dalian University of Technology</i>
FIPK	<i>Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology</i>
HM	<i>Hannover Messe</i>
HTS 2025	<i>High-Tech Strategy 2025</i>
I3D	Impressão 3D
I4.0	Indústria 4.0
IBM	<i>International Business Machines</i>
IPCT	Instituições de Pesquisa, Ciência e Tecnologias
IITD	<i>Indian Institute of Technology Delhi</i>
IA	Inteligência Artificial
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISBDA	<i>The Institute of Smart Big Data Analytics</i>
IWN	<i>Industrial Wireless Network</i>
NIIE	<i>National Institute of Industrial Engineering</i>
NIST	<i>National Institute Standards and Technology</i>
NRBV	<i>Natural Resource Based View</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OECD	<i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PMEs	Pequena e Média Empresas

PUCPR	Pontifícia Universidade Católica do Paraná
QRI	Quarta Revolução Industrial
RA	Realidade Aumentada
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
SC	Segurança Cibernética
SDG	<i>Sustainable Development Goals</i>
SEU	<i>Southeast University</i>
SIET	<i>State Institute of Engineering e Technology</i>
SSM	<i>Sustainable Smart Manufacturing</i>
STT	<i>SunTracker Technologies</i>
S4.0	Sustentabilidade 4.0
TBL	<i>Tripple Bottom Line</i>
TH	<i>Triple Helix</i>
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UM	<i>United Nations</i>
UNIP	Universidade Paulista
VR	<i>Virtual Reality</i>
ZST	<i>Zhejiang Haikang Science &amp; Technology</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1	OBJETIVOS .....	18
1.2	DELIMITAÇÃO DE PESQUISA.....	19
1.3	JUSTIFICATIVA.....	19
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	21
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>23</b>
2.1	SUSTENTABILIDADE .....	23
2.1.1	<b>Pilar Econômico</b> .....	<b>24</b>
2.1.2	<b>Pilar Ambiental</b> .....	<b>25</b>
2.1.3	<b>Pilar Social</b> .....	<b>26</b>
2.2	INDÚSTRIA 4.0 .....	26
2.2.1	<i>Cyber-Physical Systems</i> .....	28
2.2.2	<i>Internet of Things</i> .....	28
2.2.3	<i>Big Data</i> .....	29
2.2.4	<b>Robôs Autônomos</b> .....	29
2.2.5	<b>Realidade Aumentada</b> .....	30
2.2.6	<b>Manufatura Aditiva</b> .....	30
2.2.7	<i>Cloud Computing</i> .....	30
2.2.8	<b>Segurança Cibernética</b> .....	31
2.2.9	<b>Simulação</b> .....	31
2.3	SUSTENTABILIDADE 4.0 .....	32
2.4	TRIPLE HELIX .....	33
<b>3</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	<b>35</b>
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	35
3.2	FLUXO METODOLÓGICO .....	36
3.2.1	<b>Etapa I</b> .....	<b>36</b>
3.2.2	<b>Etapa II</b> .....	<b>37</b>
3.2.3	<b>Etapa III</b> .....	<b>37</b>
3.2.4	<b>Etapa IV</b> .....	<b>39</b>
3.2.5	<b>Etapa V</b> .....	<b>40</b>
3.2.6	<b>Etapa VI</b> .....	<b>41</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>42</b>



4.1	APRESENTAÇÃO DO CTC-S4.0 .....	42
<b>4.1.1</b>	<b>Índia.....</b>	<b>42</b>
4.1.1.1	Governo .....	42
4.1.1.2	Organizações.....	43
4.1.1.3	Academia .....	44
<b>4.1.2</b>	<b>Estados Unidos da América .....</b>	<b>45</b>
4.1.2.1	Governo .....	45
4.1.2.2	Organizações.....	45
4.1.2.3	Academia .....	47
<b>4.1.3</b>	<b>China.....</b>	<b>48</b>
4.1.3.1	Governo .....	48
4.1.3.2	Organizações.....	49
4.1.3.3	Academia .....	51
<b>4.1.4</b>	<b>Alemanha.....</b>	<b>51</b>
4.1.4.1	Governo .....	52
4.1.4.2	Organizações.....	52
4.1.4.3	Academia .....	53
<b>4.1.5</b>	<b>Brasil.....</b>	<b>54</b>
4.1.5.1	Governo .....	54
4.1.5.2	Organizações.....	54
4.1.5.3	Academia .....	55
4.2	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE OPORTUNIDADES E DESAFIOS PARA DESENVOLVER A S4.0 .....	56
<b>4.2.1</b>	<b>Oportunidades para Desenvolver a S4.0 .....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Desafios para Desenvolver a S4.0.....</b>	<b>58</b>
<b>5</b>	<b>FRAMEWORK PARA DESENVOLVIMENTO DA S4.0.....</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>
	<b>APÊNDICE A – PAÍSES .....</b>	<b>80</b>
	<b>APÊNDICE B – PRINCIPAIS INSTITUIÇÕES E AUTORES DO CTC.....</b>	<b>81</b>
	<b>APÊNDICE C – PERIÓDICOS COM MAIS CITAÇÕES.....</b>	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE D – ARTIGOS MAIS CITADOS .....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As atividades humanas já modificaram quase 75% da superfície terrestre, causando consequências negativas à fauna e à flora (UNITED NATIONS, 2020a). O crescimento populacional e os impactos ambientais estão entre as principais causas de doenças e mortes no mundo, das quais estima-se que 25% estão ligadas ao consumo de água imprópria, inalação de ar poluído, contaminação do solo, entre outras. A população nas cidades está acima de 50% e atualmente o estilo de vida urbano têm a maior participação pelas emissões globais dos gases de efeito estufa (SEVIGNÉ ITOIZ *et al.*, 2013; WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2020).

A preservação do planeta requer uma economia baseada em padrões de consumo consciente, isto é, que sejam adequados à capacidade de regeneração da natureza. Organizações sustentáveis são em geral longevas e por isso mantêm maior número de postos de trabalho e receita, resultando, em incremento das ações sociais para a comunidade (BOROWIECKI *et al.*, 2019). O desenvolvimento equilibrado dos pilares da sustentabilidade (ambiental, econômico e social), permitem a sociedade caminhar rumo ao desenvolvimento sustentável (ELKINGTON, 1998).

O desenvolvimento sustentável foi apresentado em 1987 no Relatório Brundtland como a capacidade de atender às necessidades atuais da sociedade sem comprometer as condições básicas de vida das gerações futuras. A sustentabilidade é a manutenção progressiva das capacidades de sustentação dos ecossistemas (ELKINGTON, 1998; KLEWITZ; HANSEN, 2014). Seguindo esta lógica, Elkington (1998), propôs o *Tripple Bottom Line* (TBL) na qual as organizações devem ir além dos resultados do pilar econômico, também contribuindo para as pilares ambiental e social.

Com o objetivo de direcionar melhor as economias globais ao desenvolvimento sustentável, as Nações Unidas propuseram em 2015 a “Agenda 2030”, a qual estabeleceu 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Figura 1) (ELKINGTON, 1998; KLEWITZ; HANSEN, 2014; UNITED NATIONS, 2015).

Figura 1 – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



Fonte: Adaptado de United Nations (2020b).

Em relação a Figura 1, destacam-se os ODS, 9 (*Industries, Innovation and Infrastructure*), 11 (*Sustainable Cities and Communities*) e 13 (*Climate Action*) pois são objetivos que podem ser atingidos por meio do desenvolvimento tecnológico. (ELKINGTON, 1998; KLEWITZ; HANSEN, 2014; UNITED NATIONS, 2015). Em consonância a esses ODS foi lançado o “*Davos Manifesto*” no *World Economic Forum* de 2020. Entre as principais recomendações desse manifesto estão o pagamento justo de impostos, zero corrupção, proteção ao meio ambiente, valorização dos empregados, conduta ética e compromisso com os direitos humanos e do trabalhador. Neste mesmo fórum foram debatidos os impactos da Quarta Revolução Industrial (QRI) no desenvolvimento sustentável (WORLD ECONOMIC FORUM, 2020).

O principal movimento tecnológico da QRI iniciou em 2011 como parte do plano de ação “*High-Tech Strategy 2020*” do governo alemão e foi denominado Indústria 4.0 (BONAVOLONTA *et al.*, 2017; KANG *et al.*, 2016; XU; XU; LI, 2018). Os norte-americanos contribuíram para a QRI com o movimento tecnológico “*Industrial Internet*”, que reúne as organizações e tecnologias necessárias para acelerar o crescimento da Internet Industrial (IICONSORTIUM, 2014). Os chineses também colaboraram com o desenvolvimento da QRI por meio da execução do plano diretor “*Made-in-China 2025*” (MiC2025), criado em maio de 2015 para fomentar o desenvolvimento industrial do país até 2025 (LI, 2018).

Se uma organização quer fazer mais com a sustentabilidade, a Indústria 4.0 pode ajudar a alcançar este objetivo. A Indústria 4.0 pode trazer benefícios econômicos, ambientais e

sociais para as organizações, que, por sua vez, refletem em contribuições para o desenvolvimento sustentável. Isto pode ser explicado pelo fato de que a Indústria 4.0 fornece maneiras de acelerar a racionalização dos processos, resultando em menos desperdício ao longo dos processos, devido ao uso racional e razoável de água, eletricidade, redução das emissões de CO<sub>2</sub>, com uso de menos material no processo de embalagem, tempos de preparação reduzidos, prazos de entrega mais curtos, entre outros (BAI *et al.*, 2020; BRACCINI; MARGHERITA, 2018; STOCK; SELIGER, 2016). O alinhamento da sustentabilidade com a Indústria 4.0 forma uma recente linha de conhecimento chamada Sustentabilidade 4.0 (S4.0), que pode ser entendida como uma estratégia para apoiar a obtenção de um estado de sustentabilidade por meio de tecnologias inteligentes (KIEL *et al.*, 2017; LOZANO, 2020; PRAUSE; ATARI, 2017).

Foram feitos alguns estudos sobre o tema, entre os quais destacam-se Jabbour *et al.* (2018), que identificaram fatores críticos para o sucesso da S4.0 como a abordagem integrada da Indústria 4.0 à produção sustentável; de Kamble *et al.* (2018) and Kiel *et al.* (2017), que abordaram as contribuições da Indústria 4.0 para o desenvolvimento sustentável das organizações, identificando contribuições como aumento da competitividade, redução dos impactos ambientais, aumento da aprendizagem humana, entre outros; de Haseeb *et al.* (2019) and Müller *et al.* (2018), que analisaram estratégias ambientais e sociais como motores para a implementação da S4.0 e desafios para a adequação organizacional que dificultam o uso das tecnologias da Indústria 4.0 em pequenas e médias empresas. Nestes trabalhos supracitados é possível identificar desafios e oportunidades para desenvolver a S4.0 (Apêndice D).

Neste contexto, os três setores da *Triple Helix* (TH), governo, organizações e academia, podem fortalecer a S4.0 por meio de estratégias, legislações governamentais, criação e implementação de novas tecnologias inteligentes e o alinhamento das organizações com o desenvolvimento sustentável (KIMATU, 2016; LEYDESDORFF; MEYER, 2006; XU; XU; LI, 2018). Para explorar essas oportunidades e superar esses desafios este trabalho propõe alternativas para desenvolver a S4.0 sob a perspectiva da TH. Diante disso, a questão que norteou o desenvolvimento deste trabalho foi: como é possível desenvolver a sustentabilidade com o auxílio da Indústria 4.0?

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral dessa dissertação é propor um *framework* para o desenvolvimento da S4.0 com base no *benchmarking* das políticas e iniciativas do Cenário Técnico-Científico

sobre S4.0 (CTC-S4.0) acrescentada à análise do autor, contemplando estratégias, tecnologias e iniciativas que podem ser adotadas pelos setores governamentais, organizacionais e acadêmicos da TH.

Em concordância com o objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e analisar os principais países com os melhores indicadores técnicos e científicos no tema da S4.0;
- Identificar nos principais países as organizações, instituições de ensino e pesquisadores que tenham ações, iniciativas, práticas e/ou desenvolvem pesquisas voltadas a S4.0;
- Elaborar o CTC-S4.0; e
- Identificar na literatura oportunidades e desafios para desenvolver a S4.0.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DE PESQUISA

A elaboração desta pesquisa está restrita (delimitação) ao estudo da relação entre sustentabilidade e Indústria 4.0. Desta forma, procurou-se delimitar o escopo de análise em relação ao objeto de estudo (S4.0), quanto aos setores (governo, organizações e academia), fontes de informações (artigos, documentos públicos, patentes, e sites oficiais de organizações e governamentais) e área geográfica (Índia, Estados Unidos da América, China, Alemanha e Brasil).

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O aumento de produção científica e de citações que tratam a Indústria 4.0 em conjunto com a Sustentabilidade evidencia que a junção desses temas tende a ser relevantes e apontam a uma nova tendência de pesquisa. Apesar das múltiplas abordagens adotadas para estudar o tema, atualmente existe uma visão de que os impactos a longo prazo da Indústria 4.0 no desenvolvimento sustentável ainda não estão claros evidenciando lacunas científicas a serem elucidadas (BONILLA *et al.*, 2018). Essas lacunas científicas reforçam as motivações deste trabalho.

Esta pesquisa teve três motivações para ser realizada. A primeira contribuir para redução da escassez de estudos que relacionam as dimensões da TBL à Indústria 4.0 (BIRKEL; MÜLLER, 2021; MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018). A segunda é conciliar o alto desempenho das indústrias inteligentes sem frustrar as expectativas ecológicas e sociais do consumidor, porque os produtos que causam impactos ambientais e sociais perdem mercado (MENG *et al.*, 2018). A terceira é incentivar as organizações industriais a fabricar produtos *ecofriends* (MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019). Este trabalho indica ações que fomentam o desenvolvimento de tecnologias Indústria 4.0 para melhorar desempenho ambiental. Ao mesmo tempo, encoraja que estas tecnologias não impactem negativamente a rede global de sustentabilidade.

Este trabalho foi elaborado a partir das lacunas identificadas na literatura sobre S4.0. Os 30 artigos inicialmente identificados, propuseram um total de 30 lacunas distintas, que foram agrupadas em seis clusters distintos, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – *Clusters* das 30 lacunas científicas sobre S4.0

Oportunidades de Pesquisa	Autores
Identificar os impactos da Integração entre Sustentabilidade e Indústria 4.0 na Supply Chain	Bag <i>et al.</i> (2018); Luthra and Mangla (2018); Manavalan and Jayakrishna (2019); Yazdi <i>et al.</i> (2018).
Propor estratégias para integrar a sustentabilidade com a Indústria 4.0	Jabbour <i>et al.</i> (2018a); Kiel <i>et al.</i> (2017); Kumar <i>et al.</i> (2018); Lin <i>et al.</i> (2017); Meng <i>et al.</i> (2018); Prause and Atari (2017); Ren <i>et al.</i> (2019); Shim <i>et al.</i> (2018).
Integrar a Gestão de Riscos a S4.0	Birkel <i>et al.</i> (2019); Ghadimi <i>et al.</i> (2019).
Propor novos modelos de processos produtivos sustentáveis com a utilização das tecnologias da Indústria 4.0	Ding (2018); Franciosi <i>et al.</i> (2018); Garrido-Hidalgo <i>et al.</i> (2018); Kamble <i>et al.</i> (2019); Prause (2015).
Identificar e avaliar os impactos da implementação da Indústria 4.0 no TBL	Ardanza <i>et al.</i> (2019); Müller and Voigt (2018).
Identificar as contribuições da S4.0 para governos, organizações e pessoas	Bányai <i>et al.</i> (2019); Batkovskiy <i>et al.</i> (2019); Bonilla <i>et al.</i> (2018); Branger and Pang (2015); Haseeb <i>et al.</i> (2019); Jabbour <i>et al.</i> (2018b); Kamble <i>et al.</i> (2018); Müller <i>et al.</i> (2018); Stock <i>et al.</i> (2018).

Fonte: Próprio autor (2021).

Entre os *clusters* propostos (Quadro 1), estão em destaque os que justificaram especificamente a pesquisa:

- "Identificar e avaliar os impactos da implementação da Indústria 4.0 no TBL"; e
- "Identificar as contribuições da S4.0 para governos, organizações e pessoas".

A lacuna “Identificar e avaliar os impactos da implementação da Indústria 4.0 no prisma do TBL” traz luz a possibilidades de estudos que desenvolvam as três dimensões do TBL por meio das tecnologias da Indústria 4.0. Aborda também possibilidades de pesquisas conciliem o alto desempenho das indústrias inteligentes com o desenvolvimento sustentável (ARDANZA *et al.*, 2019; MÜLLER; VOIGT, 2018).

A lacuna “Identificar as contribuições da S4.0 para o desenvolvimento econômico, social e ambiental de governos, organizações e pessoas” deixa evidente a falta de estudos que relacionem os benefícios da S4.0 os para o desenvolvimento sustentável dos países, para a criação da cultura socioambiental nas organizações e para a melhoria qualidade de vida do dia-a-dia dos cidadãos (BONILLA *et al.*, 2018; BRANGER; PANG, 2015; KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018).

Após a identificação das lacunas voltadas às S4.0 e oportunidades para desenvolver a S4.0, buscou-se elaborar o presente estudo por meio CTC-S4.0. Desta maneira, oportuniza-se a contextualização do CTC-S4.0, visto que para produzir materiais relevantes à realidade nacional, a utilização somente das referências isoladas de iniciativas voltadas a S4.0 não oportunizaria a elaboração do *framework* que pode ajudar o desenvolvimento sustentável.

Assim, os resultados deste trabalho procuram preencher as lacunas citadas anteriormente e também expandir o recente bloco de conhecimento da S4.0 por meio da formação de novas linhas de pesquisas, para trabalhos futuros e a proposição de práticas que viabilizam o desenvolvimento da S4.0 pelos principais agentes da economia, meio ambiente e sociedade.

#### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em 5 Capítulos mais as Referências e Apêndices. O Capítulo 1 faz uma introdução ao contexto do desenvolvimento da S4.0, apresenta a questão de pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos, a delimitação deste estudo e as motivações para realização desta dissertação.

O Capítulo 2 introduz a fundamentação teórica da literatura científica, tratando dos temas Sustentabilidade, Indústria 4.0, S4.0 e TH. O Capítulo 3 apresenta o método utilizado na pesquisa, expondo a classificação da pesquisa, o fluxo metodológico para o desenvolvimento da pesquisa.

No Capítulo 4 é apresentado o CTC-S4.0 dividido em cinco subitens por países (Índia, Estados Unidos da América, China, Alemanha e Brasil). No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões parciais, o nível de alcance dos objetivos, das contribuições aplicadas e acadêmicas na fase atual de pesquisa. E por fim as referências e apêndices são apresentados.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção a literatura científica é revisada para introduzir os fundamentos teóricos dos temas sustentabilidade, tecnologias da Indústria 4.0, Sustentabilidade 4.0 e *Triple Helix*. Foram priorizados os artigos mais citados na literatura.

### 2.1 SUSTENTABILIDADE

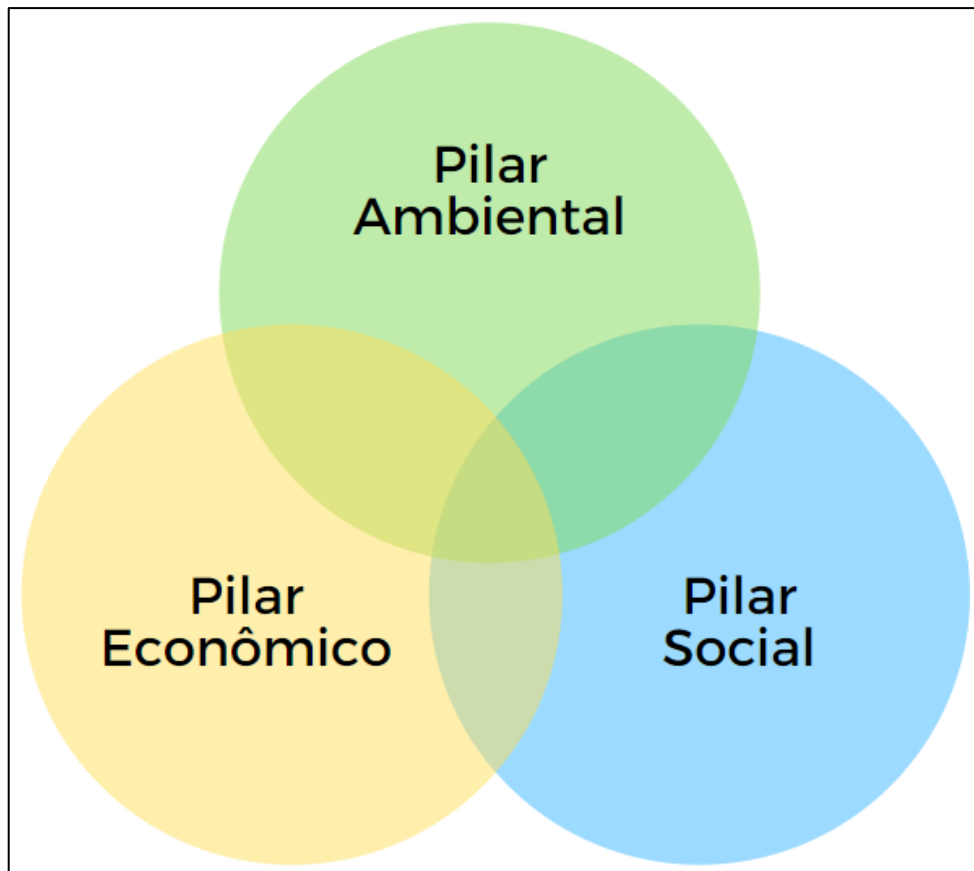
A sustentabilidade é a manutenção progressiva das capacidades de sustentação dos ecossistemas (ENGERT; RAUTER; BAUMGARTNER, 2016; KLEWITZ; HANSEN, 2014; LOZANO, 2020). Na tentativa de alcançar a sustentabilidade surgiu o desenvolvimento sustentável, cujo conceito foi apresentado em 1987 no Relatório Brundtland intitulado “Nosso Futuro Comum” como a capacidade de atender às necessidades atuais da sociedade sem comprometer as condições básicas de vida das gerações futuras. Esse relatório indicou que o consumismo elevado dos países do primeiro mundo e a pobreza dos países do terceiro mundo impediam o desenvolvimento igualitário no mundo, assim produzindo graves crises ambientais (ELKINGTON, 1998; KLEWITZ; HANSEN, 2014; RENOLDNER, 2013).

