

## INDÚSTRIA 4.0 NO CONTEXTO DA SUSTENTABILIDADE: revisão sistemática da literatura e proposta de agenda de pesquisa

### 1. INTRODUÇÃO

Os avanços da ciência e tecnologia vem contribuindo para o crescimento da produção mundial desde meados do século XVII e as revoluções industriais que se sucederam são divisões não apenas temporais, mas também, de níveis tecnológicos (GHOBAKHLOO, 2018). Por exemplo, a primeira revolução industrial foi impulsionada pelo advento dos motores a vapor, energia hidráulica e mecanização, mesmo que de forma incipiente (OZTEMEL; GURSEV, 2020). Já na segunda revolução industrial as linhas de montagem, iniciadas por Henry Ford, e a produção em massa (OZTEMEL; GURSEV, 2020) se destacaram. A terceira foi caracterizada pelo uso do computador e automação (GHOBAKHLOO, 2018). Por fim, a quarta revolução industrial surge, de forma recente, para caracterizar uma nova fase na manufatura e, de certa forma, no cotidiano das pessoas e empresas, em que sistemas *Ciberfísicos* estão inseridos na produção e, praticamente, em tudo que se é vivenciado (GHOBAKHLOO, 2018).

Nesse contexto surge o conceito de Indústria 4.0 (I4.0) que foi inicialmente divulgado na Feira de Hannover e teve amplo interesse do governo europeu em disseminar as suas práticas (BEIER et al., 2020). A I4.0 tem por objetivo superar desafios contemporâneos como a intensa competição global, mercados e demandas voláteis, customização e a necessidade de redução de ciclos de vida dos produtos (MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018). Ela traz uma nova perspectiva para a manufatura sob a ótica de colaboração com novas tecnologias capazes de utilizar uma menor quantidade de recursos possíveis em uma máxima produção (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018).

Desse modo, espera-se uma transformação não apenas industrial, mas também contribuições visando conquistas econômicas, ecológicas e sociais (MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018). O conceito de *Triple Bottom Line* (TBL) se insere nesse contexto na medida em que analisa a sustentabilidade sob uma visão tridimensional (econômica, social e ambiental), como também, se dispõe a abordar de forma mais ampla as contribuições para uma convergência entre produção, as necessidades da sociedade e os recursos (ELKINGTON, 1998). Para Silvestre et al. (2014) a sustentabilidade se dá pelo equilíbrio adequado entre o capital econômico e a sua lucratividade, o capital ambiental e sua preservação, e o capital social e seu patrimônio.

As tecnologias da I4.0 podem oferecer uma alternativa para alinhar as metas de desenvolvimento sustentável com a transformação digital que vem sendo inserida na manufatura (BEIER et al., 2020). As “fábricas inteligentes” são consideradas altamente eficientes na utilização de recursos e se adaptam rapidamente a demanda e aos cenários da economia (WITTENBERG, 2016). Dentro deste contexto, os dispositivos e o sistema de produção inteligentes têm o potencial de reduzir o desperdício de produção, superprodução, movimento de bens e consumo de energia (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018). Tais contribuições da Indústria 4.0 vem de encontro com as necessidades de novas práticas para se alcançar as metas de sustentabilidade que podem se utilizar das tecnologias da Indústria 4.0 para tal (KIEL et al., 2017).

No entanto, o que se observa na literatura referente à Indústria 4.0 é uma relação com a questão técnica de suas tecnologias, com poucas pesquisas que consideram aspectos da sustentabilidade segundo a perspectiva do TBL (MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018). Oláh (2020) também salienta a necessidade de estudos relacionando essas duas temáticas devido a sua complexidade visto que ainda não há consenso entre qual o papel

da I4.0, bem como, da definição da sustentabilidade. Prause et al. (2017) afirmam que até hoje há poucas pesquisas que reforcem a sustentabilidade das redes de produção no contexto da I4.0, bem como, que conduzam revisões da literatura de negócios sustentáveis enquadradas neste conceito. Para Bai et al. (2020) as tecnologias da I4.0 buscam superar desafios contemporâneos diversos como a concorrência global, mercados e demandas voláteis, maior personalização e fluxo de informações. Sendo assim, a I4.0 pode fornecer suporte à flexibilidade de produção, eficiência e produtividade por meio de tecnologias que necessitam de maior estudo e compreensão de sua ligação com os desafios da sustentabilidade (BAI et al., 2020).

Dessa forma, procurando cobrir as lacunas ora apresentadas este artigo tem como principal objetivo analisar como as tecnologias da Indústria 4.0 podem ser utilizadas na implementação da sustentabilidade segundo a perspectiva do TBL. Para tanto, será realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) na base de artigos *Web of Science*. Especificamente pretende-se apresentar uma visão geral das pesquisas por meio de técnicas de bibliométricas e de redes. Em seguida, por meio de uma análise temática, serão identificadas práticas e tecnologias da Indústria 4.0 que contribuem para a implantação da sustentabilidade. Por fim, tomando como base os resultados, uma agenda de pesquisa de pesquisa é proposta.

Esse trabalho é relevante pois, compreender quais e como as tecnologias da I4.0 contribuem para a implementação da sustentabilidade é pode auxiliar na criação de meios para se alcançar as metas empresariais e globais de desenvolvimento sustentável (BAI et al., 2020). Além disso, as pesquisas atuais que estudam esse contexto apresentam diversas abordagens. Bai et al. (2020), por exemplo, correlacionaram as tecnologias e práticas da I4.0 com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável proposto pela ONU; Muller et al. (2018), apresentou oportunidades e desafios para a implementação da Indústria 4.0 no contexto da sustentabilidade; e, Bonilla et al. (2018) estudaram os efeitos positivos e negativos relacionados às saídas e entradas básicas dos fluxos de produção, tais como, matéria-prima, consumo de energia e informação relacionando-os a Indústria 4.0. Desse modo, essa pesquisa se diferencia das demais pois se percebe que poucos trabalhos focam diretamente no estudo das tecnologias e suas contribuições para a sustentabilidade.