O desenvolvimento sustentável pode possibilitar a resolução de problemas como o consumo massivo de energia e recursos nos países industrializados, permitindo um desenvolvimento econômico que minimize impactos ecológicos e sociais. Elementos como inovação, produtividade e redução de custos são importantes para a gestão da sustentabilidade, garantindo a sobrevivência em termos econômicos (BAUMGARTNER, 2014).

Para desenvolver e melhorar o nível da sustentabilidade é necessário ir além dos resultados econômicos e também contribuir para o meio ambiente e sociedade. O desenvolvimento sustentável pode ser operacionalizado por meio do TBL (HAHN *et al.*, 2014; KIEL *et al.*, 2017; NUNHES *et al.*, 2021).

Os pilares econômico, ambiental e social formam o TBL (Figura 2), proposto pelo sociólogo britânico John Elkington em 1984. Dentro dos conceitos destes pilares é possível identificar pontos centrais como justiça, equidade e ética no desenvolvimento sustentável (BAUMGARTNER, 2014; ELKINGTON, 1998; GOYAL; RAHMAN; KAZMI, 2015).

Figura 2 – Triple Bottom Line



Fonte: Adaptado de Elkington (1998).

O TBL (Figura 2) o equilíbrio adequado, entre esses três pilares para alcançar a sustentabilidade ou melhorar o nível de sustentabilidade (BAUMGARTNER, 2014; GOYAL; RAHMAN; KAZMI, 2015). O desenvolvimento sustentável pode ser entendido como uma jornada da mudança que compreende etapas da não-sustentabilidade para a sustentabilidade (CÖSTER; DAHLIN; ISAKSSON, 2020; ISAKSSON, 2019; ISAKSSON; BUREGYEYA, 2020).

### 2.1.1 Pilar Econômico

O pilar econômico do TBL muda a visão original onde o foco da organização é apenas no recurso financeiro obtido, passando a ter uma visão abrangente de todos os aspectos econômicos, cuidados com o patrimônio de maneira responsável, renovando equipamentos e ferramentas (HAHN *et al.*, 2014). Assim contribuindo para uma produção e uma prestação de serviços com maior qualidade (BAUMGARTNER, 2014; ELKINGTON, 1998).

O pilar econômico fundamentado os também em conceitos da gestão financeira, especialmente, em relação aos investimentos e orçamentos e a preocupação com a responsabilidade fiscal. São obrigações que se estendem à gestão de documentos fiscais e ao pagamento dos devidos tributos e declarações à Receita (AMINI; BIENSTOCK, 2014; ENGERT; RAUTER; BAUMGARTNER, 2016).

O desenvolvimento econômico sustentável tem foco na produção, distribuição e consumo de bens e serviços. Para atingir o desenvolvimento sustentável governos, organizações e academia não podem lucrar às custas de exploração de trabalho ou de exploração irresponsável ou criminosa ambiental (ELKINGTON, 1998; HOU *et al.*, 2018). A área financeira se beneficia muito de atitudes sustentáveis, pois elas reduzem materiais, energia e água, reduzindo também a conta no fim do mês da organização. Ou seja, há um processo cíclico de benefícios entre sustentabilidade e retorno financeiro (HAHN *et al.*, 2015; LOZANO, 2020).

### **2.1.2 Pilar Ambiental**

O pilar ambiental tem fundamento na preservação ambiental, dos recursos naturais, e na mitigação dos impactos ao meio ambiente ao longo do tempo. Para atingir a sustentabilidade ambiental as organizações precisam buscar formas de realizar suas operações de maneira que causem o menor impacto possível ao meio ambiente (ENGERT; RAUTER; BAUMGARTNER, 2016; LOZANO, 2015). As organizações ambientalmente legítimas podem obter mais segurança no mercado de ações ao contrário de organizações consideradas ambientalmente ilegítimas, viabilizando benefícios na redução de custos, eficiência operacional (MONTIEL; DELGADO-CEBALLOS, 2014).

A administração que busca a sustentabilidade defende a incorporação de preocupações ambientais no projeto e produção do produto, para atingir desenvolvimento sustentável, conforme previsto pela *Natural Resource Based View* (NRBV) (AMINI; BIENSTOCK, 2014). Portanto organizações que criam e preservam questões socioambientais em sua estratégia e modelo de negócios estarão mais preparadas para elevar o nível de sustentabilidade (ECCLES; IOANNOU; SERAFEIM, 2014; ISAKSSON, 2019).

### 2.1.3 Pilar Social

O pilar social do TBL compreende o capital humano (saúde pública, competências e educação), medidas mais amplas de saúde e de potencial de criação de riqueza de uma sociedade. A sustentabilidade social passa pela capacidade das pessoas trabalharem em conjunto e alinhadas para fins comuns em grupos e organizações (ELKINGTON, 1998; LOZANO, 2020).

Este pilar parte do princípio de que a busca por uma sociedade sustentável deve ser alicerçada na sociedade bem cuidada e saudável. Também é importante proporcionar um ambiente de estímulo à criação de relações de trabalho legítimas e saudáveis, para favorecer o desenvolvimento pessoal e coletivo de todos os envolvidos (ENGERT; RAUTER; BAUMGARTNER, 2016; FUENTE *et al.*, 2016; HOU *et al.*, 2018).

Assim é importante avaliar o impacto de uma organização nas pessoas, como por exemplo as relações comunitárias, segurança dos produtos, iniciativas de formação e educação, patrocínios, doações de dinheiro e tempo para a mesa das carruagens, e emprego de grupos desfavorecidos (ELKINGTON, 1998; LOZANO, 2015).

## 2.2 INDÚSTRIA 4.0

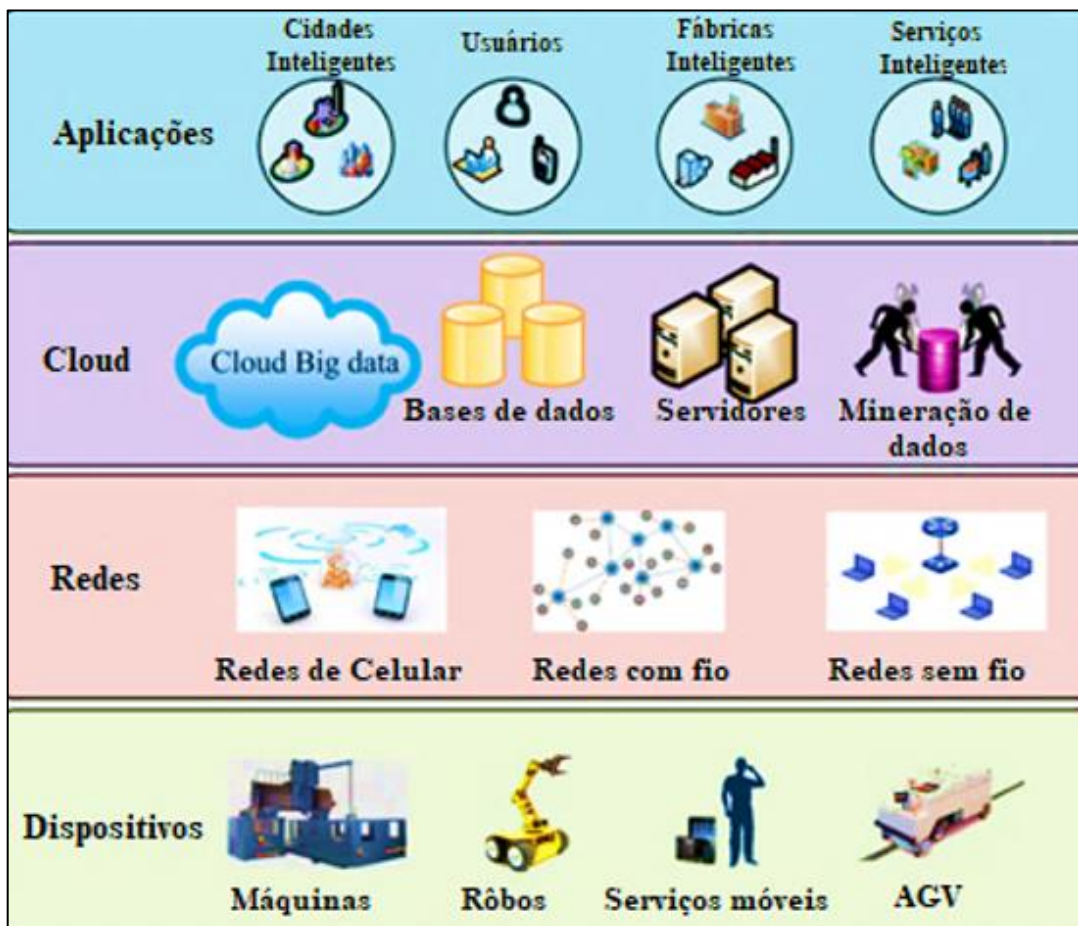
Os avanços tecnológicos na indústria promoveram quatro revoluções com saltos tecnológicos. A Primeira Revolução Industrial fomentou a mecanização nas linhas de produção por meio da máquina a vapor, a Segunda Revolução introduziu a eletricidade no processo produtivo e a Terceira Revolução implementou a eletrônica, internet e tecnologias digitais dentro das organizações, já orientando as empresas industriais a produção inteligente (LASI *et al.*, 2014). Na sequência, a QRI com características de digitalização, otimização, automação, interação homem-máquina e troca automática de dados (LU, 2017).

A QRI compreende a mudança de paradigma do processo automatizado para o processo inteligente, na qual os ambientes físicos e virtuais se unem em um ambiente ciberfísico para melhorar os processos por meio do compartilhamento de informações em tempo real entre máquinas, fornecedores, clientes, para apoiar processos de automação industrial e fomentar a colaboração empresarial por meio de técnicas avançadas de planejamento distribuído entre diferentes setores, gestão de logística integrada e interoperabilidade de sistemas de informação (BONAVOLONTA *et al.*, 2017; THOBEN; WIESNER; WUEST, 2017).

Portanto, esta transformação baseia-se no uso intensivo de tecnologias digitais e de outros tipos de tecnologias, que são profundamente interdependentes entre si. Logo, a QRI engloba inovações tecnológicas (automação e tecnologia da informação) para a manufatura e processos mais rápidos, flexíveis e eficientes, unindo recursos físicos e digitais (CUFFOLILLI; MUSCIO, 2018; ROBLEK; MEŠKO; KRAPEŽ, 2016)

Com a implementação das tecnologias da Indústria 4.0 foram criadas as Fábricas Inteligentes que são fundamentadas na utilização coletiva de tecnologias gerenciadas por sistemas autônomos com sensores (LASI *et al.*, 2014), estruturadas em quatro componentes principais: camada física, rede, nuvem e aplicativo. (LI *et al.*, 2017), como pode ser conferido na Figura 3.

Figura 3 – *Layout* geral de estrutura da Indústria 4.0



Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2017).

As máquinas, robôs, dispositivos móveis, operários, AGV e entre outros (Figura 3), são dispositivos inteligentes que constituem a camada física para aquisição e processamento de dados. As *Clouds* e *Big Datas* são responsáveis pelo armazenamento de dados e alta

performance de computação. As redes são formadas por celulares ou *Industrial Wireless Networks* (IWN). A camada de aplicativos envolve as cidades inteligentes, usuários, empresas inteligentes e serviços inteligentes. (LI *et al.*, 2017). Para implementação de uma Fábrica Inteligente faz-se necessário a combinação de tecnologias da Indústria 4.0 (ZAWADZKI; ŻYWICKI, 2016).

Há um conjunto de nove tecnologias principais envolvidas na QRI entre outras, que vem sendo chamadas de tecnologias habilitadoras para a Indústria 4.0. Essas tecnologias compreendem nove diferentes recursos tecnológicos, que são eles: *Cyber-Physical Systems* (CPS), *Internet of things* (IoT), *Big Data*, Robôs Autônomos, Realidade Aumentada, Manufatura Aditiva, *Cloud Computing*, Segurança Cibernética (SC) e Simulação (BIGLIARDI; BOTTANI; CASELLA, 2020; BORTOLINI *et al.*, 2017).

### **2.2.1 Cyber-Physical Systems**

O *Cyber-Physical Systems* (CPS) fundamenta-se na integração entre elementos físicos e elementos cibernéticos por meio da conectividade avançada que garante em tempo real a obtenção de dados físicos com feedback e gerenciamento inteligente de dados, criando sistemas onde a estrutura física já não se distingue da digital, abrangendo o nível de processo e produto (LASI *et al.*, 2014; LEE; BAGHERI; KAO, 2015).

Esse sistema consiste em integrações que envolvem comunicação, computação e controle por meio de redes e processos físicos. Por intermédio desses sistemas, as organizações têm a oportunidade de representar a realidade do mundo físico em ambientes digitais, conseguindo fazer simulações, testes, previsões de desgastes entre outras possibilidades (GHADIMI *et al.*, 2019; LASI *et al.*, 2014; SCHLECHTENDAHL *et al.*, 2015). Máquinas, dispositivos e produtos, são capazes de armazenar todo o tipo de informação, conectando o sistema físico ao virtual por meio de modelos tridimensionais e simulação; em tempo real (DRATH; HORCH, 2014; POSADA *et al.*, 2015).

### **2.2.2 Internet of Things**

No início dos anos 2000, Kevin Ashton fundamentou a os primeiros conceitos do seria a IoT em um laboratório do *Massachusetts Institute of Technology*, Ashton foi um dos pioneiros que criou essa noção. Se todos os objetos do dia a dia fossem equipados com identificadores e

conectividade sem fio, eles poderiam se comunicar e ser gerenciados por computadores (LASI *et al.*, 2014; LOPEZ RESEARCH, 2013; VOGEL-HEUSER; HESS, 2016).

A rede de *Internet of Things* (IoT) tem o objetivo de conectar e trocar dados com outros dispositivos e sistemas pela internet. Esses dispositivos variam de objetos domésticos comuns a ferramentas industriais sofisticadas (LOPEZ RESEARCH, 2013; MOSTERMAN; ZANDER, 2016; WANG *et al.*, 2016a).

Assim a IoT é o de uma rede massiva de dispositivos conectados, esta rede conectada é tão ampla a ponto de ser possível conectar qualquer dispositivo que possa ser ligado e desligado. Esse conjunto de dispositivos, que não são naturalmente digitais podem coletar informações, enviar, agir em relação a eles, de maneira autônoma (HOFMANN; RÜSCH, 2017; LASI *et al.*, 2014; THOBEN; WIESNER; WUEST, 2017).

### **2.2.3 Big Data**

A tecnologia de *Big Data* consiste na geração massiva de dados e processamento de informações coletadas por sensores, dispositivos de vídeo e áudio, aplicativos e informações de mídias sociais (ZHONG *et al.*, 2017). O Big Data proporciona dados estatísticos para controle, flexibilidade, eficiência na supervisão de processos e a interconexão de máquinas inteligentes, resilientes e auto-adaptáveis (LEE; BAGHERI; KAO, 2015; WANG *et al.*, 2016b).

A disponibilidade de dados em massa permite a inovação em serviços, como sistemas de navegação em conjunto a informações de tráfego orientadas ao usuário, aprimoramento da previsão do tempo, calendário, geolocalização e serviços de pagamento (DRATH; HORCH, 2014).

### **2.2.4 Robôs Autônomos**

Robôs Autônomos ou *Autonomous Robots*, são máquinas capazes de realizar sem intervenção ou controle humano, tarefas em ambientes desestruturados, ou seja cabe ao robô a tomada de decisões que não foram previamente programadas, para solucionar problemas e lidar com situações imprevisíveis (BIGLIARDI; BOTTANI; CASELLA, 2020; INGRAND; GHALLAB, 2017).

Os níveis de autonomia variam de acordo com a estrutura do robô e com a função a desempenhar, a exemplo disto, na medicina se o procedimento envolver risco à vida do

paciente, o robô não terá autonomia, já para uma tarefa doméstica, essa autonomia poderá ser bem maior (GÓMEZ RIVAS *et al.*, 2021; INGRAND; GHALLAB, 2017; LIANG; LEE, 2017).

### **2.2.5 Realidade Aumentada**

O termo Realidade Aumentada (RA) que consiste no uso de tecnologias que permitam a combinação/inserção de elementos virtuais no ambiente real. Essa inserção é feita em tempo real por meio de telas dispostas próximo ao olho do usuário, assim proporcionando uma experiência de elementos digitais no mundo real (AKÇAYIR; AKÇAYIR, 2017; FRAGALAMAS *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2018).

A RA é um recurso tecnológico que possibilita sobrepor elementos virtuais com nossa visão da realidade. Ela pode ser utilizada áreas do ensino, ações de marketing, design de produtos, em treinamento e suporte em plantas industriais, entre outros (IVANIUK, 2020; LI *et al.*, 2018; PAREKH *et al.*, 2020).

### **2.2.6 Manufatura Aditiva**

A Manufatura Aditiva, também conhecida como Impressão 3D (I3D), consiste na produção de objetos de geometria complexa por meio de desenho técnico realizado em computadores. A I3D funciona inicialmente com os projetos de desenhos tridimensionais em softwares, e vai construindo ou imprimindo o objeto adicionando camada por camada dos materiais necessários para compor o produto, como plástico, metal e cerâmica (CERUTI *et al.*, 2019; GAUB, 2016; SEPASGOZAR *et al.*, 2020).

A I3D utiliza-se apenas o material necessário, reduzindo desperdícios. Ela pode ser implementada em setores como: saúde: automotivo: aeronáutico entre outros (DILBEROGLU *et al.*, 2017; GODINA *et al.*, 2020; SEPASGOZAR *et al.*, 2020).

### **2.2.7 Cloud Computing**

A tecnologia de *Cloud Computing* permite carregar um alto volume de dados para o armazenamento, facilitando a análise e processamento das informações, aprimorando a gerência de informações e o compartilhamento de recursos com a alocação dinâmica das



informações, extensão, modularização e harmonização de sistemas e o compartilhamento de serviços e componentes (LIU; XU, 2017; WANG *et al.*, 2016a).

Os dados podem ser armazenados em servidores de privados ou públicos. Para o gerenciamento de dados identificou-se a necessidade de recursos computacionais, como servidores para bancos de dados e unidades de tomada de decisão. A falta de infraestrutura adequada resulta em troca e compartilhamento de dados ineficientes e baixa produtividade (XU; XU; LI, 2018).

### **2.2.8 Segurança Cibernética**

O termo Segurança Cibernética (SC) utilizado para denominar procedimentos, práticas e tecnologias que buscam a segurança digital contra práticas ilícitas e danos aos computadores, dados, programas e redes. Dentre os pontos importante que a SC visa proteger estão: desvio de informações e acompanhamento das atividades; impedimento de acesso ao sistema pelos usuários; modificação das informações (CULOT *et al.*, 2019; RUBIO; ROMAN; LOPEZ, 2018; SAWIK, 2020).

A SC é a parte da segurança da informação que protege os dados armazenados, os ativos de informação e administrados dentro de um sistema de informação computacional ou seja dados digitais. A segurança de informação vai além de sistemas computacionais, informações eletrônicas ou sistemas de armazenamento, abarcando todos os aspectos de proteção de informações e dados (CULOT *et al.*, 2019; SAWIK, 2020). A SC também trabalha com a orientação e proteção de pessoas físicas que criam e administram informações privadas. (CORALLO; LAZOI; LEZZI, 2020; CULOT *et al.*, 2019; LEZZI; LAZOI; CORALLO, 2018).

### **2.2.9 Simulação**

A Simulação tem o princípio da reprodução virtual de processos e ambientes de desenvolvimento fabril, permitindo virtualizar de maneira fidedigna o funcionamento das plantas e procedimentos, abrangendo máquinas, funcionários e funções operacionais. Na Indústria 4.0 a Simulação dá às organizações a oportunidade de se tornarem mais inteligentes e eficientes no que se refere aos seus meios de produção (RODIČ, 2017; SCHLUSE *et al.*, 2018; VIEIRA *et al.*, 2018).

A simulação pode ser feita por meio de softwares específicos, captando os dados analisando as variáveis. A efetividade da simulação depende da qualidade e quantidade dos dados que alimentam os sistemas, ou seja utilizar de maneira adequada a Simulação a organização precisa já ter uma estrutura de dados organizada, que os unifique e padronizem as informações (FERREIRA *et al.*, 2020; SHPAK *et al.*, 2019; VIEIRA *et al.*, 2018).

### 2.3 SUSTENTABILIDADE 4.0

A implementação de tecnologias da Indústria 4.0 fornecem "inteligência" aos processos de produção e podem melhorar as condições de sustentabilidade na produção por meio do aumento da eficiência energética, reduzindo os custos de produção, promovendo maior conectividade, reduzindo os impactos ambientais, entre outros (BROZZI *et al.*, 2020; JABBOUR *et al.*, 2018a; KANG *et al.*, 2016).

O alinhamento da sustentabilidade com a Indústria 4.0 forma uma recente área de conhecimento chamada S4.0, que pode ser entendida como uma estratégia para apoiar a obtenção de um estado de sustentabilidade por meio de tecnologias inteligentes, para atender a um desenvolvimento equilibrado das exigências econômicas, ambientais e sociais (KIEL *et al.*, 2017; LOZANO, 2020; PRAUSE; ATARI, 2017).

A implementação da tecnologia Big Data permite analisar um grande volume de informações, reduzindo o tempo de respostas a problemas, como por exemplo impactos ambientais. A IoT por meio da conexão de máquinas e equipamentos consegue reduzir os gastos de energia (MOSTERMAN; ZANDER, 2016; OZTEMEL; GURSEV, 2020).

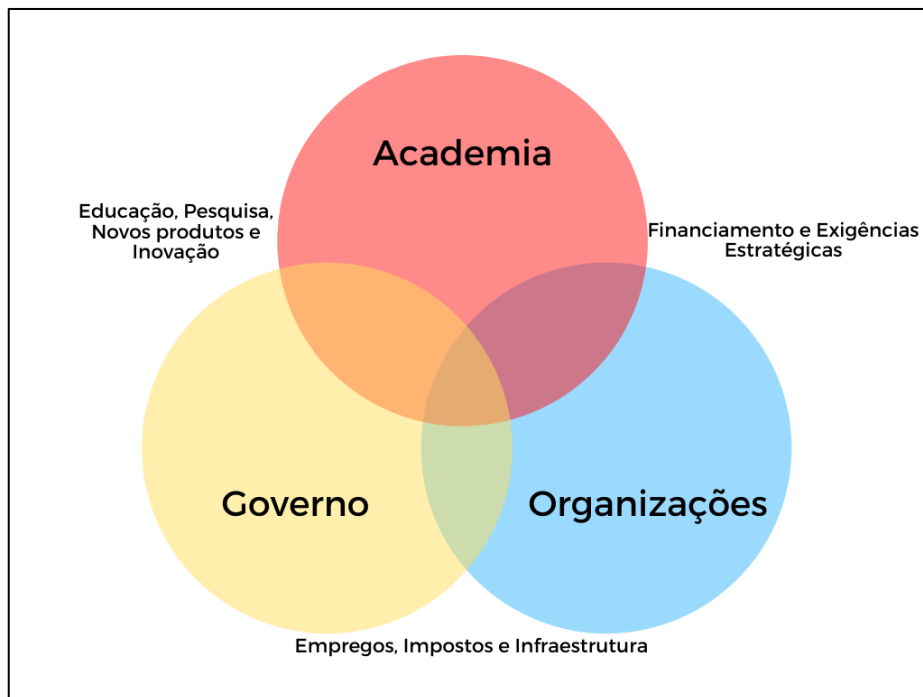
O uso das tecnologias da Indústria 4.0 otimiza as operações mitiga falhas durante o processo, assim gerando menos resíduos poluentes. Também fornece as informações necessárias para tomar decisões inteligentes reduzindo desperdícios. As organizações passam a desenvolver soluções mais robustas para seus produtos com base na análise de dados do comportamento do consumidor (BAG *et al.*, 2018; BAI *et al.*, 2020; BROZZI *et al.*, 2020).