O artigo está dividido em cinco seções incluindo esta introdução. A próxima descreve os procedimentos aplicados para o desenvolvimento da RSL. A seção 3 apresenta os resultados divididos em (i) visão geral da literatura sobre a temática; (ii) descrição das tecnologias da Indústria 4.0 na sustentabilidade. A seção 4 discute os resultados e apresenta uma proposta de agenda de pesquisa. Por fim, a seção 5 descreve as principais conclusões, limitações e oportunidades de novas pesquisas.

## **2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Para que o objetivo deste artigo fosse alcançado utilizou-se o método de revisão sistemática da literatura (RSL). Uma RSL pode ser definida como um método científico replicável de pesquisa que tem por objetivo apresentar como um determinado tema está sendo estudado, bem como, os resultados existentes e as lacunas ainda possíveis de pesquisa (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003). Esse método se utiliza de um protocolo pré-definido no início do estudo a ser desenvolvido como forma de garantir a veracidade dos resultados, como também, fazer com que se obtenha um roteiro em que qualquer pesquisador possa, posteriormente, realizar a mesma pesquisa e encontrar resultados semelhantes (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003).

Para o desenvolvimento da RSL adotou-se as etapas propostas por Tranfield et al. (2003) que consistem em: planejamento da revisão, condução da revisão e reportando e

disseminando a revisão. O Quadro 1 apresenta os estágios e as etapas de condução da revisão proposta para esse estudo. Em seguida, essas etapas são detalhadas.

**Quadro 1.** Etapas da RSL

Estágio	Etapas	Descrição
I - Identificando a necessidade de revisão	01	Identificar a importância da pesquisa de forma ainda que superficial para justificar a execução das etapas posteriores.
II - Condução da revisão	02	Elaborar protocolo de pesquisa, realizar testes de palavras-chave ( <i>strings</i> ), filtros de área de pesquisa, modalidade da pesquisa ( <i>article, review, proceeding text e/ou early access</i> ) de acordo com a disponibilidade de base utilizada.
		Definir a amostra da base de artigos de acordo com os filtros da etapa que melhor abrangem a temática.
	03	Realizar seleção dos artigos encontrados através de leitura preliminar de título e resumo para obtenção da amostra final.
	04	Realizar extração de dados da amostra final: métodos científicos, quantidade de publicações por ano, periódicos, país de origem dos autores para análise descritiva.
Elaborar redes (palavras-chave) da amostra final a fim de realizar análise de redes.		
III - Reportando e disseminando	05	Realizar extração de dados de dez artigos mais citados da amostra final: ano de publicação, número de citações, palavras-chave, objetivos, <i>gaps</i> de pesquisa, tecnologias da I4.0 e suas relações com a implementação da sustentabilidade para a análise temática.
		Apresentar os resultados (que representa o artigo).

Fonte: elaborado pelos autores.

### Etapa 01: Identificando a necessidade de revisão

A temática inicial da pesquisa acerca da I4.0 e das práticas de sustentabilidade inseridas neste novo conceito se deu pela leitura inicial de artigos científicos relacionados com as abordagens e desafios da implementação dessas práticas inclusive da própria Indústria 4.0, cuja temática ainda é recente (BEIER et al., 2020). As justificativas para a temática foram apresentadas na introdução.

### Etapa 02: Definição de *strings* de pesquisa e filtros

Nesta etapa foi determinada a base de dados onde seria realizada a pesquisa, bem como, foram feitos testes iniciais de aderência de palavras-chaves (*strings*) de pesquisa até o resultado final, conforme apresentado no Quadro 2. A base selecionada foi *Web of Science* visto sua relevância dentro do meio acadêmico, a abrangência mundial e por possuir ferramentas de análise da amostra de pesquisa (WANG; WALTMAN, 2016). A pesquisa foi realizada no mês de julho de 2021. Não se utilizou outras bases devido a quantidade de artigos encontrados nesta base já atender a necessidade de embasamento teórico para o alcance do objetivo de pesquisa.

**Quadro 2.** Resumo dos *strings* de pesquisa.

Tema de pesquisa	Strings	Localização
Indústria 4.0	"Industry 4.0" or "4th Industrial Revolution" or "I4.0" or "I4.0" or "Fourth Industrial Revolution"	Título
Sustentabilidade	"Sustainab*"	Título

Fonte: elaborado pelos autores.

Para determinação da amostra inicial de artigos foi aplicado o filtro para o tipo de documento (Quadro 3) de forma a permanecer aqueles que têm maior relevância científica. Não foi utilizado filtro com relação a área de conhecimento de acordo com as

categorias da base *Web of Science*, ou seja, foram avaliados os resumos e títulos de toda a amostra inicial para assim evitar a exclusão de artigos importantes para a pesquisa. Essas informações estão apresentadas no Quadro 3.

**Quadro 3.** Critérios utilizados nos filtros de pesquisa na base *Web of Science*.

<b>Critério</b>	<b>Inclusão</b>	<b>Exclusão</b>
Strings de pesquisa conforme Quadro 02	Conforme Quadro 02	176
Tipo de documento	Artigo, revisão ou artigo com acesso antecipado	138

Fonte: elaborado pelos autores.