As tecnologias Indústria 4.0 podem permitir a alocação eficiente de recursos, tais como materiais, energia e água. Essa alocação utiliza dados em tempo real de sistemas de produção e parceiros da cadeia de fornecimento, permitindo desenvolver a sustentabilidade (HASEEB *et al.*, 2019; JABBOUR *et al.*, 2018a).

## 2.4 TRIPLE HELIX

O conceito da *Triple Helix* (TH) iniciado nos anos 90 por Etzkowitz e Leydesdorff abarcou elementos propostos pelos autores Lowe, Sábato e Mackenzi no início dos anos 80. A TH consiste na tríade entre os setores governo, organizações e academia para uma relação crescente com a sociedade (Figura 4) (RANGA; ETZKOWITZ, 2013; REIS *et al.*, 2021).

Figura 4 – Modelo da *Triple Helix*



Fonte: Adaptado de Ranga e Etzkowitz (2013) e Reis *et al.* (2021).

A tese da TH fundamenta que o potencial de inovação e desenvolvimento econômico reside num papel mais proeminente para a universidade e na hibridação de elementos da governo, organizações e academia para gerar novos formatos institucionais e sociais para a produção, transferência e aplicação do conhecimento (GUERRERO; URBANO, 2017; RANGA; ETZKOWITZ, 2013).

Os resultados da investigação teórica e empírica da TH proporciona um quadro geral para explorar dinâmicas de inovação complexas e para informar as políticas de inovação e desenvolvimento nacionais, regionais e internacionais (KIMATU, 2016; RANGA; ETZKOWITZ, 2013).

A principal função de um sistema TH é a geração, difusão e utilização do conhecimento e inovação. Esta função é realizada não só com as competências técnicas e económicas descritas na teoria do sistema de inovação, mas também com competências empresariais, políticas, culturais e sociais que estão inseridas nos espaços da TH (conhecimento, inovação e consenso) (KIMATU, 2016; SARPONG *et al.*, 2017).

A TH enfatiza a transposição das fronteiras entre as esferas institucionais como uma importante fonte de criatividade organizacional, permitindo aos setores estarem interconectados. Diretrizes para decisões políticas, gestores universitários e organizacionais podem ser criadas deste sistema, a fim de reforçar a colaboração entre os atores da TH para melhorar o desenvolvimento regional e/ou nacional (GUERRERO; URBANO, 2017; KIMATU, 2016; RANGA; ETZKOWITZ, 2013).

Esse referencial teórico subsidiou o desenvolvimento do CTC-S4.0 ajudando a elaboração das proposições do *framework*. A discussão das implementações das tecnologias da Indústria 4.0 para desenvolver a sustentabilidade são realizadas a luz da teoria deste referencial teórico.

### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Neste Capítulo são apresentadas informações sobre a classificação da pesquisa, as etapas de execução, os instrumentos de coleta de dados e o fluxo metodológico para o desenvolvimento da pesquisa.

#### 3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa científica pode ser classificada quanto à sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos (KOTHARI; GARG, 2019). O Quadro 2 apresenta em destaque as classificações desta pesquisa. Este trabalho foi realizado por meio de uma pesquisa aplicada, com objetivo exploratório e descritivo sendo abordada qualitativamente com base na análise bibliométrica e análise de conteúdo. Serão apresentadas, então, definições e principais particularidades destes elementos (natureza, objetivo, abordagem e procedimentos de pesquisa) para justificar sua escolha.

Quadro 2 – Classificação da pesquisa

<b>Natureza</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Abordagem</b>	<b>Procedimentos de pesquisa</b>
Básica	Exploratória	Quantitativa	Experimento
Aplicada	Descritiva	Qualitativa	Survey
	Explicativa	Combinada	Modelagem e simulação
	Normativa		Análise bibliométrica
			Pesquisa-ação
			Análise de conteúdo
			Estudo de caso

Fonte: Adaptado de Kothari e Garg (2019).

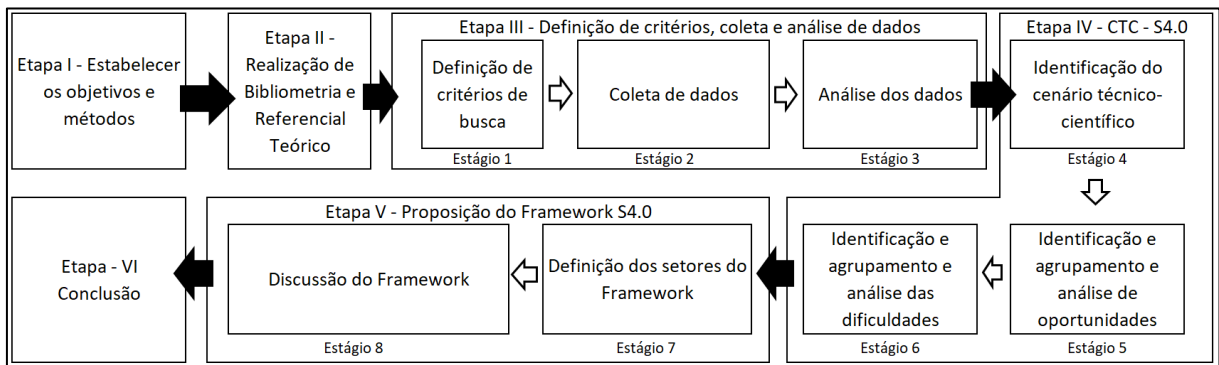
A natureza deste trabalho pode ser classificada como aplicada, pois tem interesse prático para que os resultados sejam utilizados na solução de problemas reais do cotidiano (PROVDANOV; FREITAS, 2013). No que diz respeito aos objetivos desta pesquisa, ela é classificada como descritiva e exploratória. Descritiva porque permite descrever as características do fenômeno observado em relação à delimitação feita nesta dissertação é exploratória porque proporcionará maior familiaridade com o problema, explicitando-o por meio da análise, classificação e interpretação (MIGUEL, 2018).

Quanto à abordagem do problema, foi utilizado o método qualitativo, pois tem caráter exploratório e permite a compreensão de um fenômeno e a contribuição para a sua mudança, com foco nos processos do objeto de estudo (MIGUEL, 2018). Em relação aos procedimentos de pesquisa, foi utilizada a combinação de análise bibliométrica com análise de conteúdo (NUNHES; OLIVEIRA, 2018).

### 3.2 FLUXO METODOLÓGICO

Neste subcapítulo apresenta-se o fluxo de desenvolvimento desta pesquisa, que é composto por cinco etapas, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Fluxo Metodológico



Fonte: Próprio Autor (2021).

A pesquisa foi dividida em cinco etapas as quais serão descritas a seguir: Etapa I – estabelecer os objetivos e métodos; Etapa II, realização de bibliometria e referencial teórico; Etapa III, definição dos critérios de pesquisas, coleta e análise dos dados; Etapa IV - mapeamento do CTC-S4.0; Etapa V - proposição do *framework* para desenvolver a S4.0; Etapa VI - conclusão e síntese das contribuições.

#### 3.2.1 Etapa I

Na Etapa I foram definidos os objetivos de pesquisa e os métodos para alcançá-los. Este estudo foi desenvolvido utilizando um método combinado de análise bibliométrica e análise de conteúdo. A análise bibliométrica foi utilizada para permitir a medição quantitativa dos avanços técnico-científicos de um determinado assunto e a identificação das características de seu desenvolvimento (NUNHES; OLIVEIRA, 2018).

A análise de conteúdo é um método para interpretação de dados textuais por meio do processo sistemático de identificação de temas ou padrões. Tal análise permite construir o conhecimento e compreender o fenômeno estudado (HSIEH; SHANNON, 2005). Este mapeamento científico, adicionado à análise de conteúdo de artigos, documentos públicos, patentes, e sites oficiais de organizações, permite a interpretação do tema e a construção de novos caminhos por meio da proposição de um *framework* (NUNHES *et al.*, 2021), para o desenvolvimento da S4.0.

### 3.2.2 Etapa II

Na Etapa II foi realizada a revisão sistemática da literatura científica, que teve como objetivo aprofundar e complementar o referencial teórico para contemplar a presença dos autores e artigos mais citados nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science* (WOS) sobre o tema S4.0. O levantamento inicial para identificar quais são os artigos mais citados em S4.0 foi realizado por meio do estudo bibliométrico em S4.0.

Esta análise bibliométrica foi importante, uma vez que explica a relação entre o número de publicações e citações, os resultados apresentados pelo artigo e a sua utilização para outras investigações (BORNMANN *et al.*, 2016). Esta análise permite também visualizar o desempenho de uma investigação (FRITTELLI; MANCINI; PERI, 2016). Assim, pode-se afirmar que a análise bibliométrica realiza análises estatísticas sobre documentos publicados a partir de indicadores (ALEDO *et al.*, 2018).

### 3.2.3 Etapa III

A Etapa III foi realizada em três estágios: Estágio 1 - definição dos critérios de pesquisa; Estágio 2 - coleta de dados; Estágio 3 - análise dos dados. No estágio 1 foram estabelecidos os critérios de seleção e delimitação da pesquisa para a coleta de dados que foi realizada na base de dados da *Scopus* e *Orbit*.

Os artigos considerados para o desenvolvimento do cenário científico foram selecionadas a partir de uma busca realizada na base de dados *Scopus* em fevereiro de 2020. Somente a base de dados *Scopus* foi utilizado porque maioria dos artigos disponíveis na base de dados da WOS também estão disponíveis na base de dados *Scopus*.

Além disso, a *Scopus* apresenta artigos únicos que estão apenas na que não constam na WOS. Os artigos comuns entre as duas bases de dados em todos os casos têm mais citações

na *Scopus* do que na *WOS*. Esse período foi escolhido porque em 2015 começou a haver um desdobramento dos tópicos abordados na QRI, entre os quais estava a sustentabilidade (BRANGER; PANG, 2015; PRAUSE, 2015; SWARNIMA; MEHRA; DASOT, 2017).

Foram selecionados trabalhos em inglês, pelo fato de ser o idioma mais influente e impactante no meio acadêmico (NUNHES; OLIVEIRA, 2018). As patentes consideradas para desenvolvimento do cenário técnico foram selecionadas a partir de uma busca realizada na base de dados Orbit, em julho de 2020. Esta base de dados foi escolhida por reunir as patentes de mais de 100 escritórios ao redor do mundo, permitindo a análise do desenvolvimento de tecnologias relacionadas à S4.0. Para a seleção dos artigos e patentes foram escolhidos os *Clusters* “Sustainability” e “Industry 4.0”, os quais foram utilizados em conjunto com os termos sugeridos pela plataforma como critério de seleção das patentes conforme Quadro 3.

Quadro 3 – Palavras-chave utilizadas na busca de patentes

Palavras-chave da patente	Palavras Associadas
Sustainability	Sustainability; Sustainable
Industry 4.0	Smart Machine; Smart Manufacturing; Smart Factories; Smart Factory; Cyber-physical Systems; Internet of Things; Internet of Services; Cloud; Big Data; Machine Learning; Deep Learning; Artificial Intelligence; Intelligent Manufacturing

Fonte: Próprio autor (2021).

No Estágio 2 foram coletadas informações de 94 artigos indexados e dos países (Apêndice A), instituições (Apêndice B), autores (Apêndice B) e periódicos (Apêndice C) mais citados na plataforma Scopus e 208 patentes na plataforma Orbit que atenderam aos critérios de busca do Estágio 1. No Estágio 3 foram analisados os dados do Estágio 2 com o objetivo de ranquear os principais países com base na relação entre dois critérios: Índice H e número de patentes registradas, conforme Figura 6.

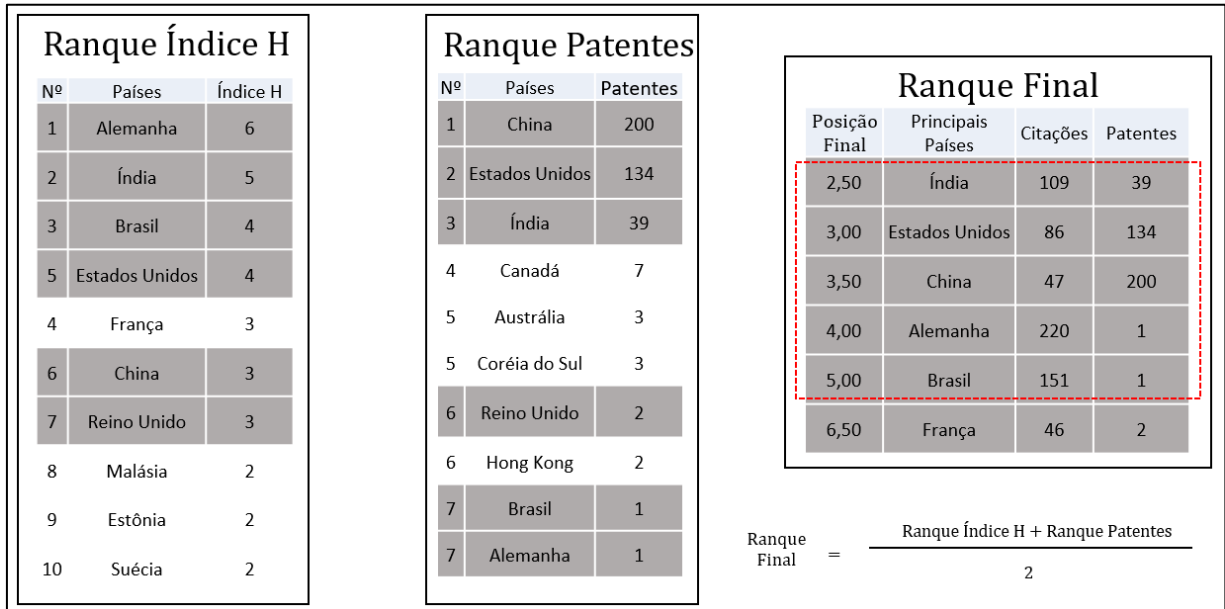
O Índice H tem o propósito de quantificar o impacto e a relevância de pesquisas científicas, sendo uma métrica bibliométrica que mede a capacidade produtiva acadêmica de países, universidades, autores, entre outros (HIRSCH, 2007).

Inicialmente, foram ranqueados 10 países com maior Índice H e 10 países com maior número de patentes registradas. Vale ressaltar, que os países que obtiveram empate no Índice H ou número de patentes foram ranqueados de forma a ocupar a mesma posição. Na sequência, foram identificados os países que estavam presentes nas duas colunas, utilizando o



Ranque final que é composto pela média das posições entre as variáveis ranque índice h e ranque patentes.

Figura 6 – Classificação dos países



Fonte: Próprio autor (2021).

Nesse índice, quanto menor o valor da média entre as variáveis, melhor posicionado estará o país, conforme pode ser visto no Final Position Index (Figura 4). Foi identificado que os primeiros países estavam entre os mais altos Índice H e também foi identificado que os cinco primeiros países tinham 80% de todas as patentes. Considerando esses critérios, os países selecionados foram Índia, Estados Unidos da América, China, Alemanha e Brasil.

### 3.2.4 Etapa IV

A Etapa IV foi executada em três estágios (Estágio 4, 5 e 6) com foco no desenvolvimento do CTC-S4.0: Estágio 4 - mapeamento do CTC-S4.0 do tema; Estágio 5 - análise e agrupamento de oportunidades; Estágio 6 - análise e agrupamento de desafios. No Estágio 4 foi realizada uma análise de conteúdo para sistematizar as principais inovações e iniciativas governamentais, industriais e acadêmicas dos países mapeados no CTC-S4.0 a partir da perspectiva do modelo da TH. O Cenário Técnico-Científico consiste na identificação e análise de elementos como: Estado da Arte; Grandes contribuições das principais universidades e autores; Grandes estudos sobre o tema; Desafios e oportunidades

de desenvolvimento científico; Esforços e políticas governamentais; Iniciativas industriais; e Patentes e Inovações (NUNHES *ET AL.*, 2021; REIS *et al.*, 2021).

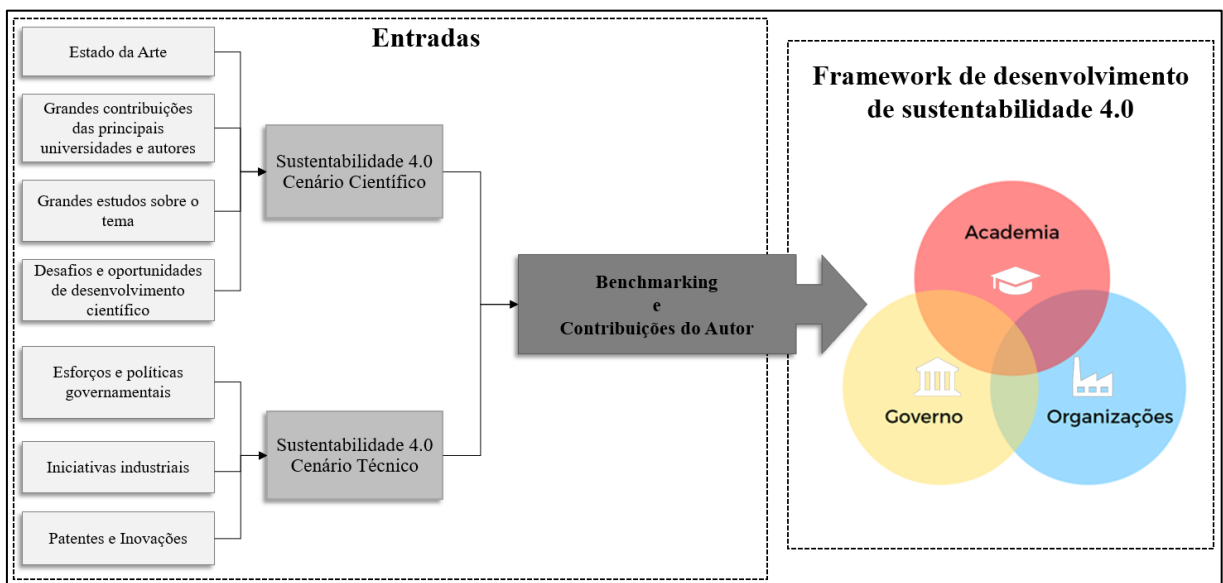
Essa sistematização permitiu criar um *framework* que possa contribuir com o desenvolvimento de iniciativas conjuntas entre os poderes público e privado (NUNHES; MOTTA BARBOSA; OLIVEIRA, 2017). Portanto, foram analisados documentos oficiais, como relatórios de órgãos nacionais e internacionais, páginas governamentais e países com maior número de patentes a respeito da S4.0.

Nos Estágios 5 e 6 foram identificadas e agrupadas respectivamente as principais oportunidades e desafios de desenvolvimento da S4.0 a partir da análise de conteúdo dos 30 artigos mais citados selecionados na Estágio 2 (Apêndice D). A identificação das oportunidades e desafios somados as contribuições do autor deste trabalho, subsidiaram a formulação do *framework* para o desenvolvimento da S4.0 (Etapa V).

### 3.2.5 Etapa V

Na Etapa V foi desenvolvido o *framework* (Figura 7) em dois estágios: Estágio 7 - definição dos setores do *framework* e Estágio 8 – discussão do *framework*. No Estágio 7 serão selecionadas as principais iniciativas, oportunidades e desafios para o desenvolvimento no CTC-S4.0. No Estágio 8 serão analisadas as sugestões propostas no *framework*, de forma a garantir seu entendimento.

Figura 7 – Fluxo de elaboração do *framework*



Fonte: Próprio autor (2021).

### 3.2.6 Etapa VI

A Etapa VI apresenta o cumprimento dos objetivos propostos neste trabalho, as principais contribuições científicas e aplicadas, as limitações e por fim sugestões de futuros trabalhos. Como fruto da pesquisa foram publicados artigos científicos em eventos nacionais e revista internacional de Qualis A2:

- Sustentabilidade 4.0: Uma Análise Bibliométrica. IV Workshop de Engenharia Mecânica e de Produção Unesp, 2020, Guaratinguetá;
- Mapeamento da Sustentabilidade 4.0: A Identificação das Contribuições e dos Limites entre a Tecnologia e o Desenvolvimento Sustentável. ENEGEP 2020 Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2020, Online, 2020; e
- Striding towards Sustainability: A Framework to Overcome Challenges and Explore Opportunities through Industry 4.0. Sustainability, v. 13, p. 5232, 2021.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se neste capítulo o conteúdo e as análises dos dados provenientes da literatura dos países (Índia, Estados Unidos da América, China, Alemanha e Brasil) conforme apresentado na Figura 4. Estes países buscam implementar tecnologias Indústria 4.0 para contribuir para a sustentabilidade, evidenciando que mesmo países com problemas econômicos, ambientais e/ou sociais podem ter iniciativas que alavanquem a S4.0 com o objetivo de desenvolver a sustentabilidade nacional e global.

### 4.1 APRESENTAÇÃO DO CTC-S4.0

Neste subcapítulo será apresentado o atual CTC-S4.0, dos principais países que se destacaram quanto ao desenvolvimento de estudos e técnicas no tema.

#### 4.1.1 Índia

A Índia é o terceiro país com maior número de patentes registradas em S4.0 (39), e o segundo em relação ao Índice H (5) (ORBIT, 2020; SCOPUS, 2020).

##### 4.1.1.1 Governo

O Governo indiano em parceria com a indústria e sociedade civil criaram a Confederação da Indústria Indiana (CII) para o desenvolvimento da manufatura nacional. A CII está focada em seis elementos-chave: desenvolvimento humano; integridade corporativa e cidadania; simplificação de negócios; inovação e capacidade técnica; sustentabilidade; e integração global. A CII tem um plano de desenvolvimento da sustentabilidade por meio das tecnologias da Indústria 4.0 (SWARNIMA; MEHRA; DASOT, 2017).

Para fomentar o avanço tecnológico na indústria indiana foi elaborado o plano “Política Nacional para Manufatura Avançada”. Ele fomenta a implementação das novas tecnologias Indústria 4.0 para melhorar a produção manufatureira, tornando os processos produtivos mais sustentáveis por meio do desenvolvimento da segurança cibernética, aumento da conectividade social e da eficiência energética (HASEEB *et al.*, 2019; LOZANO, 2020; SWARNIMA; MEHRA; DASOT, 2017).

#### 4.1.1.2 Organizações

A Schneider Electric Industries desenvolve soluções digitais com foco na sustentabilidade para o setor de energia. Ela tem patentes registradas na Índia nas áreas de “Computer Technology” e “Thermal Processes and Apparatus”; voltadas para a criação de softwares e dispositivos elétricos inteligentes (ORBIT, 2020; SCHNEIDER ELECTRIC, 2020a).

A Schneider Electric Industries desenvolveu a plataforma EcoStruxure™ que integra a parte elétrica e cibernética de residências, edifícios, centros de dados e indústria (SCHNEIDER ELECTRIC, 2020b). Essa plataforma funciona por meio da IoT e sensoriamento dos dispositivos conectados (elétricos e eletrônicos). Ela possibilita que as pessoas dentro de um ambiente integrado monitorem e gerenciem os equipamentos eletrônicos de maneira rápida e interativa, desenvolvendo maior eficiência energética, aumento de segurança e redução de gastos com energia (GHADIMI *et al.*, 2019; LOZANO, 2020; SCHNEIDER ELECTRIC, 2020c, 2020b).

A *startup* VST Mobility Solutions (VST) desenvolve *softwares* e *hardwares* para uso em dispositivos móveis, utilizando a IoT e Clouds para o gerenciamento de frota de ponta a ponta na *supply chain*, coletando dados dos veículos para serem acessadas remotamente pelo usuário, permitindo o monitoramento e gerenciamento de um número ilimitado de veículos em tempo real (VST MOBILITY SOLUTIONS, 2020a, 2020b). Implementações como os softwares da VST proporcionam maior eficiência energética nas atividades e processos, aumenta a segurança dos motoristas e reduz os custos do *supply chain* (LOZANO, 2020; MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018; PRAUSE, 2015).

A VST criou o dispositivo BIN-19 que, a partir das tecnologias da Indústria 4.0, permite a deposição das máscaras de proteção e a sua desinfecção por meio de luz ultra violeta. Ele também higieniza as mãos de quem deposita as máscaras com fluido sanitizante, garantindo segurança do usuário em relação à exposição a vírus e bactérias (VST MOBILITY SOLUTIONS, 2020c). O BIN-19 ajuda a reduzir da exposição das pessoas a vírus em situações de pandemia, a reduz o descarte indevido ao meio ambiente, evita o descarte de materiais com risco biológicos em lugares inadequados (CHUNG *et al.*, 2020; LOZANO, 2020; REIS *et al.*, 2020).

#### 4.1.1.3 Academia

As três universidades com maior Índice H em S4.0 são: a National Institute of Industrial Engineering (NIIE), State Institute of Engineering e Technology (SIET) e Indian Institute of Technology Delhi (IITD).

Um grupo de pesquisa da NIIE estuda a área da Indústria 4.0 voltada a sustentabilidade, identificando as tendências da indústria sustentável 4.0 e analisando as tendências de implementação de tecnologias da Indústria 4.0 para alavancar a produção sustentável (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018; NATIONAL INSTITUTE OF INDUSTRIAL ENGINEERING, 2020).

A SIET desenvolveu estudos que identificam os fatores críticos na implementação tecnologias da Indústria 4.0 voltados a sustentabilidade em organizações. Os resultados mostraram que os fatores gerenciais e econômicos são os mais críticos para a adoção da sustentabilidade enquanto que os fatores os ambientais são importantes porém já é possível melhor equaciona-los para sustentabilidade (YADAV *et al.*, 2020). Pesquisadores da SIET propuseram uma estrutura teórica para alcançar a sustentabilidade em supply chain por meio de tecnologias da Indústria 4.0 (LUTHRA; MANGLA, 2018; YADAV *et al.*, 2020).

O autor da Índia com maior Índice H é o Dr. Sunil Luthra, que é filiado a SIET. Ele atua em parceria com segundo e terceiro autores com maior Índice H no tema, Dr. Anil Kumar, que está filiado a BML Munjal University e o Dr. Gunjan Yadav, que está filiado a S. V. National Institute of Technology. Eles contribuíram com pesquisas que apoiam gerentes de organizações a incorporarem a proteção ambiental, aumentando a segurança de processos e bem-estar dos funcionários envolvidos no supply chain, identificando e analisando os desafios para a sustentabilidade nas economias emergentes ao implementarem as tecnologias da Indústria 4.0 (LUTHRA; MANGLA, 2018).

A IITD possui práticas que visam analisar as mudanças climáticas, desenvolver práticas para reduzir os impactos exercido no planeta, investigar novas fontes energéticas e implementar tecnologias da Indústria 4.0 para melhorar os padrões de sustentabilidade na manufatura e *supply chain* (INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI, 2020; KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018; MANAVALAN; JAYAKRISHNA, 2019).

### 4.1.2 Estados Unidos da América

Os Estados Unidos da América é o segundo país com maior número de patentes registrada em S4.0 (134), e o terceiro em Índice H (4) (ORBIT, 2020; SCOPUS, 2020).

#### 4.1.2.1 Governo

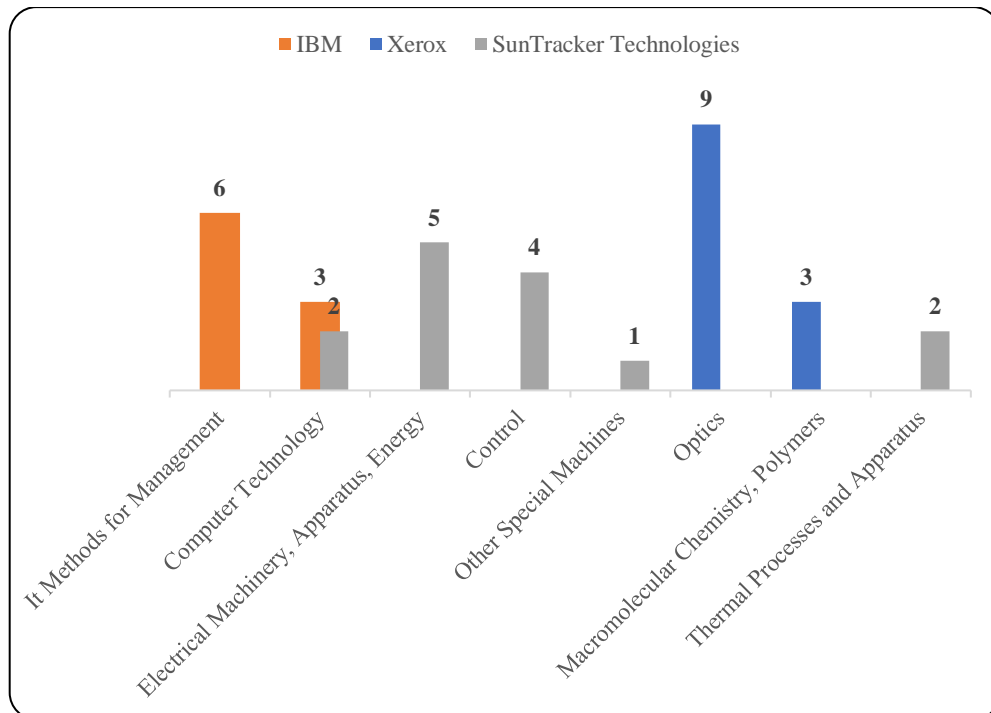
O governo dos Estados Unidos da América criou a *United States Environmental Protection Agency* (EPA) com o objetivo de desenvolver políticas para preservação da vida e do meio ambiente. Entre as principais ações realizadas pelo EPA, pode se destacar a condução das primeiras avaliações dos principais ecossistemas, análise dos riscos causados pelo fumo de tabaco, descoberta dos efeitos prejudiciais do chumbo na gasolina entre outras ações (DERNBACH; MINTZ, 2011; UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2020a).

Na página eletrônica da EPA são encontradas práticas governamentais como o projeto Chicago's Array of Things (AoT) de sensoriamento urbano. O AoT mede fatores como condição climática, qualidade do ar, ruído e proporciona ferramentas para o aprimoramento do planejamento urbano que impactam na habitação civil. Por meio de políticas para preservação da vida e do meio ambiente, os Estados Unidos da América conseguiram reduzir as emissões de gases de efeito estufa per capita entre os anos de 2006 e 2016 em 17% (OECD, 2018; UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2020b).

#### 4.1.2.2 Organizações

De acordo com as buscas realizadas na plataforma Orbit as organizações que mais desenvolveram patentes na área de S4.0 foram: *International Business Machines* (IBM), *Xerox* e *SunTracker Technologies* (STT) (Figura 8).

Figura 8 – Grupos de patentes das organizações americanas



Fonte: Orbit (2020).

A desenvolvedora de produtos e serviços na área de informática IBM foi a organização americana que mais registrou patentes na pesquisa. Essas patentes pertencem às áreas de “*IT Methods for Management*” e “*Computer Technology*”, desenvolvidas para a redução de desperdícios, aumento da eficiência no uso de energia e da água e redução das emissões de CO<sub>2</sub>, promovendo ecossistemas sustentáveis e uma gestão financeira saudável (IBM, 2020a; ORBIT, 2020).

A IBM possui a linha de pesquisa “*Energy and environment*”, com objetivo de desenvolver sistemas inteligentes que otimizam os recursos aquíferos e energéticos, controlando o fluxo de energia de uma central elétrica. Esses sistemas inteligentes auxiliam a contenção de interrupções abruptas de energia, restaurando-a mais rapidamente do que o tempo médio de religação comum. A IBM também atua na criação de sistemas de transportes que otimizam o fluxo de tráfego de veículos e reduzem as emissões de CO<sub>2</sub>. A IBM desenvolve também sistemas que possibilitam ações preditivas automatizadas na gestão do tratamento da água, propondo ações corretivas (IBM, 2020b).

A Xerox atua nos setores de tecnologia da informação e componentes computacionais, desenvolve equipamentos de digitalização e componentes de impressoras com patentes registradas nas áreas de “*Optics*” e “*Macromolecular Chemistry, Polymers*” (ORBIT, 2020; XEROX, 2020a).



A *Xerox* desenvolveu a plataforma de gestão de conteúdos documentais *DocuShare®*, que permite aos usuários digitalizarem papéis em um sistema central de gerenciamento, em que os documentos são mensurados, gerenciados e armazenados com segurança para acesso dos usuários. O *DocuShare®* possibilita a redução dos volumes de papéis, contribuindo com a diminuição ou até mesmo a extinção de arquivos físicos (XEROX, 2020b).

Essa plataforma contribuiu digitalizando 500 mil documentos da fabricante de móveis centenária *Fairfield Chair*. A digitalização dos documentos reduziu significativamente a dependência de arquivos físicos. Com esta ação, esta empresa diminuiu 40% de seu espaço, reduzindo a pegada de carbono e, conseqüentemente, melhorando os seus resultados na sustentabilidade (LOZANO, 2020; NEWELL; VOS, 2011; XEROX, 2020c).

A STT registrou patentes nas áreas de “*Computer Technology*”, “*Electrical Machinery, Apparatus, Energy*”; “*Control*”; “*Other Special Machines*” e “*Thermal Processes and Apparatus*” e são aplicadas ao desenvolvimento de software de projetos para iluminação em horticulturas (ORBIT, 2020; SUNTRACKER TECHNOLOGIES, 2020a).

Um dos softwares desenvolvidos pela STT foi o *Cerise365+GreenHouseDesigner*, utilizando o sensoriamento e *Big Data*. Esse software permite dimensionar previamente a necessidade de luz artificial que uma horta necessitará no local. A utilização do software possibilita potencializar o cultivo agrícola aumentando a produção de alimentos impactando sustentabilidade nos pilares ambientais, econômicos e no pilar social, ajudando a mitigar o problema global de falta de fome (BANANI *et al.*, 2016; MOSCHETTI; MAZZARELLA; NORD, 2015; SUNTRACKER TECHNOLOGIES, 2020b; UNITED NATIONS, 2020c).

#### 4.1.2.3 Academia

As três universidades com maior Índice H em produções científicas sobre S4.0 são: a *California State University Bakersfield* (CSUB), *The Cognitive Labor Institute* (CLI) e *The Institute of Smart Big Data Analytics* (ISBDA).

A CSUB possui uma linha de pesquisa e projeto na área de sustentabilidade que se divide em nove subáreas: administração, construção, educação, energia, comida, transportes, gestão de resíduos e água. Em cada uma dessas subáreas existe a implementação das tecnologias da Indústria 4.0, como uso de *Big Data* e *Virtual Reality* (VR) na área de educação. Essa linha de pesquisa tem por objetivo melhorar os três pilares da sustentabilidade (CALIFORNIA STATE UNIVERSITY BAKERSFIELD, 2020). Na CSUB o Dr. Angappa

Gunasekaran possui maior Índice H na pesquisa do tema, esse autor identificou as sinergias e dissonâncias entre a Indústria 4.0 e a Manufatura Enxuta no contexto da Sustentabilidade e desenvolveu um estudo que identifica aplicações sustentáveis das tecnologias da Indústria 4.0 em processos fabris (KAMBLE; GUNASEKARAN; DHONE, 2019; KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018).

O CLI realiza pesquisas na área de análise de dados, tecnologias inteligentes e IoT para aprimorar o processamento de dados e agregar valor ao processo produtivo. Essas tecnologias melhoram o desempenho operacional, econômico e ambiental, contribuindo para elevar o nível de sustentabilidade dos processos industriais (AINSWORTH-ROWEN, 2019; LOZANO, 2020; TUFFNELL *et al.*, 2019a). O Dr. Caryl Tuffnell atua no CLI e é o segundo autor com maior Índice H no tema de S4.0. Esse autor investigou os impactos do excesso de tráfego de dados nos custos empresariais, buscando alternativas viáveis para a sustentabilidade econômica corporativa (TUFFNELL *et al.*, 2019a, 2019b).

O ISBDA pertencente a *American Association for Economic Research* e possui pesquisas voltadas a manufatura inteligente e sustentável, por meio das tecnologias da Indústria 4.0 para tornar as redes de fornecimento economicamente e ambientalmente sustentáveis (AMERICAN ASSOCIATION FOR ECONOMIC RESEARCH, 2020; FELSTEAD, 2019; FIELDEN *et al.*, 2019). O terceiro autor com maior Índice H dentro da temática S4.0, Dr. Joseph Sarkis, está filiado a *Worcester Polytechnic*. Em suas pesquisas ele propõe a adoção das tecnologias: nanotecnologia, tecnologia móvel e drones para melhorar o impacto da sustentabilidade ambiental e econômico nas organizações automobilísticas, eletrônicas, alimentícias e têxteis são diretamente impactadas pelas tecnologias da Indústria 4.0 (BAI *et al.*, 2020; ESMAEILIAN *et al.*, 2020).

### 4.1.3 China

A China é o país com maior número de patentes registrada em S4.0 (134), e o quarto em Índice H (3) (ORBIT, 2020; SCOPUS, 2020).

#### 4.1.3.1 Governo

Para tornar o país mais sustentável a China elaborou um plano para tratar do desenvolvimento agrícola, gerenciamento de resíduos sólidos, poluição fabril, aumento da eficiência energética e implementação de tecnologias inteligentes para melhorar os padrões

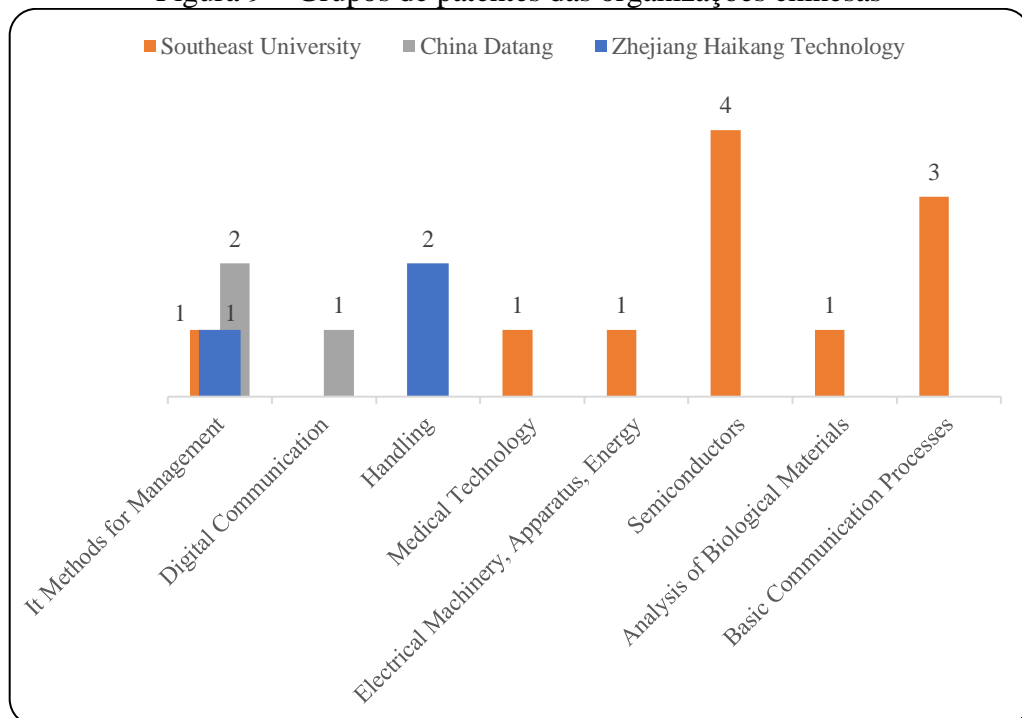
manufatureiros (INTERNATIONAL MONETARY FUND, 2016). A instituição multilateral de financiamento e desenvolvimento *Asian Development Bank* (ADB) apoia o plano de governo chinês priorizando as temáticas de mudanças climáticas, degradação ambiental e crescimento econômico (ASIAN DEVELOPMENT BANK, 2016).

Também foi instituído o programa MiC2025 para a implementação das tecnologias inteligentes da Indústria 4.0 na indústria. Por meio do MiC2025 tornou-se possível a melhoria da performance industrial, o fortalecimento da economia, a redução da degradação ambiental e favorece a inclusão social. O seu foco é voltado as indústrias de baixo carbono, tecnologias da informação, seguimento aeroespacial e pesquisa nuclear. Portanto, o MIC20205 é um programa que impulsiona o desenvolvimento industrial e o crescimento sustentável e chinês (INSTITUTE FOR SECURITY AND DEVELOPMENT POLICY, 2020; MÜLLER; VOIGT, 2018; THE PEOPLE’S REPUBLIC OF CHINA, 2020).

#### 4.1.3.2 Organizações

De acordo com as buscas realizadas na plataforma Orbit, as organizações que mais desenvolveram patentes na área de S4.0 foram: *Southeast University* (SEU), *China Datang* (CD) e *Zhejiang Haikang Science & Technology* (ZST) (Figura 9).

Figura 9 – Grupos de patentes das organizações chinesas



Fonte: Orbit (2020).

A SEU chinesa foi a organização que mais registrou patentes na pesquisa. A universidade depositou patentes nas áreas de “*IT Methods for Management*”; “*Medical Technology*”; “*Electrical Machinery, Apparatus, Energy*”; “*Semiconductors*”; “*Analysis of Biological Materials*” e “*Medical Technology*”; voltadas para o desenvolvimento de materiais condutores de energia e monitoramento medicinal da qualidade do ar (ORBIT, 2020; SOUTHEAST UNIVERSITY, 2020).

A SEU criou o *National Mobile Communications Research Laboratory* (CRL), o qual desenvolveu uma arquitetura computacional de rede colaborativa que utiliza a transmissão 5G para envio e recepção de dados que promove uma maior conectividade social (NATIONAL MOBILE COMMUNICATIONS RESEARCH LABORATORY, 2020). A troca de dados rápida proporciona redução de custos e aumento de lucros das organizações por meio da integração dos processos e supply chain (BIRKEL *et al.*, 2019; ESMAEILIAN *et al.*, 2020; PRAUSE, 2015).

A estatal CD atua nos setores de construção civil e geração de energia. A empresa depositou patentes nas áreas de “*IT Methods for Management*” e “*Digital Communications*”; visando melhorar a geração, gestão e distribuição de energia eólica (CHINA DATANG, 2020; ORBIT, 2020). A CD coordena pesquisas sobre tecnologias inteligentes que melhoram a eficiência energética em parques eólicos, reduzem dos impactos da geração de energia por meio do carvão. O aumento da produção de energia limpa por meio das tecnologias inteligentes reduz a necessidade de combustíveis fósseis e a degradação do meio-ambiente (CHINA DATANG, 2020; INTERNATIONAL MONETARY FUND, 2016; MENG *et al.*, 2018).

A desenvolvedora de dispositivos controladores *Zhejiang Haikang Science & Technology* (ZST) atua nos setores eletrodoméstico e industrial. A organização depositou patentes nas áreas de “*IT Methods for Management*” e “*Handling*”. Essas patentes são voltadas para o monitoramento de veículos motorizados, veículos não motorizados, aeronaves, navios, mercadorias perigosas, entre outros por meio da tecnologia IoT e *Radio Frequency Identification* (RFID), na zona metropolitana (ORBIT, 2020; ZHEJIANG HAIKANG TECHNOLOGY, 2020a).

A ZST criou o sistema de monitoramento “*Awake*” para gerenciar e controlar os equipamentos policiais. Esse sistema integra as informações relevantes ao policiamento, possibilitando a troca de informação em operações policiais e a gestão e manutenção dos equipamentos. A utilização das tecnologias da Indústria 4.0 na segurança pública aumenta a efetividade do policiamento proporcionando maior segurança e reduzindo desperdícios

financeiros (BRANGER; PANG, 2015; SWARNIMA; MEHRA; DASOT, 2017; ZHEJIANG HAIKANG TECHNOLOGY, 2020b).

#### 4.1.3.3 Academia

As três universidades com maior Índice H em S4.0 são: *Dalian University of Technology* (DUT), *Beijing University of Technology* (BJUT) e *Chongqing University* (CU).

Na DUT está um dos autores chineses com maior Índice H na pesquisa sobre o tema, o Dr. Joenson Z. Shyu que realizou pesquisa sobre o desenvolvimento da sustentabilidade integrada à tecnologias inteligentes como CPS e IoT para desenvolver a agricultura e a manufatura, na China. A utilização dessas tecnologias diminui os impactos ambientais e melhoram as condições de trabalho (DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2020; LIN; SHYU; DING, 2017; LOZANO, 2020).