### **Etapa 03: Seleção de artigos final**

Tomando por base a amostra inicial de artigos, conforme demonstrado no Quadro 3, foi realizada a leitura dos títulos e resumos, a fim de definir a amostra final de artigos que serviram como base para o alcance do objetivo deste artigo. A seleção dos artigos para a amostra final tomou por base os critérios apresentados no Quadro 4, resultando em 36 artigos que tinham como características principais a discussão acerca da relação entre Indústria 4.0 e sustentabilidade, os desafios e contribuições desses dois conceitos que ainda estão sendo analisados conjuntamente pela ciência.

**Quadro 4.** Critérios de seleção dos artigos.

<b>Ação</b>	<b>Critério</b>
Inclusão	Sustentabilidade: artigos que abordem a temática da sustentabilidade acerca de sua teoria e práticas; Indústria 4.0: artigos que abordem as práticas e tecnologias da Indústria 4.0 relacionados com a sustentabilidade de forma genérica;
Exclusão	Sustentabilidade: artigos que tem como foco temas como economia circular, cadeia de suprimentos, modelo de negócios, construção civil e eficiência energética. Indústria 4.0: artigos que tem foco um tipo tecnologia e estratégias de operações;

Fonte: elaborado pelos autores.

### **Etapa 04: Caracterização dos artigos da base final**

Nesta etapa foi realizada a extração dos dados por meio de uma planilha do Microsoft Excel dos 36 artigos a fim de analisar os resultados e ter uma abordagem ampla das pesquisas atuais e suas características. Para tanto, foi utilizada a técnica de análise de conteúdo. Essa técnica é flexível e amplamente utilizada como uma abordagem sistemática e rigorosa para analisar dados obtidos ou gerados durante o estudo (WHITE; MARSH, 2006). Segundo os autores, a análise de conteúdo pode ter aplicações qualitativas e quantitativas, ou ambas, como é o caso deste artigo.

Em um primeiro momento foram extraídas as seguintes informações: métodos científicos, quantidade de publicações por ano, periódicos e país de origem dos autores. Essas informações foram analisadas de forma descritiva e quantitativa. Em seguida foi realizada uma análise de redes utilizando para isso o software VosViewer, um *software* desenvolvido na Universidade de Leiden para análise de redes, com base na co-ocorrência. Dessa forma, foram desenvolvidas três redes: palavras-chave dos autores e palavras-chave dos autores por ano. Tanto a análise descritiva como a de redes são apresentadas na seção 3.1 (visão geral das pesquisas).

Em seguida foi realizada uma análise temática por meio de uma abordagem interpretativa, delineando o que é conhecido e já estabelecido a partir de formas de extração de dados das contribuições centrais (TRANFIELD et al.,2003). Essa análise temática foi desenvolvida tomando como base os 10 artigos mais citados. Dessa forma, também com o apoio do Microsoft Excel foram extraídas as seguintes informações objetivo dos artigos, *gaps* elencados pelos autores, teorias utilizadas, métodos científicos

adotados, e práticas e tecnologias da Indústria 4.0 que contribuem para a sustentabilidade segundo a perspectiva do TBL. Essas informações foram analisadas de forma qualitativa e descritiva, cujos resultados são apresentados na seção 3.2 (Tecnologias e práticas da Indústria 4.0 para a implantação da sustentabilidade).

Por fim, tomando como base os resultados nas seções 3.1 e 3.2, foi desenvolvida uma discussão sendo apresentada uma proposta de agenda futura sobre a temática, conforme se observa na seção 4.

### **Etapa 05: Apresentação dos resultados**

Após a realização das etapas 01 a 04 foi possível compreender como está sendo abordada a sustentabilidade na Indústria 4.0 sendo possível fazer uma compilação das informações obtidas e a gerar um relatório dos resultados que é representado por esse artigo.

## **3. RESULTADOS**

### **3.1 Visão geral das pesquisas**

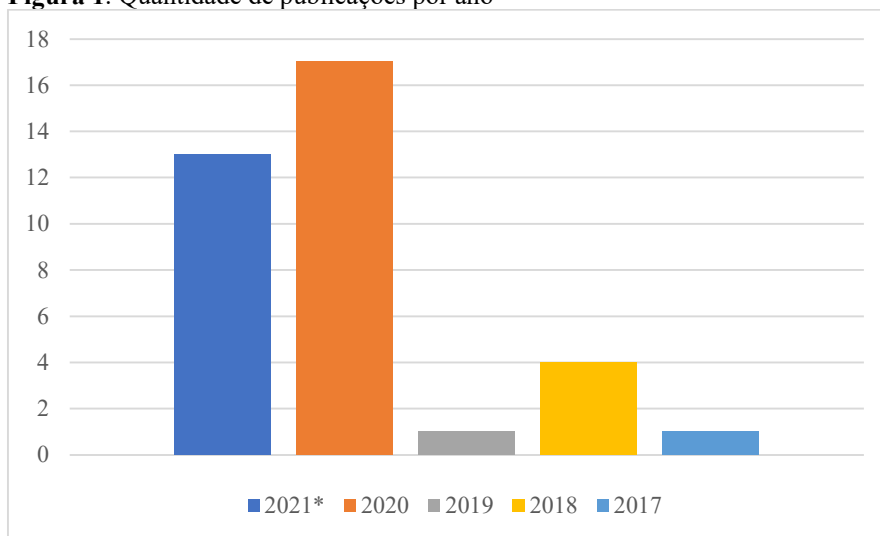
A amostra de 36 artigos selecionados tem como características principais a discussão teórica da relação entre as práticas e tecnologias da I4.0 e a implementação da sustentabilidade nas empresas. De tal forma que dentre este escopo, apenas 8 artigos têm aplicações da teoria em estudos de caso. Este fato pode estar associado aos critérios de inclusão e exclusão apresentados no Quadro 4, mas também tem ligação com fato de que a temática I4.0 ainda está em construção (BAI et al., 2020; BEIER et al., 2020; KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018). Associando este novo conceito à sustentabilidade, as pesquisas são ainda mais iniciais, desse modo, os trabalhos de revisão da literatura buscam a consolidação dessas teorias, bem como, contribuir no aprimoramento das práticas e no entendimento de como as novas tecnologias colaboram nesse contexto.