A BJUT junto a CU realizou estudos para desenvolver um supply chain mais sustentável por meio da seleção inteligente e sustentável de fornecedores que utilizassem tecnologia multiagentes, como: distribuição, autonomia, mobilidade, inteligência e autoaprendizagem (BEIJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2020; CHONGQING UNIVERSITY, 2020; GHADIMI *et al.*, 2019).

Os autores Dr. Shan Ren e Dr. Yingfeng Zhang filiados respectivamente a *Xi'an Institute of Posts and Telecommunications* e *Shaanxi University of Technology* analisaram como a inserção do Smart Manufacturing e a análise de Big Data podem contribuir para viabilizar uma produção inteligente sustentável. Esses autores desenvolveram o termo *Sustainable Smart Manufacturing* (SSM), que implementa tecnologias inteligentes da Indústria 4.0 na análise de dados em processos da *Product Lifecycle Management*. O SSM transforma os modelos operacionais do ciclo de vida orientados pelo produto para o modo orientado a uma produção inteligente e sustentável (REN *et al.*, 2019).

#### 4.1.4 Alemanha

A Alemanha é o país com maior Índice H (6) e com apenas uma patente registrada na área da pesquisa (ORBIT, 2020; SCOPUS, 2020).

#### 4.1.4.1 Governo

Para guiar seu desenvolvimento tecnológico e de inovação o Governo alemão criou o plano de ação “*High-Tech Strategy 2025*” (HTS 2025) a partir do crescimento econômico, ambiental e social utilizando tecnologias inteligentes. Ele se concentrou em três elementos-chave: desafios sociais, fortalecimento de competências profissionais e fomento à cultura de inovação (BUNDESTAG, 2020).

Para fomentar a sustentabilidade urbana, o Governo alemão lançou o *Wärmenetzsysteme 4.0*, que consiste no financiamento de sistemas de aquecimento inteligentes com o objetivo de o meio ambiente e integrar a utilização das energias renováveis voltadas ao aquecimento de ambientes, contribuindo para sustentabilidade ambiental e econômica no setor energético (BUNDESTAG, 2017).

#### 4.1.4.2 Organizações

De acordo com as buscas realizadas na plataforma Orbit a única organização na Alemanha que desenvolveu e registrou patente foi a *Daimler*. Essa patente funciona por meio de Cloud Computing para gestão sustentável no transporte de alimentos (ORBIT, 2020).

Com o intuito de incentivar a inovação tecnológica (registro de novas patentes voltados a Indústria 4.0, são promovidas feiras como a *Hannover Messe* (HM), que possui uma plataforma física e digital internacional de divulgação de startups e tecnologias inovadoras que enfatiza a Sustentabilidade (HANNOVER MESSE, 2020).

Na HM é possível encontrar startups e conceitos voltados para o agronegócio, como “*Weed Whacker*” da startup Odd.Bot, que traz um novo conceito de capina inteligente para as terras agrícolas. Essa tecnologia auxilia o plantio sustentável, aumentando o rendimento agrícola, redução da exposição do trabalhador do campo a produtos tóxicos e diminuindo a degradação do meio ambiente por meio de maquinários e sensoriamento inteligentes (BOROWIECKI *et al.*, 2019; LIN; SHYU; DING, 2017; ODD. BOT, 2020; TAO *et al.*, 2016).

Seu maior diferencial é a aplicação dos produtos químicos na lavoura por meio do “*Weed Whacker*”, mitigando o problema de contaminação por produtos químicos nocivos à saúde provenientes de agrotóxicos (ELAHI *et al.*, 2019; ODD. BOT, 2020).

A fabricante *Cybus* criou o software “*Cybus Connectware*” que faz monitoramento e manutenção preditiva e proporciona redução dos acidentes e dos desperdício de insumos,

aumento da eficiência energética e a resolução dos recorrentes problemas de conflito de dados. O software funciona por meio do sensoriamento inteligente, IoT e Big Data (CYBUS, 2020). Esse tipo de tecnologia é transversal aos três pilares do TBL, eficiência energética, redução de acidentes e redução do desperdício de insumos (LOZANO, 2020).

#### 4.1.4.3 Academia

As três universidades com maior Índice H em S4.0 são: *Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg* (FAU), *Technical University of Berlin* (TUB) e *Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology* (FIPK).

A FAU tem uma linha de pesquisa voltada pra tecnologia e inovação chamada “Digitalização e Inovação” que projeta e avalia as mudanças e inovações na sustentabilidade de produtos, processos, serviços baseados na tecnologia digital (FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG, 2020).

Na FAU estão os três principais autores alemães sobre S4.0, Professor Dr. Julian Marius Müller, Professor Dr. Kai-Ingo Voigt e o Dr. Daniel Kiel. Esses autores identificaram as relações sinérgicas e dissonantes entre o uso das tecnologias da Indústria 4.0 para impulsionar Sustentabilidade (BIRKEL *et al.*, 2019; KIEL *et al.*, 2017; MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018; MÜLLER; VOIGT, 2018).

O programa de financiamento de projetos sustentáveis “*Nachhaltigkeit auf dem Bau: Berlin baut mit Holz*” aprovado pela Câmara dos deputados de Berlim incentivou a parceria entre a TUB, FIPK e a companhia *Tegel Projekt GmbH* para criar o *Bauhütte 4.0* (Edifício 4.0). O projeto *Bauhütte 4.0* iniciou a investigação do potencial da Indústria 4.0 em agregar valor à urbanização sustentável, com objetivo de neutralizar o aumento das emissões de gases de efeito estufa nas áreas metropolitanas com novos métodos de construção em madeira de fontes renováveis em conjunto a introdução de tecnologias da Indústria 4.0 (ABGEORDNETENHAUS VON BERLIN, 2019; BAUHÜTTE 4.0, 2020).

Projetos como o *Bauhütte 4.0* são frutos de leis e políticas que reduzem a degradação ambiental na construção civil por meio de materiais ecológicos e processos que não agridam o meio ambiente (BANANI *et al.*, 2016; KISKU *et al.*, 2017; MOSCHETTI; MAZZARELLA; NORD, 2015).

#### 4.1.5 Brasil

O Brasil é o país com maior Índice H (6) e com apenas uma patente registrada na área da pesquisa (ORBIT, 2020; SCOPUS, 2020).

##### 4.1.5.1 Governo

O Governo Brasileiro em parceria com o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) em parceria com o governo federal, criaram a iniciativa do “Programa Indústria Mais Avançada” para desenvolver implementar as tecnologias da Indústria 4.0 empresas de pequeno e médio porte. O projeto apresenta resultados práticos nas indústrias do ramo alimentício (CNI, 2017). Destaca-se que o Brasil comparado aos demais países analisados não apresenta políticas bem estruturadas para o desenvolvimento da Sustentabilidade 4.0.

Essa iniciativa faz parte do Programa Brasil Mais Produtivo, conduzido pelo SENAI e o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços. As organizações de pequeno e médio porte no Brasil dispõem de auxílio do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social para o financiamento de projetos de inovação, esse apoio auxilia na aquisição e implementação das tecnologias da Indústria 4.0 (CNI, 2017; SENAI, 2017).

Para fomentar a adoção e a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 a Agência Brasileira de Desenvolvimento da Indústria criou o “Programa Agro 4.0”. A utilização dessas tecnologias no agronegócio possibilita maior eficiência energética, aumento da produtividade e reduz desperdícios (ABDI, 2021). O desenvolvimento da Indústria 4.0 no Brasil não é significativo, tendo como alguns dos motivos os desafios financeiros para aquisição de equipamentos que incorporem as tecnologias da Indústria 4.0, à adaptação de layouts, adaptação de processos e falta de mão de obra qualificada, entre outros (CNI, 2020; PORTAL DA INDÚSTRIA, 2020).

##### 4.1.5.2 Organizações

De acordo com as buscas realizadas na plataforma Orbit foi identificada patente registrada apenas pela Universidade Federal de Minas Gerais, que apesar de ser uma universidade está é a única organização que registrou patente dentro do tema no Brasil. Essa patente funciona por meio de Inteligência Artificial (IA) para controle e análise de contaminação, adulteração e modificação de sistemas físicos, químicos e biológicos, tendo a



capacidade de analisar esse sistema em fases gasosas, líquidas, sólidas e misturas dessas fases (ORBIT, 2020).

A Vale investiu na digitalização de seus processos e no uso de IA e Big Data e sensoramento, essas tecnologias aumentaram a vida útil dos pneus de caminhões que fazem o transporte do minério, representando uma economia de US\$ 5 milhões em pneus e menor descarte de resíduos, assim fortalecendo a economia e reduzindo os impactos ambientais (SITEWARE, 2020).

Destaca-se que o Brasil comparado aos demais países tem grande parte das ações sobre S4.0 em Instituições de Pesquisa, Ciência e Tecnologias (IPCT) públicas, os outros países analisados tem a maior parte em instituições privadas. O Brasil ao contrário dos demais é o que apresenta os menores investimentos em termos de participação no PIB para desenvolvimento de Inovação (WIPO, 2021).

#### 4.1.5.3 Academia

As três universidades com maior Índice H em S4.0 são: Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Universidade Paulista (UNIP) e Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR).

A UFSCar possui pesquisas na área de tecnologias inteligentes voltadas a economia circular e desenvolvimentos sustentável. Essas tecnologias contribuem para fortalecimento econômico e proteção ambiental. Na UFSCar está o autor brasileiro com maior Índice H sobre S4.0, Professor Dr. Moacir Godinho Filho, esse autor analisou os fatores críticos para o sucesso da integração da Indústria 4.0 e a Manufatura Sustentável. Esse autor propôs também um roteiro para desenvolver a Economia Circular por meio de tecnologias da Indústria 4.0 (JABBOUR *et al.*, 2018a, 2018b).

Na UNIP estão dois dos principais autores brasileiros com maior Índice sobre S4.0, Professora Dra. Silvia Helena Bonilla e Professora Dra. Cecília Maria Villas Boas Almeida, que realizaram pesquisas sobre os impactos das tecnologias da Indústria 4.0 no uso eficiente de matéria-prima, redução do consumo de energia e redução de resíduos, assim contribuindo para o desenvolvimento sustentável em organizações (BONILLA *et al.*, 2018; REN *et al.*, 2019).

A PUCPR desenvolveu estudos que propõem uma agenda para o desenvolvimento da manufatura sustentável por meio das tecnologias da Indústria 4.0. Essa agenda identifica a possibilidade de redução da poluição, maior eficiência energética e melhoria da qualidade no

processo manufatureiro (MACHADO; WINROTH; RIBEIRO DA SILVA, 2020; QUEZADA *et al.*, 2017).

## 4.2 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE OPORTUNIDADES E DESAFIOS PARA DESENVOLVER A S4.0

Nesta seção serão apresentadas as principais oportunidades e desafios para o desenvolvimento da S4.0 identificadas na literatura científica. As identificações foram feitas por meio das lacunas científicas e de questões críticas a partir dos 30 artigos que apresentaram o maior número de citações no tema.

### 4.2.1 Oportunidades para Desenvolver a S4.0

Neste subcapítulo apresenta-se as principais oportunidades para desenvolver a S4.0. Foram elaborados seis oportunidades (Quadro 4).

Quadro 4 – Oportunidades de pesquisa sobre S4.0

Oportunidades de Pesquisa	Autores
Identificar os impactos da integração entre sustentabilidade e Indústria 4.0 na <i>supply chain</i>	Bag <i>et al.</i> (2018); Luthra and Mangla (2018); Manavalan and Jayakrishna (2019); Yazdi <i>et al.</i> (2018).
Propor estratégias para integrar a sustentabilidade com a Indústria 4.0	Jabbour <i>et al.</i> (2018a); Kiel <i>et al.</i> (2017); Kumar <i>et al.</i> (2018); Lin <i>et al.</i> (2017); Meng <i>et al.</i> (2018); Prause and Atari (2017); Ren <i>et al.</i> (2019); Shim <i>et al.</i> (2018).
Integrar a gestão de riscos a S4.0	Birkel <i>et al.</i> (2019); Ghadimi <i>et al.</i> (2019).
Propor novos modelos de processos produtivos sustentáveis com a utilização das tecnologias da Indústria 4.0	Ding (2018); Franciosi <i>et al.</i> (2018); Garrido-Hidalgo <i>et al.</i> (2018); Kamble <i>et al.</i> (2019); Prause (2015).
Identificar e avaliar os impactos da implementação da Indústria 4.0 no TBL	Ardanza <i>et al.</i> (2019); Müller and Voigt (2018).
Identificar as contribuições da S4.0 para governos, organizações e pessoas	Bányai <i>et al.</i> (2019); Batkovskiy <i>et al.</i> (2019); Bonilla <i>et al.</i> (2018); Branger and Pang (2015); Haseeb <i>et al.</i> (2019); Jabbour <i>et al.</i> (2018b); Kamble <i>et al.</i> (2018); Müller <i>et al.</i> (2018); Stock <i>et al.</i> (2018).

Fonte: Próprio autor (2021).

Na oportunidade intitulada “Identificar os impactos da integração entre sustentabilidade e Indústria 4.0 no *supply chain*” deve-se buscar oportunidades na implementação de

tecnologias inteligentes que possam reduzir os impactos ambientais em cada etapa do processo produtivo. Para interligar a cadeia de distribuição, recomenda-se pesquisas que incluam o capital intelectual para acelerar a Indústria 4.0 nas organizações (BAG *et al.*, 2018).

No grupo de oportunidade “Propor estratégias para integrar a sustentabilidade a Indústria 4.0” devem ser realizadas pesquisas que abordem a possibilidade de implementar ferramentas estatísticas para o desenvolvimento de layouts na Indústria 4.0, considerando-se as dimensões das esferas da sustentabilidade para a escolha do processo produtivo ideal na perspectiva do TBL (KUMAR; SINGH; LAMBA, 2018).

Na oportunidade “Integrar a gestão de riscos na S4.0” devem ser realizadas pesquisas que analisem e avaliem os riscos relacionados à inserção de tecnologias da Indústria 4.0 nas organizações. Na esfera ambiental, devem ser analisados os riscos de gastos energéticos e de desperdícios. Na esfera econômica, existem dilemas em relação aos altos investimentos que podem não ser convertidos em resultados lucrativos. Quanto à questão social, as organizações precisam avaliar os impactos nos postos de trabalho e na resistência dos colaboradores em se qualificar adequadamente para os novos modelos de Fábricas Inteligentes (BIRKEL *et al.*, 2019).

Na oportunidade intitulada “Propor novos modelos de processos produtivos sustentáveis com a utilização das tecnologias da Indústria 4.0” devem ser realizadas pesquisas que analisem como os conceitos da Indústria 4.0 podem melhorar a sustentabilidade na esfera ambiental, econômica e social dos processos manufatureiros (FRANCIOSI *et al.*, 2018). Devem ser avaliados também quais são os resultados na implementação das tecnologias IoT nas indústrias químicas e se há impactos no aumento da produtividade sustentável (DING, 2018; GARRIDO-HIDALGO *et al.*, 2018).

Na oportunidade “Identificar e avaliar os impactos da implementação da Indústria 4.0 no prisma do TBL” devem ser realizadas pesquisas que analisem as possibilidades de reduzir o consumo de energia por meio da integração entre o homem e a máquina. Busca-se também a economia de recursos, aproveitando os maquinários pré-existentes na organização, sem haver a necessidade de aquisição de tecnologias de alto valor agregado (ARDANZA *et al.*, 2019).

Na oportunidade “Identificar as contribuições da S4.0 para o desenvolvimento econômico, social e ambiental de governos, organizações e pessoas” devem ser realizadas pesquisas que proporcionem por meio da IoT e Cloud Computing um ambiente sustentável dentro das residências, por automatizarem os utensílios domésticos e integrá-los a uma rede de fácil gerenciamento. Essa integração reduz o consumo de gás, de energia elétrica ou de energia fotovoltaica, desligando os equipamentos quando estiverem fora de atividade

(BRANGER; PANG, 2015). Também devem ser realizadas pesquisas que abordem as implicações que a Indústria 4.0 pode ter no cumprimento das ODS, em relação aos ecossistemas, contribuindo para uma gestão ambiental eficaz (BONILLA *et al.*, 2018).

Além desses trabalhos utilizados para identificar as oportunidades cabe destacar trabalhos como o de Fatimah *et al.* (2020) que realizaram estudo que corrobora com a lacuna "Identificar e avaliar os impactos da implementação da Indústria 4.0 no TBL" por meio das tecnologias inteligentes Indústria 4.0 no contexto da gestão de resíduos. Com o uso do IoT e da digitalização é possível melhorar a integração da comunidade desde os campos de coleta até as indústrias de resíduos. Desta forma, os municípios podem alcançar um desempenho ambiental, econômico e social que contribua para o cumprimento dos objetivos. Oláh *et al.* (2020) concordam com a lacuna de oportunidades "Identificar as contribuições da S4.0 para governos, organizações e pessoas". Assim, a importância de os governos instituírem políticas bem definidas para conservar o meio ambiente e seus sistemas contra os impactos negativos do Indústria 4.0 pode ser reforçada.

Ao realizar as análises das oportunidades de pesquisa é possível identificar que as tecnologias da Indústria 4.0 podem contribuir para desenvolvimento consciente e sustentável da humanidade por meio dos elementos tecnológicos da Indústria 4.0 e isto contribui para o alcance dos seguintes ODS da UN: 9º (*Industries, Innovation and Infrastructure*), 11º (*Sustainable Cities and Communities*) e 13º (*Climate Action*). Esses ODSs visam garantir respectivamente: promover a industrialização sustentável; tornar as cidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis; e combater a mudança climática e seus impactos (HASEEB *et al.*, 2019; JABBOUR *et al.*, 2018a; UNITED NATIONS, 2020b).

#### **4.2.2 Desafios para Desenvolver a S4.0**

Neste subcapítulo apresenta-se os principais desafios para desenvolver a S4.0. Foram elaborados seis desafios (Quadro 5).

Quadro 5 – Desafios para o desenvolvimento da S4.0

Desafios de Pesquisa	Autores
Alto custo para modernização/adequação de estrutura e tecnologias inteligentes	Birkel <i>et al.</i> (2019); Haseeb <i>et al.</i> (2019); Kiel <i>et al.</i> (2017); Lin <i>et al.</i> (2017); Manavalan and Jayakrishna (2019); Yazdi <i>et al.</i> (2018).
Falta de know-how das empresas e capital humano qualificado	Ardanza <i>et al.</i> (2019); Bag <i>et al.</i> (2018); Bonilla <i>et al.</i> (2018); Ding (2018); Garrido-Hidalgo <i>et al.</i> (2018); Ghadimi <i>et al.</i> (2019); Kamble <i>et al.</i> (2018); Luthra and Mangla (2018); Müller <i>et al.</i> (2018); Shim <i>et al.</i> (2018); Stock <i>et al.</i> (2018).
Desajuste na cadeia de suprimentos	Franciosi <i>et al.</i> (2018); Müller and Voigt (2018); Prause and Atari (2017).
Divergência de objetivos entre a sustentabilidade e Indústria 4.0	Jabbour <i>et al.</i> (2018a); Kumar <i>et al.</i> (2018).
Falta de infraestrutura	Bányai <i>et al.</i> (2019); Batkovskiy <i>et al.</i> (2019); Meng <i>et al.</i> (2018); Prause (2015); Ren <i>et al.</i> (2019).
Necessidade de alinhamento organizacional	Branger and Pang (2015); Jabbour <i>et al.</i> (2018b); Kamble <i>et al.</i> (2019).

Fonte: Próprio autor (2021).

No desafio “Alto custo para modernização/adequação de estrutura e tecnologias inteligentes” devem ser superadas desafios financeiras para as Pequena e Média Empresas (PMEs) adquirirem tecnologias de ponta, falta de infraestrutura tecnológica para conexão e troca de dados dentro da organização e transpor desafios de para implementação e desenvolvimento de estruturas com tecnologias inteligentes (BIRKEL *et al.*, 2019; HASEEB *et al.*, 2019; KIEL *et al.*, 2017).

No desafio intitulado “Falta de know-how das empresas e capital humano qualificado” a falta de know-how para implementação das tecnologias da Indústria 4.0 cria barreiras para implementação da S4.0 assim como a falta de dados iniciais dos benefícios da Indústria 4.0 para a sustentabilidade organizacional e mão de obra qualificada e desafios em especializar a mão de obra (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018; MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018; STOCK *et al.*, 2018).

O desafio “Desajuste na cadeia de suprimentos” passa pela falta de conhecimento dos impactos da Indústria 4.0 na cadeia de valor, falta de infraestrutura e desafios para encontrar parceiros e fornecedores adequados com as tecnologias da Indústria 4.0 (FRANCIOSI *et al.*, 2018; MÜLLER; VOIGT, 2018; PRAUSE; ATARI, 2017).

O quarto desafio nomeado “Divergência de objetivos entre as sustentabilidade e Indústria 4.0” encontra barreiras para integrar um layout sustentável a uma fábrica inteligente que atenda aos objetivos de sustentabilidade das organizações (JABBOUR *et al.*, 2018a; KUMAR; SINGH; LAMBA, 2018). No desafio “Falta de infraestrutura” há dificuldades em atender as novas normatizações para a sustentabilidade com a inserção da Indústria 4.0 e a inexistência de infraestrutura básica para implementação das tecnologias a Indústria 4.0 (BATKOVSKIY *et al.*, 2019; MENG *et al.*, 2018; PRAUSE, 2015; REN *et al.*, 2019).

No sexto desafio “Necessidade de alinhamento organizacional” a coordenação de ações em diferentes áreas organizacionais e preocupações com a cibersegurança ocasionam barreiras para integrar a sustentabilidade junto a Indústria 4.0 (JABBOUR *et al.*, 2018b). Desafios para o alinhamento organizacional são observados também na dificuldade em equilibrar a produção e a alta demanda de energia com as tecnologias da Indústria 4.0 (BRANGER; PANG, 2015).

Além desses trabalhos utilizados para identificar os desafios cabe destacar trabalhos como o de Yadav *et al.* (2020) que mencionam a existência de lacuna entre a disponibilidade do livre comércio e as políticas de sustentabilidade, dificultando o alinhamento de procedimentos estratégicos em uma cadeia de *Green Supply Chain* [64], corroborando com o desafios " Desajuste na cadeia de suprimentos".


Tiwari e Khan (2020) citam as dificuldades de investir em uma estrutura que contempla as tecnologias Indústria 4.0 e também levanta a possibilidade de indústrias "convencionais buscarem formas de retaliação para preservar seus mercados. Bag *et al.* (2021) observam que, como as tecnologias Indústria 4.0 são recentes, as organizações encontram muitas barreiras para serem capazes de implementá-los satisfatoriamente, principalmente devido aos altos custos e à falta de operação estrutura.

## 5 FRAMEWORK PARA DESENVOLVIMENTO DA S4.0

Nesta seção será apresentado o *framework* para desenvolver a S4.0 nos setores da Triple Helix (Quadro 6).



Quadro 6 – Framework para desenvolvimento da S4.0

(continua)

Triple Helix Setores	Proposições	Triple-Helix Conexões	Referências Científicas e Teóricas
 <b>Governo</b>	Instituir um programa nacional para o desenvolvimento tecnológico e sustentável da indústria	Organizações	Institute for Security and Development Policy (2020); Müller and Voigt (2018); The People's Republic of China (2020)
	Instituir um Plano Nacional para desenvolver a conectividade social com uso de tecnologias inteligentes	Organizações e Academia	Haseeb <i>et al.</i> (2019); Lozano (2020); Swarnima <i>et al.</i> (2017)
	Melhorar a qualidade de vida a partir do monitoramento da qualidade do ar e volume de ruídos utilizando sensoriamento remoto inteligente	Organizações	United States Environmental Protection Agency (2020b)
	Elaborar planos para desenvolvimento agrícola, gerenciamento de resíduos sólidos, redução da poluição fabril e aumento da eficiência energética utilizando as tecnologias da Indústria 4.0	Organizações e Academia	Borowiecki <i>et al.</i> (2019); Lin <i>et al.</i> (2017); Odd. Bot (2020); Tao <i>et al.</i> (2016)
	Financiar projetos de desenvolvimento de tecnologias inteligentes e infraestrutura que aproveite a energia renovável para o desenvolvimento sustentável	Academia	Abgeordnetenhaus von Berlin (2019); Bauhütte 4.0 (2020)
	Fomentar a S4.0 na construção civil por meio de incentivos fiscais	Organizações	Abgeordnetenhaus von Berlin (2019); Bauhütte 4.0 (2020); Kisku <i>et al.</i> (2017); Moschetti <i>et al.</i> (2015)
	Criar programas de financiamento de startups que desenvolvam tecnologias inteligentes que assegurem a integridade física do trabalhador urbano e rural	Organizações e Academia	Hannover Messe, (2020)
	Facilitar a aquisição de estruturas e tecnologias inteligentes nas organizações	Organizações	Birkel <i>et al.</i> (2019); Haseeb <i>et al.</i> (2019); Kiel <i>et al.</i> (2017); Lin <i>et al.</i> (2017)

## Quadro 6 – Framework para desenvolvimento da S4.0

(conclusão)

Triple Helix Setores	Proposições	Triple-Helix Conexões	Referências Científicas e Teóricas
 <b>Organizações</b>	Criar sistemas com tecnologias inteligentes para melhorar o tráfego de veículos e reduzir as emissões de CO <sub>2</sub>	Governo e Academia	IBM, (2020b); Haseeb <i>et al.</i> (2019); Lozano (2020)
	Utilizar tecnologias inteligentes para o tratamento e gerenciamento de água em suas instalações	Governo e Academia	IBM, (2020b); Haseeb <i>et al.</i> (2019); Lozano (2020)
	Reduzir o consumo de recursos materiais e energéticos por meio da digitalização, Clouds e IoT	Governo	Lozano (2020); Newell and Vos (2011); Xerox (2020b), Xerox (2020c)
	Melhorar a integração da sociedade a partir de redes colaborativas com alta capacidade e velocidade para troca de informações em tempo real	Governo	National Mobile Communications Research Laboratory, (2020)
	Implementar estratégias que viabilizem o alinhamento organizacional com a S4.0	Academia	Branger and Pang (2015); Jabbour <i>et al.</i> (2018b); Kamble <i>et al.</i> (2019).
	Utilizar tecnologias inteligentes para desinfecção de materiais contaminados biologicamente	Governo e Academia	Chung <i>et al.</i> (2020); Lozano (2020); VST Mobility Solutions (2020c)
 <b>Academia</b>	Investigar novas fontes de energia limpa com auxílio da Indústria 4.0	Governo e Organizações	Indian Institute of Technology Delhi (2020); Kamble <i>et al.</i> (2018); Manavalan and Jayakrishna (2019)
	Desenvolver pesquisas com tecnologias da Indústria 4.0 que viabilizem uma gestão sustentável	Organizações	(Bai <i>et al.</i> (2018); Bonilla <i>et al.</i> (2018); Esmaeilian <i>et al.</i> (2020)
	Prospectar e estabelecer parcerias entre universidades e organizações que estejam avançadas em pesquisas nos temas Indústria 4.0 e Sustentabilidade	Organizações	Abgeordnetenhaus von Berlin, (2019); Bauhütte 4.0 (2020)
	Desenvolver estratégias e ferramentas para integrar a Sustentabilidade com a Indústria 4.0	Organizações	Kumar <i>et al.</i> (2018)
	Propor modelos, ferramentas e boas práticas para desenvolvimento do know-how e capital humano para a S4.0	Organizações	Kamble <i>et al.</i> (2018); Müller <i>et al.</i> (2018); Stock <i>et al.</i> (2018)

Fonte: Próprio autor (2021).

Para desenvolvimento da S4.0 no setor “Governo”, é sugerida a criação de planos nacionais que contribuam para uma melhor gestão de recursos naturais, produtos manufaturados, resíduos e energia nas áreas urbanas e rurais. Para aquisição de tecnologias inteligentes sustentáveis devem ser disponibilizados financiamentos, incentivos fiscais e facilidades, como por exemplo a prorrogação de prazo e oferta de juros subsidiados. A administração pública também pode incorporar a S4.0 para a melhoria da qualidade de vida, por meio da redução da poluição sonora e pela diminuição da emissão de CO<sub>2</sub> no ar. Destaca-



se que esse setor necessita de parcerias bem desenvolvidas com o setor acadêmico, uma vez que o Quadro 6 aponta que quatro das oito proposições sugeridas têm participação do setor acadêmico.

As ações sugeridas para o desenvolvimento da S4.0 no setor “Organizations” contribuem diretamente para a saúde pública, gestão organizacional e Information and Communication Technology (ICT). Na saúde pública são apresentadas soluções para redução da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, melhoria da performance do tratamento de água potável e desinfecção de materiais biologicamente contaminados. Em gestão organizacional o foco é alinhar as estratégias da organização com conceitos e estruturas da S4.0 para o cumprimento das ODSs e aumento da eficácia operacional. Quanto às ICTs os principais objetivos são direcionados à conectividade, proporcionando aumento de produtividade e conveniência.

As ações recomendadas para o setor “Academy” do *framework* tem por objetivo a integração dos conhecimentos entre a sustentabilidade e a Indústria 4.0, inovação de processos e produtos nos moldes da S4.0, formação e qualificação dos agentes envolvidos em cada um dos setores da TH. A integração dos conhecimentos que compõem a S4.0 devem articular soluções para os conflitos entre a alta performance tecnológica e o desenvolvimento sustentável. A inovação de processos e produtos devem aprimorar as tecnologias inteligentes para melhorar a qualidade de vida da sociedade, fortalecer a economia e proteger o meio-ambiente. Na formação e qualificação, as instituições de ensino devem formar indivíduos que priorizem a tecnologia sempre alicerçada atender as necessidades atuais da sociedade sem comprometer as condições básicas de vida das gerações futuras conforme o Relatório de Brundtland.

Desse modo, as estratégias e iniciativas do *framework* proposto devem ser realizadas por meio de constantes interações entre os setores da TH. A recomendação para a interação “Government – Organizações” é a criação de programas de financiamento para acesso à infraestrutura tecnológica da S4.0. As sugestões para a interação “Government – Academia” são: o desenvolvimento da S4.0 por meio da formação de centros de pesquisa e a criação de políticas para o financiamento de pesquisas da S4.0. A proposição para a interação “Organizações – Academia” é a criação e implementação de tecnologias e iniciativas que possibilitem o desenvolvimento sustentável por meio das tecnologias da Indústria 4.0. Por fim os três setores juntos abrem caminho para o desenvolvimento sustentável ajudando a superar desafios globais da mudança climática, degradação ambiental, progresso tecnológico responsável e seguro, aumento da inclusão social, entre outros.

## 6 CONCLUSÃO

Esta dissertação propôs um *framework* para desenvolver a S4.0 nos setores Government, Organizations and Academy da TH. O conjunto de análises do CTC-S4.0 permitiu identificar meios para a Indústria 4.0 e a sustentabilidade se integrarem e alcançar os ODS da ONU. Esse *framework* contribui para a criação de processos sustentáveis nas organizações, crescimento sustentável das cidades e a redução dos impactos ambientais no planeta, por meio das tecnologias da Indústria 4.0.

A principal contribuição científica deste trabalho foi identificar e avaliar as contribuições da S4.0 para governos, organizações e pessoas. Assim foi possível expandir e aprofundar a S4.0, acrescentando-lhe estratégias, iniciativas, desafios e oportunidades para que o desenvolvimento da Indústria 4.0 se dê de forma alinhada à sustentabilidade. Quanto à contribuição aplicada, este trabalho contribui para o desenvolvimento consciente e sustentável da sociedade por meio dos elementos tecnológicos da Indústria 4.0 conforme o “*Davos Manifesto*” apresentado no *World Economic Forum* de 2020 e para o alcance dos seguintes ODSs da ONU: 9º (Industries, Innovation and Infrastructure), 11º (Sustainable Cities and Communities) e 13º (Climate Action). Esses ODSs visam garantir respectivamente: promover a industrialização sustentável; tornar as cidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis; e combater a mudança climática e seus impactos.

Baseada nessas contribuições a principal novidade da pesquisa é a proposição de políticas e iniciativas voltadas a S4.0 para os setores da TH, estruturadas com base no conhecimento científico, análise do autor e desenvolvimento tecnológico de mais alta performance mundial. Dessa forma, governo, organizações e academia podem potencializar suas ações de fomento a S4.0, proporcionando mais e melhores soluções para os desafios do desenvolvimento sustentável. Para futuras pesquisas é sugerido que utilizem outras bases de dados e diferentes critérios de pesquisa para identificar mais países com políticas e iniciativas que possam ser acrescentadas ao *framework*. Também são recomendados estudos que possam mensurar os impactos das tecnologias da Indústria 4.0 no desenvolvimento sustentável.

## REFERÊNCIAS

- ABDI. **Projeto do Agro 4.0 lança plataforma para medir digitalização das fazendas.** Disponível em: <https://www.abdi.com.br/postagem/projeto-do-agro-4-0-lanca-plataforma-para-medir-digitalizacao-das-fazendas>. Acesso em: 22 jun. 2021.
- ABGEORDNETENHAUS VON BERLIN. **Nachhaltigkeit auf dem bau: Berlin baut mit Holz.** Disponível em: <https://www.parlament-berlin.de/ados/18/IIIPlen/vorgang/d18-2225.pdf>. Acesso em: 1 ago. 2020.
- AINSWORTH-ROWEN, E. Networked, smart, and responsive devices in sustainable internet-of-things-based Manufacturing systems: industrial value creation, cognitive Decision-making algorithms, and operational performance improvement. **Economics, Management, and Financial Markets**, Nova York, v. 14, n. 3, p. 9, 2019.
- AKÇAYIR, M.; AKÇAYIR, G. Advantages and challenges associated with augmented reality for education: a systematic review of the literature. **Educational Research Review**, Amsterdam, v. 20, p. 1–11, fev. 2017.
- ALEDO, J. A. *et al.* Consensus-based journal rankings: a complementary tool for bibliometric evaluation. **Journal of the Association for Information Science and Technology**, Hoboken, v. 69, n. 7, p. 936–948, jul. 2018.
- AMERICAN ASSOCIATION FOR ECONOMIC RESEARCH. **ISBDA.** Disponível em: [https://aaer.org/isbda?fbclid=IwAR18WjYSm6LqAMtXhvWDR\\_mlNLP9TjP5KraHAPmODcYhSWm5viZHqoB0tg8](https://aaer.org/isbda?fbclid=IwAR18WjYSm6LqAMtXhvWDR_mlNLP9TjP5KraHAPmODcYhSWm5viZHqoB0tg8). Acesso em: 19 ago. 2020.
- AMINI, M.; BIENSTOCK, C. C. Corporate sustainability: an integrative definition and framework to evaluate corporate practice and guide academic research. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 76, p. 12–19, ago. 2014.
- ARDANZA, A. *et al.* Sustainable and flexible industrial human machine interfaces to support adaptable applications in the Industry 4.0 paradigm. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 57, n. 12, p. 4045–4059, 18 jun. 2019.
- ASIAN DEVELOPMENT BANK. **People’s Republic of China: Country Partnership Strategy (2016-2020).** Disponível em: <https://www.adb.org/documents/peoples-republic-china-country-partnership-strategy-2016-2020>. Acesso em: 10 set. 2020.
- BAG, S. *et al.* Industry 4.0 and supply chain sustainability: framework and future research directions. **Benchmarking: An International Journal**, Bingley, p. BIJ-03-2018-0056, 20 dez. 2018.
- BAG, S.; GUPTA, S.; KUMAR, S. Industry 4.0 adoption and 10r advance manufacturing capabilities for sustainable development. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 231, n. December 2019, p. 107844, jan. 2021.
- BAI, C. *et al.* Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 229, p. 107776, nov. 2020.

BAI, X. *et al.* Comprehensive water footprint assessment of the dairy industry chain based on ISO 14046: A case study in China. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 132, n. February, p. 369–375, maio 2018.

BANANI, R. *et al.* The development of building assessment criteria framework for sustainable non-residential buildings in Saudi Arabia. **Sustainable Cities and Society**, Amsterdam, v. 26, p. 289–305, out. 2016.

BÁNYAI, T. *et al.* Optimization of municipal waste collection routing: impact of industry 4.0 technologies on environmental awareness and sustainability. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Basel, v. 16, n. 4, p. 634, 21 fev. 2019.

BATKOVSKIY, A. M. *et al.* Sustainable development of Industry 4.0: the case of high-tech products system design. **Entrepreneurship and Sustainability Issues**, Vilnius, v. 6, n. 4, p. 1823–1838, 1 jun. 2019.

BAUHÜTTE 4.0. **Bauhütte 4.0**. Disponível em: <https://www.bauhuetten40.com/>. Acesso em: 25 jul. 2020.

BAUMGARTNER, R. J. Managing corporate sustainability and CSR: a conceptual framework combining values, strategies and instruments contributing to sustainable development. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, Oxford, v. 21, n. 5, p. 258–271, set. 2014.

BEIJING UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. **About BJUT**. Disponível em: [http://english.bjut.edu.cn/About/About\\_BJUT.htm](http://english.bjut.edu.cn/About/About_BJUT.htm). Acesso em: 25 set. 2020.

BIGLIARDI, B.; BOTTANI, E.; CASELLA, G. Enabling technologies, application areas and impact of industry 4.0: a bibliographic analysis. **Procedia Manufacturing**, Amsterdam, v. 42, n. 2019, p. 322–326, 2020.

BIRKEL, H. *et al.* Development of a Risk Framework for Industry 4.0 in the Context of Sustainability for Established Manufacturers. **Sustainability**, Basel, v. 11, n. 2, p. 384, 14 jan. 2019.

BIRKEL, H.; MÜLLER, J. M. Potentials of industry 4.0 for supply chain management within the triple bottom line of sustainability – a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 289, p. 125612, mar. 2021.

BONAVOLONTA, F. *et al.* Enabling wireless technologies for industry 4.0: state of the art. *In: 2017 IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON MEASUREMENT AND NETWORKING (M&N)*, 2017, Nápoles. **Anais [...]. Piscataway: IEEE**, set. 2017. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8078381/>. Acesso em: 20 jan. 2021.

BONILLA, S. *et al.* Industry 4.0 and sustainability implications: a scenario-based analysis of the impacts and challenges. **Sustainability**, Basel, v. 10, n. 10, p. 3740, 17 out. 2018.

BORNMANN, L. *et al.* The application of bibliometrics to research evaluation in the humanities and social sciences: An exploratory study using normalized Google Scholar data for the publications of a research institute. **Journal of the Association for Information Science and Technology**, Hoboken, v. 67, n. 11, p. 2778–2789, nov. 2016.

- BOROWIECKI, M. *et al.* Supporting research for sustainable development. **OECD Science, Technology and Industry Policy Papers**, Paris, n. 78, p. 71, 2019.
- BORTOLINI, M. *et al.* Assembly system design in the Industry 4.0 era: a general framework. **IFAC-PapersOnLine**, Amsterdam, v. 50, n. 1, p. 5700–5705, jul. 2017.
- BRACCINI, A.; MARGHERITA, E. Exploring Organizational Sustainability of Industry 4.0 under the Triple Bottom Line: The Case of a Manufacturing Company. **Sustainability**, Basel, v. 11, n. 1, p. 36, 21 dez. 2018.
- BRANGER, J.; PANG, Z. From automated home to sustainable, healthy and manufacturing home: a new story enabled by the Internet-of-Things and Industry 4.0. **Journal of Management Analytics**, Abingdon, v. 2, n. 4, p. 314–332, 2 out. 2015.
- BROZZI, R. *et al.* The advantages of industry 4.0 applications for sustainability: results from a sample of manufacturing companies. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 9, p. 3647, 1 maio 2020.
- BUNDESTAG, D. **Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan**. Disponível em: <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/203/1920364.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2020.
- BUNDESTAG, D. **Bundesbericht Forschung und Innovation 2020**. Disponível em: <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/193/1919310.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2020.
- CALIFORNIA STATE UNIVERSITY BAKERSFIELD. **CSUB Sustainability**. Disponível em: <https://www.csub.edu/sustainability/>. Acesso em: 18 ago. 2020.
- CERUTI, A. *et al.* Maintenance in aeronautics in an industry 4.0 context: the role of augmented reality and additive manufacturing. **Journal of Computational Design and Engineering**, Oxford, v. 6, n. 4, p. 516–526, 1 out. 2019.
- CHINA DATANG. **Company Profile**. Disponível em: <http://www.cccme.org.cn/shop/cccme8991/introduction.aspx>. Acesso em: 10 set. 2020.
- CHONGQING UNIVERSITY. **An overview**. Disponível em: <http://english.cqu.edu.cn/>. Acesso em: 25 set. 2020.
- CHUNG, M. *et al.* CT Imaging Features of 2019 Novel Coronavirus (2019-nCoV). **Radiology**, Oak Brook, v. 295, n. 1, p. 202–207, abr. 2020.
- CIFFOLILLI, A.; MUSCIO, A. Industry 4.0: national and regional comparative advantages in key enabling technologies. **European Planning Studies**, Abingdon, v. 26, n. 12, p. 2323–2343, 2 dez. 2018.
- CNI. **Programa do SENAI em parceria com o governo leva Indústria 4.0 a pequenas e médias empresas**. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/competitividade/programa-do-senai-em-parceria-com-o-governo-leva-industria-40-a-pequenas-e-medias-empresas/>. Acesso em: 22 mar. 2021.
- CNI. **Empresas com tecnologia da indústria 4.0 enfrentam melhor a pandemia**. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/economia/empresas-com->

tecnologia-da-industria-40-enfrentam-melhor-a-pandemia/. Acesso em: 22 mar. 2021.

CORALLO, A.; LAZOI, M.; LEZZI, M. Cybersecurity in the context of industry 4.0: a structured classification of critical assets and business impacts. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 114, p. 103165, jan. 2020.

CÖSTER, M.; DAHLIN, G.; ISAKSSON, R. Are they reporting the right thing and are they doing it right?—a measurement maturity grid for evaluation of sustainability reports. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 24, p. 10393, dez. 2020.

CULOT, G. *et al.* Addressing industry 4.0 cybersecurity challenges. **IEEE Engineering Management Review**, Piscataway, v. 47, n. 3, p. 79–86, 1 set. 2019.

CYBUS. **Cybus Connectware Gateway and Integration Platform**. Disponível em: [https://www.messe.de/apollo/hannover\\_messe\\_2020/obs/Binary/A1020767/Cybus\\_Connectware\\_OnePager\\_FO\\_2019.pdf](https://www.messe.de/apollo/hannover_messe_2020/obs/Binary/A1020767/Cybus_Connectware_OnePager_FO_2019.pdf). Acesso em: 1 jul. 2020.

DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. **About DUT**. Disponível em: [https://en.dlut.edu.cn/Research/Research\\_Overview.htm](https://en.dlut.edu.cn/Research/Research_Overview.htm). Acesso em: 25 set. 2020.

DERNBACH, J. C.; MINTZ, J. A. Environmental laws and sustainability: an introduction. **Sustainability**, Basel, v. 3, n. 3, p. 531–540, 23 mar. 2011.

DILBEROGLU, U. M. *et al.* The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, Amsterdam, v. 11, p. 545–554, 2017.

DING, B. Pharma Industry 4.0: Literature review and research opportunities in sustainable pharmaceutical supply chains. **Process Safety and Environmental Protection**, Londres, v. 119, p. 115–130, out. 2018.

DRATH, R.; HORCH, A. Industrie 4.0: hit or hype? [industry forum]. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, Piscataway, v. 8, n. 2, p. 56–58, jun. 2014.

ECCLES, R. G.; IOANNOU, I.; SERAFEIM, G. The impact of corporate sustainability on organizational processes and performance. **Management Science**, Catonsville, v. 60, n. 11, p. 2835–2857, nov. 2014.

ELAHI, E. *et al.* Agricultural intensification and damages to human health in relation to agrochemicals: Application of artificial intelligence. **Land Use Policy**, Oxford, v. 83, p. 461–474, abr. 2019.

ELKINGTON, J. Accounting for the triple bottom line. **Measuring Business Excellence**, Bingley, v. 2, n. 3, p. 18–22, mar. 1998.

ENGERT, S.; RAUTER, R.; BAUMGARTNER, R. J. Exploring the integration of corporate sustainability into strategic management: a literature review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 112, p. 2833–2850, jan. 2016.

ESMAEILIAN, B. *et al.* Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 163, p. 105064, dez. 2020.

FATIMAH, Y. A. *et al.* Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system to achieve sustainable development goals: a case study of Indonesia. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 269, p. 122263, out. 2020.

FELSTEAD, M. Cyber-physical production systems in industry 4.0: smart factory performance, innovation-driven manufacturing process innovation, and sustainable supply chain networks. **Economics, Management, and Financial Markets**, Nova York, v. 14, n. 4, p. 37, 2019.

FERREIRA, W. DE P.; ARMELLINI, F.; DE SANTA-EULALIA, L. A. Simulation in industry 4.0: a state-of-the-art review. **Computers & Industrial Engineering**, Oxford, v. 149, p. 106868, nov. 2020.