De acordo com a Figura 1 as publicações vêm crescendo demonstrando a importância de se conceituar a temática diante de um contexto de novas tecnologias e debates acerca da sustentabilidade. Na busca pelos artigos não foi realizado recorte com relação aos anos das publicações o que reforça que a pesquisa científica e conceitual sobre I4.0 e sustentabilidade tem crescido ao longo dos anos. O conceito de I4.0 foi publicado em 2011 na Alemanha (BAI et al., 2020) o que pode justificar esse atraso com relação as pesquisas que o associem a sustentabilidade.

Analisando os artigos foi possível elencar os *Journals* em que estes foram publicados (Quadro 5). Foram catalogados o JCR (*Journal Citation Report*) de cada periódico demonstrando o fator de impacto de cada um. O destaque principal foi o *Sustainability* (JCR 2020=3.251) possuindo o maior número de artigos da amostra. Este periódico tem como características ser interdisciplinar, acadêmico e revisado por pares tendo seu acesso aberto e englobando as temáticas sobre sustentabilidade ambiental, cultural, econômica e social. Destaque também para o periódico *Journal of Cleaner Production* (JCR 2021=9.297) que tem o foco em publicações sobre práticas de produção mais limpa, meio ambiente e sustentabilidade. O terceiro periódico com mais publicações foi o *Technological Forecasting and Social Change* (JCR 2021= 8.593) que tem por objetivo ser um fórum de discussão acerca de metodologias e práticas de novas tecnologias e estudos futuros que englobem as esferas social, ambiental e tecnológica.

A Figura 2 apresenta a origem do primeiro autor que está catalogado na base de dados *Web of Science*. Tal informação, apesar de não demonstrar o local de aplicação da pesquisa, contribui para apresentar onde os autores que estão estudando a temática da I4.0 e sustentabilidade estão localizados.

**Figura 1.** Quantidade de publicações por ano



Fonte: elaborado pelos autores.

\*até julho/2020.

**Quadro 5.** Journals dos artigos da amostra final e seu JCR.

<i>Journal</i>	Quantidade de publicações	<i>Journal Citation Report (JCR)</i>
SUSTAINABILITY	12	3.251**
JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	7	9.297 **
TECHNOLOGICAL FORECASTING AND SOCIAL CHANGE	2	8.593**
RESOURCES CONSERVATION AND RECYCLING	1	10.204*
SUSTAINABLE PRODUCTION AND CONSUMPTION	1	5.032*
INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTIVITY AND PERFORMANCE MANAGEMENT	1	2.770*
INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION ECONOMICS	1	7.885**
COMPUTERS IN INDUSTRY	1	7.635*
JOURNAL OF MODELLING IN MANAGEMENT	1	2.286
ENERGIES	1	3.004*
JOURNAL OF ENTERPRISE INFORMATION MANAGEMENT	1	2.659*
ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING	1	1.161
INTERNATIONAL REVIEW	1	
IEEE ACCESS	1	3.745*
SOUTH AFRICAN JOURNAL OF INDUSTRIAL ENGINEERING	1	0.488*
INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH	1	4.557*
PROCESS SAFETY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION	1	6.158**
ENTREPRENEURSHIP AND SUSTAINABILITY ISSUES	1	5.738*

Fonte: elaborado pelos autores.

\*JCR do ano de 2020.

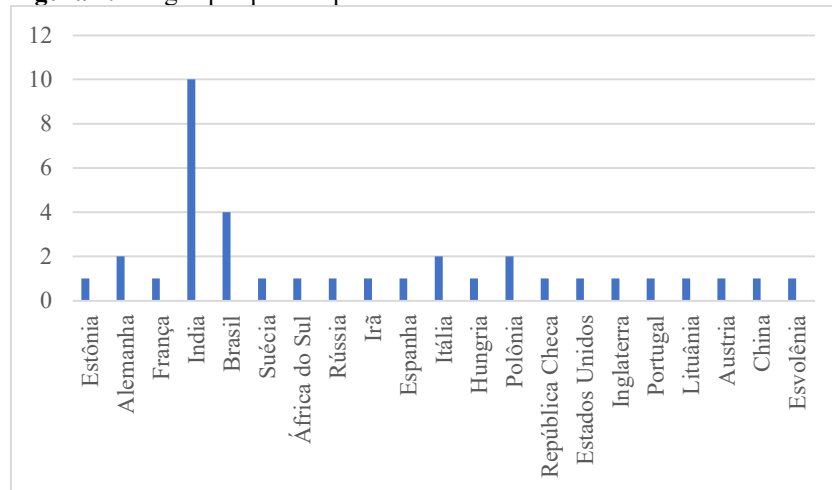
\*\*JCR do ano de 2021.

Os resultados mostram que os trabalhos se concentram na Europa, mesmo que de forma pulverizada entre os países. Isto é justificável visto que o conceito I4.0 surgiu na Alemanha e vem sendo difundido, inclusive pelos governos locais, através de projetos de implementação de tecnologias a fim de agregar maior valor aos produtos (MACHADO; WINROTH; RIBEIRO DA SILVA, 2020).

A Figura 3a apresenta a correlação entre palavras-chave encontradas nos artigos da amostra em estudo. Foi utilizado o mínimo de três ocorrências de cada palavra-chave para fazer parte desta análise. É possível perceber a importância do tema sustentabilidade

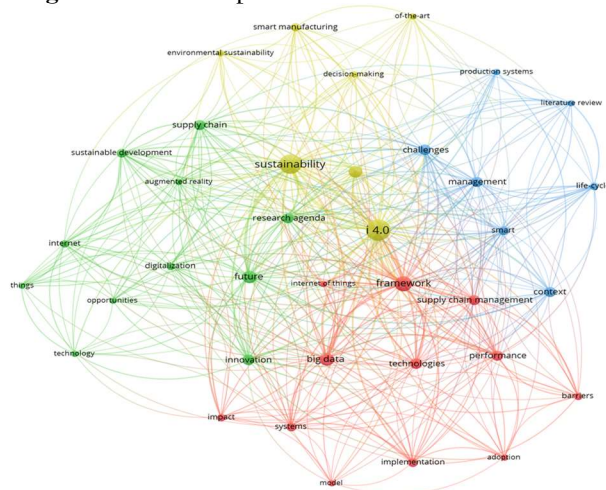
e I4.0, como também, as associações com inovação, internet, internet das coisas (IoT) e digitalização que são a base das novas tecnologias e práticas da Indústria 4.0 (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018). Analisando a imagem percebe-se quatro *clusters*: um verde, com palavras ligadas a tecnologia, *sustainable development* e *supply chain*; um azul, focado em sistemas de produção e gestão, por exemplo; um amarelo, com palavras voltadas a sustentabilidade ambiental, *smart manufacturing*, Indústria 4.0 e sustentabilidade; e, por fim, um vermelho, voltado para gestão da cadeia de suprimentos, *Big Data* e IoT.

**Figura 2.** Artigos por país do primeiro autor

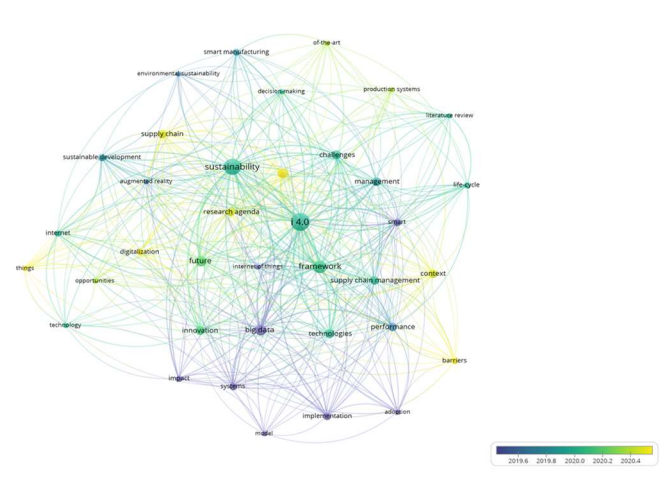


Fonte: elaborado pelos autores.

**Figura 3.** Redes de palavras-chave



**Figura 3a:** Rede de palavras-chave



**Figura 3b.** Palavras-chave de acordo com os anos da publicação

Fonte: VosViewer.

Kamble et al. (2018) afirmam a importância das tecnologias da I4.0 para a gestão da produção e da cadeia de suprimentos salientando que o *Big Data* se torna imprescindível para que o fluxo de informações seja rápido e eficiente de modo que as adaptações necessárias em relação a demanda ocorram no menor espaço de tempo possível (*Cluster* vermelho). Dentro do contexto da sustentabilidade as relações das tecnologias e da manufatura são extremamente conectadas visto que o conceito de *smart*

*manufacturing* surge justamente para agregar a produção a agilidade de informações que as novas tecnologias trazem e, conseqüentemente, ganhos de tempo, redução de desperdícios, inovação e qualidade do produto (GHOBAKHLOO, 2020) (*Cluster amarelo*).

O processo de digitalização está ligado ao desenvolvimento de novas tecnologias que trazem uma produção inteligente, conectada e descentralizada capaz de contribuir para o desenvolvimento sustentável (MACHADO; WINROTH; RIBEIRO DA SILVA, 2020) (*Cluster verde*). Nesse contexto, os sistemas de produção estão se modificando a fim de atender as novas demandas dos clientes que estão mais informados e voltados para práticas mais sustentáveis, como também, produtos com ciclo de vida maiores que contribuam para a redução de impactos no meio ambiente (MACHADO; WINROTH; RIBEIRO DA SILVA, 2020) (*Cluster azul*).

A Figura 3b apresenta a rede de palavras-chave de acordo com a mediana dos anos de publicações dos artigos associados. A temática da cadeia de suprimentos em conjunto com a digitalização tem sido mais participante em publicações recentes demonstrando a importância da temática. As palavras-chaves relacionadas a tecnologias estão centradas nas pesquisas do ano de 2019 o que pode estar relacionado a demanda inicial de entendimento delas dentro do contexto de sustentabilidade e Indústria 4.0 para posterior direcionamento a outros temas como *supply chain*.

### 3.2. Tecnologias e práticas da Indústria 4.0 para a implantação da sustentabilidade

A Indústria 4.0 envolve a transformação digital seja nos mercados industriais ou de serviços de modo a gerar valor em cada uma das partes do processo (SCHROEDER et al., 2019). As fábricas inteligentes estão sendo constituídas de modo a gerar eficiência de recursos e adaptação rápida aos cenários associando a isto as tecnologias da Indústria 4.0 (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018). Após uma análise temática em profundidade dos dez artigos mais citados, identificou-se as tecnologias e práticas da I4.0 para a implantação da sustentabilidade (Quadro 6).