FIELDEN, A. *et al.* Smart sustainable data-driven manufacturing: cyber-physical production systems and internet of things sensing networks. **Journal of Self-Governance and Management Economics**, Nova York, v. 7, n. 4, p. 7, 2019.

FRAGA-LAMAS, P. *et al.* A review on industrial augmented reality systems for the industry 4.0 shipyard. **IEEE Access**, Piscataway, v. 6, p. 13358–13375, 2018.

FRANCIOSI, C. *et al.* Maintenance for sustainability in the industry 4.0 context: a scoping literature review. **IFAC-PapersOnLine**, Amsterdam, v. 51, n. 11, p. 903–908, 2018.

FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG. **Seven unique research areas**. Disponível em: <https://www.wiso.rw.fau.eu/research/research-profile/research-focus-areas/>. Acesso em: 25 jun. 2020.

FRITTELLI, M.; MANCINI, L.; PERI, I. Scientific research measures. **Journal of the Association for Information Science and Technology**, Hoboken, v. 67, n. 12, p. 3051–3063, dez. 2016.

FUENTE, A. *et al.* Multi-criteria decision making in the sustainability assessment of sewerage pipe systems. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 112, p. 4762–4770, jan. 2016.

GARRIDO-HIDALGO, C. *et al.* IoT heterogeneous mesh network deployment for human-in-the-loop challenges towards a social and sustainable industry 4.0. **IEEE Access**, Piscataway, v. 6, n. 8, p. 28417–28437, 2018.

GAUB, H. Customization of mass-produced parts by combining injection molding and additive manufacturing with Industry 4.0 technologies. **Reinforced Plastics**, Kidlington, v. 60, n. 6, p. 401–404, nov. 2016.

GHADIMI, P. *et al.* Intelligent sustainable supplier selection using multi-agent technology: Theory and application for Industry 4.0 supply chains. **Computers & Industrial Engineering**, Oxford, v. 127, p. 588–600, jan. 2019.

GODINA, R. *et al.* Impact assessment of additive manufacturing on sustainable business models in industry 4.0 context. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 17, p. 7066, 30 ago. 2020.

GÓMEZ RIVAS, J. *et al.* Autonomous robots: a new reality in healthcare? a project by European Association of Urology-Young Academic Urologist group. **Current Opinion in**

**Urology**, Filadélfia, v. 31, n. 2, p. 155–159, mar. 2021.

GOYAL, P.; RAHMAN, Z.; KAZMI, A. A. Identification and prioritization of corporate sustainability practices using analytical hierarchy process. **Journal of Modelling in Management**, Bingley, v. 10, n. 1, p. 23–49, 16 mar. 2015.

GUERRERO, M.; URBANO, D. The impact of Triple Helix agents on entrepreneurial innovations' performance: an inside look at enterprises located in an emerging economy. **Technological Forecasting and Social Change**, Nova York, v. 119, p. 294–309, jun. 2017.

HAHN, T. *et al.* Cognitive frames in corporate sustainability: managerial sensemaking with paradoxical and business case Frames. **Academy of Management Review**, Briarcliff Manor, v. 39, n. 4, p. 463–487, out. 2014.

HAHN, T. *et al.* Tensions in corporate sustainability: towards an integrative framework. **Journal of Business Ethics**, Dordrecht, v. 127, n. 2, p. 297–316, 9 mar. 2015.

HANNOVER MESSE. **About Us**. Disponível em: <https://www.hannovermesse.de/en/about-us/about-the-show/>. Acesso em: 1 jul. 2020.

HASEEB, M. *et al.* Industry 4.0: A solution towards technology challenges of sustainable business performance. **Social Sciences**, Basel, v. 8, n. 5, p. 154, 16 maio 2019.

HIRSCH, J. E. Does the h index have predictive power? **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 104, n. 49, p. 19193–19198, 4 dez. 2007.

HOFMANN, E.; RÜSCH, M. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 89, p. 23–34, ago. 2017.

HOU, D. *et al.* A sustainability assessment framework for agricultural land remediation in China. **Land Degradation & Development**, Oxford, v. 29, n. 4, p. 1005–1018, abr. 2018.

HSIEH, H.-F.; SHANNON, S. E. Three approaches to qualitative content analysis. **Qualitative Health Research**, Thousand Oaks, v. 15, n. 9, p. 1277–1288, nov. 2005.

IBM. **About IBM**. Disponível em: <https://www.ibm.com/ibm/us/en/?lnk=fai-maib-usen>. Acesso em: 10 ago. 2020a.

IBM. **Energy and environment**. Disponível em: <https://www.ibm.com/ibm/green/>. Acesso em: 10 ago. 2020b.

IICONSORTIUM. **The Industrial Internet Consortium: A Global Nonprofit Partnership Of Industry, Government And Academia**. Disponível em: <https://www.iiconsortium.org/about-us.htm>. Acesso em: 23 jun. 2020.

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI. **Departments**. Disponível em: <https://home.iitd.ac.in/departments.php>. Acesso em: 3 set. 2020.

INGRAND, F.; GHALLAB, M. Deliberation for autonomous robots: A survey. **Artificial Intelligence**, Amsterdam, v. 247, p. 10–44, jun. 2017.

INSTITUTE FOR SECURITY AND DEVELOPMENT POLICY. **Made in China 2025**.



Disponível em: <https://isdpeu/publication/made-china-2025/>. Acesso em: 8 set. 2020.

INTERNATIONAL MONETARY FUND. **The People's Republic of China**: 2016 Article IV Consultation-Press Release; Staff Report; and Statement by the Executive Director for The People's Republic of China.

ISAKSSON, R. Creating a sense of urgency for sustainable development – testing two system models. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 227, p. 1173–1184, ago. 2019.

ISAKSSON, R.; BUREGYEYA, A. Understanding sustainability – the case of building blocks in Tanzania and Uganda. **The TQM Journal**, Bingley, v. ahead-of-p, n. ahead-of-print, ago. 2020.

IVANIUK, A. A. Optical module design for augmented reality glasses. **Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics**, St-Petersburg, v. 20, n. 5, p. 642–648, 1 out. 2020.

JABBOUR, A. B. L. DE S. *et al.* When titans meet – can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? the role of critical success factors. **Technological Forecasting and Social Change**, Nova York, v. 132, n. February, p. 18–25, jul. 2018a.

JABBOUR, A. B. L. DE S. *et al.* Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. **Annals of Operations Research**, Nova York, v. 270, n. 1–2, p. 273–286, 1 nov. 2018b.

KAMBLE, S.; GUNASEKARAN, A.; DHONE, N. C. Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 0, n. 0, p. 1–19, 17 jun. 2019.

KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A.; GAWANKAR, S. A. Sustainable industry 4.0 framework: a systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. **Process Safety and Environmental Protection**, Londres, v. 117, p. 408–425, jul. 2018.

KANG, H. S. *et al.* Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, Seul, v. 3, n. 1, p. 111–128, 23 jan. 2016.

KIEL, D. *et al.* Sustainable industrial value creation: benefits and challenges of industry 4.0. **International Journal of Innovation Management**, Londres, v. 21, n. 08, p. 1740015, 11 dez. 2017.

KIMATU, J. N. Evolution of strategic interactions from the triple to quad helix innovation models for sustainable development in the era of globalization. **Journal of Innovation and Entrepreneurship**, Heidelberg, v. 5, n. 1, p. 16, 1 dez. 2016.

KISKU, N. *et al.* A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 131, p. 721–740, jan. 2017.

KLEWITZ, J.; HANSEN, E. G. Sustainability-oriented innovation of SMEs: a systematic

- review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 65, p. 57–75, fev. 2014.
- KOTHARI, C. R.; GARG, G. **Research methodology methods and techniques**. 4<sup>o</sup> ed. Nova Deli: New Age International, 2019.
- KUMAR, R.; SINGH, S. P.; LAMBA, K. Sustainable robust layout using big data approach: a key towards industry 4.0. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 204, p. 643–659, dez. 2018.
- LASI, H. *et al.* Industry 4.0. **Business & Information Systems Engineering**, Wiesbaden, v. 6, n. 4, p. 239–242, 19 ago. 2014.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, Amsterdam, v. 3, p. 18–23, jan. 2015.
- LEYDESDORFF, L.; MEYER, M. Triple Helix indicators of knowledge-based innovation systems: Introduction to the special issue. **Research Policy**, Amsterdam, v. 35, n. 10, p. 1441–1449, dez. 2006.
- LEZZI, M.; LAZOI, M.; CORALLO, A. Cybersecurity for industry 4.0 in the current literature: a reference framework. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 103, p. 97–110, dez. 2018.
- LI, L. China’s manufacturing locus in 2025: With a comparison of “Made-in-China 2025” and “Industry 4.0”. **Technological Forecasting and Social Change**, Nova York, v. 135, n. May 2017, p. 66–74, out. 2018.
- LI, X. *et al.* A review of industrial wireless networks in the context of industry 4.0. **Wireless Networks**, Nova York, v. 23, n. 1, p. 23–41, 26 jan. 2017.
- LI, X. *et al.* A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety. **Automation in Construction**, Amsterdam, v. 86, p. 150–162, fev. 2018.
- LIANG, Y.; LEE, S. A. Fear of autonomous robots and artificial intelligence: evidence from national representative data with probability sampling. **International Journal of Social Robotics**, Dordrecht, v. 9, n. 3, p. 379–384, 8 jun. 2017.
- LIN, K.; SHYU, J.; DING, K. A Cross-strait comparison of innovation policy under industry 4.0 and sustainability development transition. **Sustainability**, Basel, v. 9, n. 5, p. 786, 9 maio 2017.
- LIU, Y.; XU, X. Industry 4.0 and cloud manufacturing: a comparative analysis. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, Nova York, v. 139, n. 3, p. 1–8, 1 mar. 2017.
- LOPEZ RESEARCH. **Uma introdução à Internet da Coisas (IoT)**. Disponível em: [https://www.cisco.com/c/dam/global/pt\\_br/assets/brand/iot/iot/pdfs/lopez\\_research\\_an\\_introduction\\_to\\_iiot\\_102413\\_final\\_portuguese.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/global/pt_br/assets/brand/iot/iot/pdfs/lopez_research_an_introduction_to_iiot_102413_final_portuguese.pdf). Acesso em: 25 maio. 2020.
- LOZANO, R. A holistic perspective on corporate sustainability drivers. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, Oxford, v. 22, n. 1, p. 32–44, jan. 2015.
- LOZANO, R. Analysing the use of tools, initiatives, and approaches to promote sustainability

in corporations. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, Oxford, v. 27, n. 2, p. 982–998, 2 mar. 2020.

LU, Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of Industrial Information Integration**, Amsterdam, v. 6, p. 1–10, jun. 2017.

LUTHRA, S.; MANGLA, S. K. Evaluating challenges to industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. **Process Safety and Environmental Protection**, Londres, v. 117, p. 168–179, jul. 2018.

MACHADO, C. G.; WINROTH, M. P.; RIBEIRO DA SILVA, E. H. D. Sustainable manufacturing in industry 4.0: an emerging research agenda. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 58, n. 5, p. 1462–1484, 3 mar. 2020.

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

MENG, Y. *et al.* Enhancing sustainability and energy efficiency in smart factories: a review. **Sustainability**, Basel, v. 10, n. 12, p. 4779, 14 dez. 2018.

MIGUEL, P. A. C. **Metodologia de pesquisa para engenharia de produção e gestão de operações**. 3º ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

MONTIEL, I.; DELGADO-CEBALLOS, J. Article defining and measuring corporate sustainability: are we there yet? **Organization & Environment**, Thousand Oaks, v. 27, n. 2, p. 113–139, 4 jun. 2014.

MOSCHETTI, R.; MAZZARELLA, L.; NORD, N. An overall methodology to define reference values for building sustainability parameters. **Energy and Buildings**, Amsterdam, v. 88, p. 413–427, fev. 2015.

MOSTERMAN, P. J.; ZANDER, J. Industry 4.0 as a cyber-physical system study. **Software & Systems Modeling**, Heidelberg, v. 15, n. 1, p. 17–29, 8 fev. 2016.

MÜLLER, J. M.; KIEL, D.; VOIGT, K.-I. What drives the implementation of industry 4.0? the role of opportunities and challenges in the context of sustainability. **Sustainability**, Basel, v. 10, n. 1, p. 247, 18 jan. 2018.

MÜLLER, J. M.; VOIGT, K.-I. Sustainable industrial value creation in smes: a comparison between industry 4.0 and made in China 2025. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, Seul, v. 5, n. 5, p. 659–670, 12 out. 2018.

NATIONAL INSTITUTE OF INDUSTRIAL ENGINEERING. **Vision e Mission**. Disponível em: <https://www.nitie.ac.in/vision-mission>. Acesso em: 30 ago. 2020.

NATIONAL MOBILE COMMUNICATIONS RESEARCH LABORATORY. **Main Scientific Research Results**. Disponível em: <https://ncrl.seu.edu.cn/15596/list.htm>. Acesso em: 9 ago. 2020.

NEWELL, J. P.; VOS, R. O. “Papering” over space and place: product carbon footprint

modeling in the global paper industry. **Annals of the Association of American Geographers**, Filadélfia, v. 101, n. 4, p. 730–741, jul. 2011.

NUNHES, T. V. *et al.* Where to go with corporate sustainability? opening paths for sustainable businesses through the collaboration between universities, governments, and organizations. **Sustainability**, Basel, v. 13, n. 3, p. 1429, 29 jan. 2021.

NUNHES, T. V.; MOTTA BARBOSA, L. C. F.; OLIVEIRA, O. J. Identification and analysis of the elements and functions integrable in integrated management systems. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 142, p. 3225–3235, jan. 2017.

NUNHES, T. V.; OLIVEIRA, O. J. Analysis of integrated management systems research: identifying core themes and trends for future studies. **Total Quality Management & Business Excellence**, Abingdon, p. 1–23, 13 maio 2018.

ODD. BOT. **agRobotics for a Sustainable Future**. Disponível em: <https://www.hannovermesse.de/exhibitor/odd-bot/N1449701>. Acesso em: 1 jul. 2020.

OECD. **Greenhouse gas emissions by source**. Disponível em: [https://www.oecd-ilibrary.org/environment/data/oecd-environment-statistics/greenhouse-gas-emissions\\_data-00594-en](https://www.oecd-ilibrary.org/environment/data/oecd-environment-statistics/greenhouse-gas-emissions_data-00594-en). Acesso em: 24 jun. 2020.

OLÁH, J. *et al.* Impact of industry 4.0 on environmental sustainability. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 11, p. 4674, 8 jun. 2020.

ORBIT. **Patent**. Disponível em: <https://www32.orbit.com/>. Acesso em: 17 jul. 2020.

OZTEMEL, E.; GURSEV, S. Literature review of industry 4.0 and related technologies. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Nova York, v. 31, n. 1, p. 127–182, 24 jan. 2020.

PAREKH, P. *et al.* Systematic review and meta-analysis of augmented reality in medicine, retail, and games. **Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art**, Singapura, v. 3, n. 1, p. 21, 16 dez. 2020.

PORTAL DA INDÚSTRIA. **Indústria 4.0**: Entenda seus conceitos e fundamentos. Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/industria-4-0/>. Acesso em: 22 mar. 2021.

POSADA, J. *et al.* Visual computing as a key enabling technology for industrie 4.0 and industrial internet. **IEEE Computer Graphics and Applications**, Piscataway, v. 35, n. 2, p. 26–40, mar. 2015.

PRAUSE, G. Sustainable business models and structures for industry 4.0. **Journal of Security and Sustainability Issues**, Vilnius, v. 5, n. 2, p. 159–169, 16 dez. 2015.

PRAUSE, G.; ATARI, S. On sustainable production networks for industry 4.0. **Entrepreneurship and Sustainability Issues**, Vilnius, v. 4, n. 4, p. 421–431, 30 jun. 2017.

PROVDANOV, C. C.; FREITAS, E. C. DE. **Metodologia do trabalho científico**: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2º ed. Nova Hamburgo: Universidade Feevale, 2013.

- QUEZADA, L. E. *et al.* Operational excellence towards sustainable development goals through industry 4.0. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 190, p. 1–2, ago. 2017.
- RANGA, M.; ETZKOWITZ, H. Triple Helix systems: an analytical framework for innovation policy and practice in the knowledge society. **Industry and Higher Education**, Londres, v. 27, n. 4, p. 237–262, 1 ago. 2013.
- REIS, J. S. DA M. *et al.* The rapid escalation of publications on covid-19: a snapshot of trends in the early months to overcome the pandemic and to improve life quality. **International Journal for Quality Research**, Kragujevac, v. 14, n. 3, p. 951–968, 2020.
- REIS, J. S. DA M. *et al.* Striding towards sustainability: a framework to overcome challenges and explore opportunities through industry 4.0. **Sustainability**, Basel, v. 13, n. 9, p. 5232, 7 maio 2021.
- REN, S. *et al.* A comprehensive review of big data analytics throughout product lifecycle to support sustainable smart manufacturing: a framework, challenges and future research directions. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 210, p. 1343–1365, fev. 2019.
- RENOLDNER, K. Rethinking ‘our common future’: a physician’s remarks 25 years after the release of ‘brundtland report’. **Medicine, Conflict and Survival**, Abingdon, v. 29, n. 4, p. 278–288, out. 2013.
- ROBLEK, V.; MEŠKO, M.; KRAPEŽ, A. A complex view of industry 4.0. **SAGE Open**, Thousand Oaks, v. 6, n. 2, p. 215824401665398, 20 abr. 2016.
- RODIČ, B. Industry 4.0 and the new simulation modelling paradigm. **Organizacija**, Kranj, v. 50, n. 3, p. 193–207, 1 ago. 2017.
- RUBIO, J. E.; ROMAN, R.; LOPEZ, J. Analysis of cybersecurity threats in industry 4.0: the case of intrusion detection. In: **Critical Information Infrastructures Security**. Cham: Springer, 2018. p. 119–130.
- SARPONG, D. *et al.* Organizing practices of university, industry and government that facilitate (or impede) the transition to a hybrid triple helix model of innovation. **Technological Forecasting and Social Change**, Nova York, v. 123, p. 142–152, out. 2017.
- SAWIK, T. A linear model for optimal cybersecurity investment in industry 4.0 supply chains. **International Journal of Production Research**, Abingdon, p. 1–18, 8 dez. 2020.
- SCHLECHTENDAHL, J. *et al.* Making existing production systems industry 4.0-ready: holistic approach to the integration of existing production systems in Industry 4.0 environments. **Production Engineering**, Heidelberg, v. 9, n. 1, p. 143–148, 17 fev. 2015.
- SCHLUSE, M. *et al.* Experimentable digital twins—streamlining simulation-based systems engineering for industry 4.0. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, Piscataway, v. 14, n. 4, p. 1722–1731, abr. 2018.
- SCHNEIDER ELECTRIC. **About Us**. Disponível em: <https://www.se.com/in/en/about-us/company-profile/>. Acesso em: 20 ago. 2020a.

SCHNEIDER ELECTRIC. **EcoStruxure™**. Disponível em: <https://www.se.com/in/en/work/campaign/innovation/overview.jsp>. Acesso em: 20 ago. 2020b.

SCHNEIDER ELECTRIC. **EcoStruxure™ Building**. Disponível em: <https://www.se.com/in/en/work/campaign/innovation/buildings.jsp>. Acesso em: 20 ago. 2020c.

SCOPUS. **Scopus**. Disponível em: <https://www.scopus.com/home.uri>. Acesso em: 8 jul. 2020.

SENAI. **Digitalização e conectividade tornam indústrias mais produtivas**. Disponível em: <https://sc.senai.br/pt-br/imprensa/digitalizacao-e-conectividade-tornam-industrias-mais-produtivas>. Acesso em: 22 mar. 2021.

SEPASGOZAR, S. M. E. *et al.* Additive manufacturing applications for industry 4.0: a systematic critical review. Basel, **Buildings**, v. 10, n. 12, p. 231, 6 dez. 2020.

SEVIGNÉ ITOIZ, E. *et al.* CO2ZW: Carbon footprint tool for municipal solid waste management for policy options in Europe. Inventory of mediterranean countries. **Energy Policy**, Londres, v. 56, p. 623–632, maio 2013.

SHIM, S.-O.; PARK, K.; CHOI, S. Sustainable production scheduling in open innovation perspective under the fourth industrial revolution. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, Basel, v. 4, n. 4, p. 42, 21 set. 2018.

SHPAK, N. *et al.* Simulation of innovative systems under industry 4.0 conditions. **Social Sciences**, Basel, v. 8, n. 7, p. 202, 28 jun. 2019.

SITWARE. **Indústria 4.0 no Brasil: um parâmetro sobre a aplicação do conceito de indústrias inteligentes no país**. Disponível em: <https://www.sitware.com.br/blog/processos/industria-4-0-brasil/>. Acesso em: 22 mar. 2021.

SOUTHEAST UNIVERSITY. **About SEU**. Disponível em: [https://www.seu.edu.cn/english/\\_t1875/22456/list.psp](https://www.seu.edu.cn/english/_t1875/22456/list.psp). Acesso em: 8 set. 2020.

STOCK, T. *et al.* Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: a qualitative assessment of its ecological and social potential. **Process Safety and Environmental Protection**, Londres, v. 118, p. 254–267, ago. 2018.

STOCK, T.; SELIGER, G. Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0. **Procedia CIRP**, Amsterdam, v. 40, n. Icc, p. 536–541, 2016.

SUNTRACKER TECHNOLOGIES. **Our Company**. Disponível em: <https://www.suntrackertech.com/about/>. Acesso em: 11 ago. 2020a.

SUNTRACKER TECHNOLOGIES. **Horticultural Lighting Design**. Disponível em: <https://www.suntrackertech.com/horticultural/>. Acesso em: 18 ago. 2020b.

SWARNIMA, C.; MEHRA, P.; DASOT, A. **India's Readiness for Industry 4.0 – A Focus on Automotive Sector**. Disponível em: <http://www.grantthornton.in/insights/articles/indias-readiness-for-industry-4.0--a-focus-on-automotive-sector/>. Acesso em: 18 ago. 2020.

TAO, F. *et al.* Internet of things in product life-cycle energy management. **Journal of Industrial Information Integration**, Amsterdam, v. 1, p. 26–39, mar. 2016.

THE PEOPLE’S REPUBLIC OF CHINA. **Made in China 2025**. Disponível em: <http://english.www.gov.cn/2016special/madeinchina2025/>. Acesso em: 7 set. 2020.

THOBEN, K.; WIESNER, S.; WUEST, T. “Industrie 4.0” and smart manufacturing – a review of research issues and application examples. **International Journal of Automation Technology**, Tóquio, v. 11, n. 1, p. 4–16, 5 jan. 2017.