**Quadro 6.** Tecnologias da Indústria 4.0 e sua contribuição para a sustentabilidade

Tecnologias da I 4.0	Descrição	Contribuição para a sustentabilidade	Autores que citam
Sistema <i>Ciber Físico</i> (CPS)	Sistema <i>Ciberfísico</i> que contribui para a integração das máquinas a fim de que possam colaborar entre si para otimização do processo através de <i>feedbacks</i> constantes que auxiliam na tomada de decisão.	- Cria trabalhos mais dinâmicos e flexíveis, permitindo ao trabalhador novos aprendizados; - Melhora a produtividade e eficiência dos recursos através da gestão integradas dos setores e máquinas.	(BEIER et al., 2020; BONILLA et al., 2018; SHARMA; JABBOUR; LOPES DE SOUSA JABBOUR, 2020)
Internet das coisas (IOT) e Industrial Internet das coisas (IIOT)	Sistema complexo formado por sensores, máquinas inteligentes e autônomas que realizam análise preditiva; Permite que os sensores capturem, processem e comuniquem dados; Coordenação e sincronização dos fluxos de produtos e informações.	- Redução dos dispositivos de produção, superprodução, movimento de bens e consumo de energia; - Contribuição na redução de gases poluentes; - Redução de estoques; - Melhora a produtividade.	(BAI et al., 2020; BEIER et al., 2020; BONILLA et al., 2018; DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; GHOBAKHLOO, 2020; KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018; MACHADO; WINROTH; RIBEIRO DA SILVA, 2020)
<i>Big Data</i>	Suporte a coleta de dados em tempo real; Análise de dados e tomada de decisão.	- Fabricação flexível, melhor qualidade do produto, eficiência energética e equipamentos aprimorados;	(BAI et al., 2020; BEIER et al., 2020; BONILLA et al., 2018; GHOBAKHLOO, 2020; KAMBLE; GUNASEKARAN;



Tecnologias da I 4.0	Descrição	Contribuição para a sustentabilidade	Autores que citam
		- Contribuição na previsão da manutenção e na classificação de produtos com e sem defeitos.	GAWANKAR, 2018; MACHADO; WINROTH; RIBEIRO DA SILVA, 2020; OLÁH et al., 2020)
Nuvem	Sistema de informações compartilhado que utiliza a internet para romper as fronteiras das empresas; Sistema em <i>feedback</i> contínuo.	- Ganho em redução de custos através do compartilhamento de dados; - Redução de estoques; - Aprimoramento do desempenho do sistema com maior agilidade e flexibilidade; - Melhoria do gerenciamento contribuindo para a criação de valor.	(BAI et al., 2020; DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; GHOBAKHLOO, 2020; KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018; MACHADO; WINROTH; RIBEIRO DA SILVA, 2020)
Simulação e protótipo	Testagem dos produtos e produção em tempo real de forma virtual.	- Inovação do produto, redução dos desperdícios; - Redução de tempos de configuração; - Planejamento antecipado da produção.	(BAI et al., 2020; BONILLA et al., 2018; GHOBAKHLOO, 2020; KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018; MACHADO; WINROTH; RIBEIRO DA SILVA, 2020)
Impressão 3D/Fabricação aditiva	Produção de pequenos lotes de produtos através de impressoras 3D e outros equipamentos.	- Diminuição do desperdício - Redução de fluxo de materiais; - Planejamento do produto conforme a demanda volátil.	(BAI et al., 2020; BONILLA et al., 2018; DE SOUSA JABBOUR et al., 2018; GHOBAKHLOO, 2020; KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018; MACHADO; WINROTH; RIBEIRO DA SILVA, 2020; MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018; OLÁH et al., 2020)
Sistemas robóticos	Robôs desempenhando atividades de risco e monótonas; Robôs autônomos.	- Redução de riscos potenciais a segurança e saúde dos trabalhadores e clientes; - Vantagem de custos.	(BAI et al., 2020; KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018; MACHADO; WINROTH; RIBEIRO DA SILVA, 2020; MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018)
Ciber segurança	Sistemas de sensores e dispositivos capazes de se comunicarem em prol de garantir segurança ao sistema.	- Identificação de riscos potenciais a segurança antes que se tornem riscos reais.	(BAI et al., 2020; GHOBAKHLOO, 2020; KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018; MACHADO; WINROTH; RIBEIRO DA SILVA, 2020)
Blockchain	Banco de dados completo distribuído que mantém uma lista de registros que cresce continuamente e utiliza-se de criptografia e tecnologia de autenticação em toda a sua rede.	- Transparência, descentralização de informações; - Melhoria do ciclo de vida dos produtos.	(BAI et al., 2020; BONILLA et al., 2018; GHOBAKHLOO, 2020; OLÁH et al., 2020)
Internet das pessoas (IoP)	Sistema de dados para gerenciamento mais aprimorado dos colaboradores;	- Incentivo a capacitação, segurança e prontidão na atividade; - Criação de produtos personalizados e sob	(GHOBAKHLOO, 2020)

Tecnologias da I 4.0	Descrição	Contribuição para a sustentabilidade	Autores que citam
	Gerenciamento de clientes e suas interações com os sistemas da empresa.	demanda evitando estoques e desperdícios.	
Internet de serviços (IoS)	- Sistema que trata o produto como serviço, integrando os setores da empresa em prol de uma entrega mais assertiva ao cliente.	- Gerenciamento da cadeia de produção; - Contribui para flexibilidade do processo.	(GHOBAKHLOO, 2020)

Fonte: elaborado pelo autores.