TIWARI, K.; KHAN, M. S. Sustainability accounting and reporting in the industry 4.0. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 258, p. 120783, jun. 2020.

TUFFNELL, C. *et al.* Industry 4.0-based manufacturing systems: smart production, sustainable supply chain networks, and real-time process monitoring. **Journal of Self-Governance and Management Economics**, Nova York, v. 7, n. 2, p. 7, 2019a.

TUFFNELL, C. *et al.* Cyber-physical smart manufacturing systems: sustainable industrial networks, cognitive automation, and data-centric business models. **Economics, Management, and Financial Markets**, Nova York, v. 14, n. 2, p. 58, 2019b.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. Disponível em: [https://www.un.org/ga/search/view\\_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E](https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E). Acesso em: 16 jun. 2020.

UNITED NATIONS. **Sustainable Development Goals**. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>. Acesso em: 16 jun. 2020a.

UNITED NATIONS. **Page and The Sustainable Development Goals**. Disponível em: <https://www.un-page.org/page-and-sustainable-development-goals>.

UNITED NATIONS. **Goal 2: Zero Hunger**. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/hunger/>. Acesso em: 16 jun. 2020c.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **EPA Celebrates 50 Years of Research for a Healthier Environment**. Disponível em: <https://www.epa.gov/newsreleases/epa-celebrates-50-years-research-healthier-environment>. Acesso em: 9 ago. 2020a.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Smart City Air Challenge Resource Pages: Community Case Studies**. Disponível em: <https://developer.epa.gov/city-case-studies/>. Acesso em: 12 ago. 2020b.

VIEIRA, A. A. C. *et al.* Setting an industry 4.0 research and development agenda for simulation – a literature review. **International Journal of Simulation Modelling**, Vienna, v. 17, n. 3, p. 377–390, 15 set. 2018.

VOGEL-HEUSER, B.; HESS, D. Guest Editorial Industry 4.0–Prerequisites and Visions. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, Piscataway, v. 13, n. 2, p. 411–413, abr. 2016.

VST MOBILITY SOLUTIONS. **About Us**. Disponível em: <https://vstmobility.com/about.php>. Acesso em: 28 ago. 2020a.

VST MOBILITY SOLUTIONS. **IoT Services**. Disponível em: [https://vstmobility.com/ser\\_iot.php](https://vstmobility.com/ser_iot.php). Acesso em: 28 ago. 2020b.

VST MOBILITY SOLUTIONS. **BIN-19**. Disponível em: <https://vstmobility.com/bin-19.php>. Acesso em: 28 ago. 2020c.

WANG, S. *et al.* Implementing smart factory of industrie 4.0: an outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, Thousand Oaks, v. 12, n. 1, p. 3159805, 18 jan. 2016a.

WANG, S. *et al.* Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. **Computer Networks**, Amsterdam, v. 101, p. 158–168, jun. 2016b.

WIPO. **Global Innovation Index 2021**. Disponível em: [https://www.wipo.int/global\\_innovation\\_index/en/2021/](https://www.wipo.int/global_innovation_index/en/2021/). Acesso em: 28 set. 2021.

WORLD ECONOMIC FORUM. **Davos Manifesto 2020: The Universal Purpose of a Company in the Fourth Industrial Revolution**. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2019/10/davos-2020-wef-world-economic-forum-theme/>. Acesso em: 15 jun. 2020.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **World Health Organization**. Disponível em: <https://www.who.int/heli/risks/en/>. Acesso em: 17 jun. 2020.

XEROX. **About Xerox**. Disponível em: <https://www.xerox.com/en-us/about>. Acesso em: 11 ago. 2020a.

XEROX. **Xerox DocuShare Flex**. Disponível em: <https://www.xerox.com/pt-br/servicos-empresariais/solucoes-de-gestao-de-conteudo-corporativo/docushare-flex>. Acesso em: 18 ago. 2020b.

XEROX. **Como a Xerox® DocuShare® ajudou um fabricante de móveis de 99 anos a digitalizar 500.000 documentos**. Disponível em: <https://www.xerox.com/pt-br/servicos-empresariais/solucoes-de-gestao-de-conteudo-corporativo/docushare-estudo-de-caso-sobre-eficiencia-do-fluxo-de-trabalho>. Acesso em: 18 ago. 2020c.

XU, L. DA; XU, E. L.; LI, L. Industry 4.0: state of the art and future trends. **International Journal of Production Research**, Abingdon, v. 56, n. 8, p. 2941–2962, 18 abr. 2018.

YADAV, G. *et al.* A framework to overcome sustainable supply chain challenges through solution measures of industry 4.0 and circular economy: an automotive case. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 254, p. 120112, maio 2020.

YAZDI, P. G.; AZIZI, A.; HASHEMIPOUR, M. An empirical investigation of the relationship between Overall Equipment Efficiency (OEE) and manufacturing sustainability in industry 4.0 with time study approach. **Sustainability**, Basel, v. 10, n. 9, p. 3031, 27 ago. 2018.



ZAWADZKI, P.; ŻYWICKI, K. Smart product design and production control for effective mass customization in the industry 4.0 Concept. **Management and Production Engineering Review**, Opole, v. 7, n. 3, p. 105–112, 1 set. 2016.

ZHEJIANG HAIKANG TECHNOLOGY. **Company Profile**. Disponível em: <http://www.hiklife.com/Corporate/Company-Profile>. Acesso em: 12 set. 2020a.

ZHEJIANG HAIKANG TECHNOLOGY. **Awake**. Disponível em: <http://www.hiklife.com/solution/Alert-series>. Acesso em: 12 set. 2020b.

ZHONG, R. Y. *et al.* Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. **Engineering**, Leamington Spa, v. 3, n. 5, p. 616–630, out. 2017.

### APÊNDICE A – PAÍSES COM MAIS CITAÇÕES

#	País, Índice H	Total de citações - documentos	Citações					Publicações				
			2015	2016	2017	2018	2019	2015	2016	2017	2018	2019
1	Alemanha, 6	220 - 6	0	0	4	70	146	0	0	2	3	1
2	Índia, 5	109 - 9	0	0	0	11	98	0	0	0	4	5
3	Brasil, 4	151 - 6	0	0	0	25	126	0	0	0	3	3
4	Estados Unidos da América, 4	86 - 13	0	0	0	5	81	0	0	0	2	11
5	França, 3	110 - 3	0	0	0	23	87	0	0	0	3	0
6	China, 3	47 - 3	0	0	0	9	38	0	0	1	0	2
7	Reino Unido, 3	46 - 6	0	0	0	7	39	0	0	0	2	4
8	Malásia, 2	111 - 3	0	0	0	0	111	0	0	0	0	3
9	Estônia, 2	70 - 2	0	3	12	31	24	1	0	1	0	0
10	Suécia, 2	54 - 3	0	1	9	7	37	1	0	0	0	2

## APÊNDICE B – PRINCIPAIS INSTITUIÇÕES E AUTORES DO CTC

País	Instituições, Índice H	Total de Citações	Citações					Autores, Índice H	Instituições	Total de Citações	Citações				
			2015	2016	2017	2018	2019				2015	2016	2017	2018	2019
Índia	National Institute of Industrial Engineering, 1	56	0	0	0	5	51	Luthra, Sunil, 1	State Institute of Engineering e Technology	37	0	0	0	6	31
	State Institute of Engineering e Technology, 1	56	0	0	0	5	51	Kumar, Anil, 0	BML Munjal University	0	0	0	0	0	0
	Indian Institute of Technology Delhi, 1	8	0	0	0	0	8	Yadav, Gunjan, 0	S. V. National Institute of Technology	0	0	0	0	0	0
Estados Unidos da América	California State University, 2	51	0	0	0	5	46	Gunasekaran, Angappa, 1	California State University	57	0	0	0	5	52
	The Cognitive Labor Institute, 0	0	0	0	0	0	0	Tuffnell, Caryl, 0	The Cognitive Labor Institute	0	0	0	0	0	0
	The Institute of Smart Big Data Analytics, 0	0	0	0	0	0	0	Sarkis, Joseph, 0	Worcester Polytechnic Institute	0	0	0	0	1	0
China	Dalian University of Technology, 1	21	0	0	0	9	12	Ren, Shan, 1	Xi'an Institute of Posts and Telecommunications	25	0	0	0	0	25
	Beijing University of Technology, 1	6	0	0	0	0	6	Zhang, Yingfeng, 1	Shaanxi University of Technology	25	0	0	0	0	25
	Chongqing University, 1	6	0	0	0	0	6	Shyu, Joenson Z., 1	Dalian University of Technology	21	0	0	0	0	6
Alemanha	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 4	160	0	0	0	48	112	Müller, Julian Marius., 4	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg	160	0	0	0	48	112
	Technical University of Berlin, 1	32	0	0	0	3	29	Voigt, Kai-Ingo, 4	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg	160	0	0	0	48	112
	Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology IPK, 1	32	0	0	0	3	29	Kiel, Daniel, 2	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg	126	0	0	0	48	78
Brasil	Universidade Federal de São Carlos, 2	109	0	0	0	23	86	Godinho Filho, Moacir, 2	Universidade Federal de São Carlos	109	0	0	0	23	86
	Universidade Paulista, 2	59	0	0	0	2	57	Bonilla, Silvia Helena, 1	Universidade Paulista	32	0	0	0	2	30
	Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 1	6	0	0	0	2	4	Almeida, Cecília Maria Villas Boas, 1	Universidade Paulista	27	0	0	0	0	27

### APÊNDICE C – PERIÓDICOS COM MAIS CITAÇÕES

#	Periódico, Índice H	Percentil Scopus 20/01/21	Qualis	JCR	Total de citações - documentos	Citações				
						2015	2016	2017	2018	2019
1	Sustainability, 5	84%	A2	2.592	144 - 11	0	0	0	33	111
2	Process Safety and Environmental Protection, 4	96%	A1	4.384	114 - 4	0	0	0	15	99
3	Entrepreneurship and Sustainability Issues, 2	98%	A1	—	40 - 2	0	0	4	19	17
4	Journal of Cleaner Production, 2	98%	A1	6.395	31 - 2	0	0	0	0	31
5	International Journal of Production Research, 2	94%	A1	3.199	11 - 4	0	0	0	0	11
6	Computers and Industrial Engineering, 2	95%	A1	3.518	9 - 2	0	0	0	0	9
7	Social Sciences, 1	68%	A3	—	110 - 2	0	0	0	0	110
8	International Journal of Innovation Management, 1	69%	A3	—	54 - 1	0	0	0	15	39
9	Technological Forecasting and Social Change, 1	96%	A1	3.815	48 - 1	0	0	0	23	25
10	Journal of Security and Sustainability Issues, 1	86%	A2	—	37 - 1	0	3	8	12	14

## APÊNDICE D – ARTIGOS MAIS CITADOS

(continua)

#	Título	Autores (Ano)	Fonte (ISSN)	Oportunidades	Desafios	Total de citações (18/02/20)	Evolução de Citações				
							2015	2016	2017	2018	2019
1	Industry 4.0: A solution towards technology challenges of sustainable business performance	Haseeb <i>et al.</i> (2019)	Social Sciences (2076-0760)	Mapear como a Indústria 4.0 está beneficiando o desempenho sustentável em multinacionais	Dificuldades financeiras para as PMEs adquirirem tecnologias de ponta	109	0	0	0	0	109
2	What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability	Müller <i>et al.</i> (2018)	Sustainability (2071-1050)	Analisar os benefícios da Indústria 4.0 dentro do campo da sustentabilidade	Falta de know-how para implementação das tecnologias da Indústria 4.0	75	0	0	0	22	53
3	When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors	Jabbour <i>et al.</i> (2018a)	Technological Forecasting and Social Change (0040-1625)	Identificar as sinergias e dissonâncias entre a Indústria 4.0 e a Sustentabilidade	Dificuldades na integração da indústria 4.0 com objetivos de sustentabilidade das organizações	54	0	0	0	15	39
4	Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations	Jabbour <i>et al.</i> (2018b)	Annals of Operations Research (0254-5330)	Propor boas práticas com as tecnologias (Cyber-physical Systems etc) da Indústria 4.0 que aprimorem a Economia Circular nas organizações	Coordenar ações em diferentes áreas organizacionais e preocupações com a cibersegurança	49	0	0	0	8	41
5	Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0	Kiel <i>et al.</i> (2017)	International Journal of Innovation Management (1363-9196)	Mensurar o custo benefício da integrar Indústria 4.0 e Sustentabilidade	Alto custo para adaptação da infraestrutura tecnológica para conexão e troca de dados dentro da organização	48	0	0	0	23	25
6	Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives	Kamble <i>et al.</i> (2018)	Process Safety and Environmental Protection (0957-5820)	Identificar as tendências na pesquisa científicas da Indústria Sustentável 4.0	Falta de dados iniciais dos benefícios da Indústria 4.0 para a sustentabilidade organizacional	46	0	0	0	5	41
7	Sustainable business models and structures for industry 4.0	Prause (2015)	Journal of Security and Sustainability Issues (2029-7017)	Identificar oportunidades para os novos modelos de negócios sustentáveis na era da Industria 4.0	Dificuldades com as novas normatizações para a sustentabilidade com a inserção da Indústria 4.0	37	0	3	8	12	14

## APÊNDICE D – ARTIGOS MAIS CITADOS

(continuação)

#	Título	Autores (Ano)	Fonte (ISSN)	Oportunidades	Desafios	Total de citações (18/02/20)	Evolução de Citações				
							2015	2016	2017	2018	2019
8	Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies	Luthra and Mangla (2018)	Process Safety and Environmental Protection (0957-5820)	Investigar os impactos na sustentabilidade em economias de países emergentes implementaram a Indústria 4.0 em cadeias de suprimentos	Falta de conhecimento dos impactos da Indústria 4.0 para a sustentabilidade	33	0	0	0	6	27
9	On sustainable production networks for industry 4.0	Prause and Atari (2017)	Entrepreneurship and Sustainability Issues (2345-0282)	Avaliar os benefícios para a Sustentabilidade na implementação de tecnologias (Cyber-physical Systems etc) da Indústria 4.0	Falta de infraestrutura para integração das cadeias de valor	33	0	0	4	19	10
10	From automated home to sustainable, healthy and manufacturing home: a new story enabled by the Internet-of-Things and Industry 4.0	Branger and Pang (2015)	Journal of Management Analytics (2327-0012)	Identificar oportunidades de tornar o cotidiano das pessoas mais sustentável por meio da Indústria 4.0	Dificuldade em equilibrar a produção e a alta demanda de energia com as tecnologias da Indústria 4.0	29	0	1	9	7	12
11	Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential	Stock <i>et al.</i> (2018)	Process Safety and Environmental Protection (0957-5820)	Avaliar o potencial sustentável da Indústria 4.0 dentro de organizações	Falta de mão de obra qualificada e dificuldades em especializar a mão de obra	27	0	0	0	3	24
12	A comprehensive review of big data analytics throughout product lifecycle to support sustainable smart manufacturing: A framework, challenges and future research directions	Ren <i>et al.</i> (2019)	Journal of Cleaner Production (0959-6526)	Mensurar o impacto das tecnologias (Cyber-physical Systems etc) da Indústria 4.0 na Sustentabilidade	Falta de infraestrutura adequada no gerenciamento de dados	25	0	0	0	0	25
13	Sustainable Industrial Value Creation in SMEs: A Comparison between Industry 4.0 and Made in China 2025	Müller and Voigt (2018)	International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology (2288-6206)	Identificar quais postos de trabalho surgiram e quais serão descontinuados com a Indústria 4.0	Dificuldades para encontrar parceiros e fornecedores adequados com as tecnologias da Indústria 4.0	25	0	0	0	3	22
14	Industry 4.0 and Sustainability Implications: A Scenario-Based Analysis of the Impacts and Challenges	Bonilla <i>et al.</i> (2018)	Sustainability (2071-1050)	Identificar oportunidades de contribuição da Indústria 4.0 na sustentabilidade ambiental	Falta de conhecimento das tecnologias da Indústria 4.0	22	0	0	0	2	20

## APÊNDICE D – ARTIGOS MAIS CITADOS

(continuação)

#	Título	Autores (Ano)	Fonte (ISSN)	Oportunidades	Desafios	Total de citações (18/02/20)	Evolução de Citações				
							2015	2016	2017	2018	2019
15	A Cross-Strait Comparison of Innovation Policy under Industry 4.0 and Sustainability Development Transition	Lin <i>et al.</i> (2017)	Sustainability (2071-1050)	Propor novas interações estratégicas entre a Indústria 4.0 e a Sustentabilidade	Falta de estratégias próprias para implementação e desenvolvimento de estruturas com tecnologias inteligentes	18	0	0	0	9	9
16	Development of a Risk Framework for Industry 4.0 in the Context of Sustainability for Established Manufacturers	Birkel <i>et al.</i> (2019)	Sustainability (2071-1050)	Investigar oportunidades nos riscos da gestão na Indústria 4.0 voltada a sustentabilidade	Custos elevados com amortizações longas e pouco claras com a implementação das tecnologias da Indústria 4.0	12	0	0	0	0	12
17	IoT Heterogeneous Mesh Network Deployment for Human-in-the-Loop Challenges Towards a Social and Sustainable Industry 4.0	Garrido-Hidalgo <i>et al.</i> (2018)	IEEE Access (2169-3536)	Avaliar o impacto da Internet of Things no aumento da produtividade sustentável	Falta de conhecimento especializado das tecnologias inteligentes nas organizações	12	0	0	0	1	11
18	Industry 4.0 and supply chain sustainability: framework and future research directions	Bag <i>et al.</i> (2018)	Benchmarking (1463-5771)	Identificar oportunidades de contribuição da Indústria 4.0 na sustentabilidade da cadeia de suprimentos	Falta de mão de obra qualificada para implementar as tecnologias da Indústria 4.0	11	0	0	0	0	11
19	Pharma Industry 4.0: Literature review and research opportunities in sustainable pharmaceutical supply chains	Ding (2018)	Process Safety and Environmental Protection (0957-5820)	Avaliar os resultados sustentáveis implementando conceitos da Quarta Revolução Industrial em indústrias químicas	Dificuldade de adaptação dos trabalhadores com as tecnologias da Indústria 4.0	8	0	0	0	1	7
20	Sustainable development of industry 4.0: The case of high-tech products system design	Batkovskiy <i>et al.</i> (2019)	Entrepreneurship and Sustainability Issues (2345-0282)	Propor boas práticas para integrar a Indústria 4.0 no desenvolvimento de produtos sustentáveis	Falta de infraestruturas para obtenção de dados	7	0	0	0	0	7
21	Maintenance for Sustainability in the Industry 4.0 context: a Scoping Literature Review	Franciosi <i>et al.</i> (2018)	IFAC-PapersOnLine (2405-8963)	Analisar os conceitos da Indústria 4.0 que aprimoram a manufatura sustentável	Falta de conhecimento dos impactos da Indústria 4.0 na cadeia de valor	7	0	0	0	0	7

## APÊNDICE D – ARTIGOS MAIS CITADOS

(continuação)

#	Título	Autores (Ano)	Fonte (ISSN)	Oportunidades	Desafios	Total de citações (18/02/20)	Evolução de Citações				
							2015	2016	2017	2018	2019
22	Sustainable robust layout using Big Data approach: A key towards industry 4.0	Kumar <i>et al.</i> (2018)	Journal of Cleaner Production (0959-6526)	Avaliar o impacto do layout de Fábricas Inteligentes na Sustentabilidade em organizações	Dificuldades na integração da indústria 4.0 em um layout sustentável	6	0	0	0	0	6
23	Optimization of Municipal Waste Collection Routing: Impact of Industry 4.0 Technologies on Environmental Awareness and Sustainability	Bányai <i>et al.</i> (2019)	International Journal of Environmental Research and Public Health (1661-7827)	Propor a integração da indústria 4.0 no tratamento de água e resíduos sólidos em organizações	Falta de infraestrutura para implementar as tecnologias da Indústria 4.0 na coleta de resíduos	6	0	0	0	0	6
24	Sustainable and flexible industrial human machine interfaces to support adaptable applications in the Industry 4.0 paradigm	Ardanza <i>et al.</i> (2019)	International Journal of Production Research (0020-7543)	Implementar o modelo de Human Machine Interfaces visando solucionar problemas de sustentabilidade nas customizações em massa da produção	Falta de conhecimento dos impactos das tecnologias inteligentes na produção em organizações	6	0	0	0	0	6
25	Enhancing sustainability and energy efficiency in smart factories: A review	Meng <i>et al.</i> (2018)	Sustainability (2071-1050)	Mapear os conceitos da Indústria 4.0 que contribuem para a Sustentabilidade	Inexistência de infraestrutura básica para implementação das tecnologias a Indústria 4.0	6	0	0	0	0	6
26	Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies	Kamble <i>et al.</i> (2019)	International Journal of Production Research (0020-7543)	Identificar as sinergias e dissonâncias entre a Indústria 4.0 e a Manufatura Enxuta no contexto da Sustentabilidade	Apoio administrativo deficiente, baixa conscientização, comportamento relutante e falta de competência	5	0	0	0	0	5
27	A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements	Manavalan and Jayakrishna (2019)	Computers and Industrial Engineering (0360-8352)	Identificar sinergias e dissonâncias ao implementar a Internet of Things no Supply Chain Management	Dificuldades financeiras para implementar tecnologias da Indústria 4.0	5	0	0	0	0	5
28	Sustainable production scheduling in open innovation perspective under the fourth industrial revolution	Shim <i>et al.</i> (2018)	Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity (2199-8531)	Avaliar o impacto na Sustentabilidade implementando conceitos da Indústria 4.0 na programação da produção	Falta de conhecimento dos impactos da Indústria 4.0 nas organizações	5	0	0	0	0	5



## APÊNDICE D – ARTIGOS MAIS CITADOS

(conclusão)

#	Título	Autores (Ano)	Fonte (ISSN)	Oportunidades	Desafios	Total de citações (18/02/20)	Evolução de Citações				
							2015	2016	2017	2018	2019
29	An Empirical Investigation of the Relationship between Overall Equipment Efficiency (OEE) and Manufacturing Sustainability in Industry 4.0 with Time Study Approach	Yazdi <i>et al.</i> (2018)	Sustainability (2071-1050)	Identificar oportunidades de integração entre tecnologias (Cyber-physical Systems etc) da Indústria 4.0 e o Supply Chain Management	Alto investimento para implementar as tecnologias da Indústria 4.0	5	0	0	0	0	5
30	Intelligent sustainable supplier selection using multi-agent technology: Theory and application for Industry 4.0 supply chains	Ghadimi <i>et al.</i> (2019)	Computers and Industrial Engineering (0360-8352)	Avaliar os riscos na transição de uma fábrica comum para uma fábrica inteligente	Falta de conhecimento especializado das tecnologias da Indústria 4.0	4	0	0	0	0	4