Para Kamble et al. (2018) a I4.0 tem um paradigma de conectar diferentes tipos de dispositivos físicos, uma rede de trabalho e a internet. Ao mesmo tempo existem desafios em lidar com os impactos ambientais, sociais e econômicos, por exemplo, que essas mudanças podem acarretar (BEIER et al., 2020). Na I 4.0, a IoT está conectada a CPS (Sistema *Ciber Físico*) de modo a gerar e alimentar informações que agregam valor ao processo e ao produto final e isso só é possível a partir de uma combinação de tecnologias como softwares, sensores, processadores e tecnologias da comunicação (KAMARUL BAHRAIN et al., 2016). O CPS conecta camadas de elementos físicos, como máquinas, componentes e instalações com uma camada *Cibernética* realizando a chamada virtualização da operação (BONILLA et al., 2018). Esta tecnologia integrativa contribui para aumentar as oportunidades de economia de energia através de *softwares* de otimização e aprimoramento do trabalho visto que o aumento de informações contribui para torná-lo mais dinâmico, como também, agrega valor à cadeia de suprimentos (BEIER et al., 2020; BONILLA et al., 2018).

Associada a esta tecnologia, a IoT (*Internet of Things*) tem por objetivo associar dispositivos de *hardware*, *software* e máquinas industriais para que de forma autônoma possam realizar análises e tomadas de decisão, definidas segundo parâmetros iniciais, de modo a contribuir para a resolução rápida e eficaz de problemas diversos (BAI et al., 2020). Para a implantação de práticas de sustentabilidade essa tecnologia auxilia no monitoramento de estoques, superprodução, estudo de movimentos de recursos, bem como, na elaboração de relatórios ambientais na medida em que consegue gerenciar a complexa rede de informações fora e dentro da produção (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018; SHARMA; JABBOUR; LOPES DE SOUSA JABBOUR, 2020). A IoT faz parte das principais tecnologias da I4.0 (BEIER et al., 2020) podendo, dentro de seu conceito, estar presente outras formas de inserção da internet no contexto produtivo, ou seja, alguns autores sugerem existência da IIoT (*Industrial Internet of Things*), IoS (*Internet of Service*) e IoP (*Internet of People*) (BONILLA et al., 2018; GHOBAKHLOO, 2020). Dentro do escopo de publicações do Quadro 6, apenas Ghobakhloo (2020) cita a IoP como sendo um sistema integrativo de gerenciamento de informações que estão focados nos clientes internos e externos de modo a contribuir para a personalização de produtos, adaptação da produção à demanda e as necessidades dos trabalhadores. A IoS utiliza do conceito de servitização para integrar as partes da empresa em prol de uma entrega mais focada no serviço (valor agregado) do que no produto, colaborando para a integração da cadeia de suprimentos, evitando perdas.

As tecnologias da I4.0 se integram de modo a trazer novas possibilidades de gerenciamento, controle e redução de desperdícios (BAI et al., 2020). O *Big Data* traz nesse sentido o suporte para coleta de dados em tempo real, como também, a disponibilização de tais informações para todos que da cadeia produtiva fazem parte (BEIER et al., 2020). Esta tecnologia traz a produção maior flexibilidade, qualidade do

produto, eficiência energética e controle de modo automatizado contribuindo para impulsionar a agilidade (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018). No que tange a sustentabilidade, o *Big Data* também colabora no controle da manutenção preditiva (BONILLA et al., 2018).

Na manufatura, o sistema em Nuvem permite que haja uma integração em rede de diversos setores interligados pela internet sendo auto organizados, auxiliados por *feedbacks* e coordenados pela estrutura de *Big Data* (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018). Este compartilhamento de dados contribui para a redução de custos e estoques na medida em que as partes conseguem administrar melhor esses fluxos de materiais e produtos visto a retroalimentação contínua de informações (BAI et al., 2020; GHOBAKHLOO, 2020). O conjunto formado pelo CPS, IoT e *Big Data* fornecem uma base de sistema de informação que coopera para a implementação da sustentabilidade na medida em que agregam diversos dispositivos que colaboram entre si para a disponibilização de informações para a tomada de decisão assertiva com relação as práticas necessárias para a implementação de ações que reduzam desperdícios, energia e tempo.

Muller (2018) salienta a importância da I4.0 para agregar valor aos produtos visto que colaboram para a entrega mais direcionada e personalizada. As tecnologias de Simulação e Impressão 3D se apresentam nesse contexto como uma alternativa para a criação de protótipos de produtos antes da fabricação final, bem como, de produtos em pequenos lotes (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018). A Simulação e a prototipagem podem trazer redução de desperdícios de materiais, tempos de configuração e planejamento da produção visto que essas tecnologias conseguem trazer para o mundo virtual as situações do mundo real (BONILLA et al., 2018). A Impressão 3D, ou fabricação aditiva, possibilita a testagem do produto, como também, a produção personalizada que agrega valor suprindo as necessidades dos clientes ao mesmo tempo em que é possível o planejamento da produção e, associado a outras tecnologias da I4.0, a sua adaptação (DE SOUSA JABBOUR et al., 2018).

As principais contribuições dos sistemas robóticos são a precisão na atividade desempenhada e a possibilidade de substituição de trabalhos perigosos e monótonos por robôs sejam eles autônomos ou não (BAI et al., 2020). Para Kamble et al. (2018), esses sistemas robóticos ajudam na redução dos riscos em relação aos trabalhadores, bem como, na vantagem de custos. Quintas et al. (2017) salientam a importância da integração do trabalhador neste novo sistema de modo que seu papel seja de supervisão e controle visto que, no âmbito da esfera social, essas novas formas de trabalho podem acarretar desemprego.

Por fim, as tecnologias de *Ciber segurança* e *Blockchain* tem por objetivo garantir que esse fluxo de informações internas e externas das empresas sejam protegidas de ameaças (GHOBAKHLOO, 2020; MACHADO; WINROTH; RIBEIRO DA SILVA, 2020). As tecnologias de *Ciber segurança* são dispositivos e sensores capazes de proteger o sistema de ataques externos fazendo com que riscos potenciais não se tornem reais (KAMBLE; GUNASEKARAN; GAWANKAR, 2018). O *Blockchain* contribui para uma transparência maior das informações que perpassam os sistemas de *Big Data* entre os membros da cadeia de suprimentos, por exemplo (MACHADO; WINROTH; RIBEIRO DA SILVA, 2020).

#### **4. DISCUSSÃO E PROPOSTA DE AGENDA DE PESQUISA**

A análise descritiva realizada na seção 3.1 demonstrou que as pesquisas no campo da I4.0 e sustentabilidade são recentes. As tecnologias da I4.0 podem ter um amplo campo para contribuir na implementação da sustentabilidade. Além disso, é possível perceber

que artigos com foco na revisão da literatura ainda são poucos diante a necessidade de definição da temática. Os países que fizeram sua contribuição nos artigos estão concentrados na Europa o que valida a implementação mais acelerada nesses locais da manufatura integrada com a internet (MACHADO; WINROTH; RIBEIRO DA SILVA, 2020).

Diante dos aspectos apresentados na seção 4.2 também é possível compreender melhor como as diversas tecnologias da I4.0 podem contribuir para a implementação de práticas de sustentabilidade na produção. Muller et al. (2018) afirmam em seu trabalho os benefícios e oportunidades que a I4.0 pode fornecer de forma que os gestores precisam compreender os desafios e não desanimar em busca da digitalização e conexão baseada na internet visto que esse contexto gera valor industrial. Para finalizar, convém destacar que, de uma forma geral, a conexão da I4.0 com a sustentabilidade segundo a perspectiva do TBL é baixa. A maior parte dos benefícios são de ganhos operacionais e ainda há pouco foco na sustentabilidade ambiental e social de uma forma mais central, para resolver de fato problemas ambientais e sociais.

Por fim, tomando como base o exposto nas seções anteriores é apresentada uma agenda de pesquisa na temática conforme se verifica a seguir.

**a) Métodos científicos.** As pesquisas que fizeram parte da amostra têm como características a discussão da teoria de forma abrangente ou focada em apenas algumas poucas tecnologias e suas relações com a sustentabilidade. Se fazem necessários estudos que realizem RSL que discutam a consolidação da teoria de modo a colaborar com a real implementação das práticas da sustentabilidade apoiadas pelas tecnologias da I4.0. Pesquisas exploratórias utilizando o método de estudo de caso que apresentem as aplicações dessas tecnologias e os resultados positivos ou não no escopo da sustentabilidade também são de suma importância para melhor percepção do que está sendo desenvolvido na manufatura atual com fins de melhoria ou validação.

**b) Tecnologias da I4.0 versus práticas de sustentabilidade.** A expansão do uso da internet e outras tecnologias de análise e armazenamento de dados possibilitaram um crescimento nos modelos de gestão na manufatura. *Internet of things*, *Big Data*, *Blockchain*, sistemas robóticos e Impressão 3D são comumente citadas com as tecnologias mais utilizadas nessa nova produção conectada. No entanto, é possível perceber que tecnologias como *IOP (Internet of people)* e *IOS (Internet of service)* possuem aplicação no pilar social visto que possibilitam uma gestão melhor dos trabalhadores e da relação com o cliente interno e externo. Compreender como essas tecnologias podem colaborar com a sustentabilidade é uma vertente promissora de estudos.

**c) Aspectos ambientais e sociais do TBL.** As tecnologias encontradas na literatura e suas contribuições para a implementação da sustentabilidade tem como foco o pilar econômico do TBL. No Quadro 6 as contribuições encontradas, em sua maioria, colaboram para que desperdícios sejam reduzidos, mas possuem foco nas economias possíveis de produção. Compreender como as tecnologias da I4.0 podem colaborar para o alcance de ganhos da sustentabilidade social e ambiental é uma linha de pesquisa ainda pouco encontrada nos trabalhos. As diversas tecnologias podem possibilitar com que trabalhadores alcancem novos patamares de educação e comprometimento com a empresa. A sociedade em si poderá ter ganhos no que diz respeito à redução de disparidades sociais tendo em vista que o acesso à informação trazido pela internet amplia os horizontes daqueles que estão à margem.

**d) Foco das pesquisas.** Aas pesquisas mais antigas analisadas tem como foco as tecnologias da I4.0 atreladas a sustentabilidade por meio da utilização da internet e IoT, principalmente (Figura 3). É possível perceber também que a tendência atual é a associação da I4.0 com a cadeia de suprimentos e sua gestão. Essa temática se mostra ainda em construção em decorrência do conceito ainda em formação sobre a I4.0, bem como, a recente demanda por estudos envolvendo *circular economy* e *barriers* (Figura 3). Outro importante aspecto para pesquisas futuras é compreender de forma prática como as tecnologias auxiliam na implementação dos conceitos de sustentabilidade, isto porque nos artigos analisados percebe-se que não está aprofundada essa compreensão.

**e) Setores da economia.** Dentro do escopo dos *strings* escolhidos (Quadro 3), dos filtros utilizados na base de dados *Web of Science* (Quadro 4) e nos filtros para a amostra final (Quadro 5) as pesquisas encontradas têm um foco teórico. É possível perceber, no entanto, que as pesquisas que adotam o método de estudo de caso não citam as características principais das organizações ou apresentam uma descrição superficial dos setores de atuação. Dessa forma, se fazem necessárias pesquisas demonstrando como as tecnologias podem ser aplicadas nos diversos contextos produtivos a fim de colaborar com a implementação da sustentabilidade.

## 5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa sistematizou o conhecimento existente acerca das tecnologias da I4.0 que contribuem para a implementação de práticas da sustentabilidade. Desse modo, o artigo realizou uma RSL, fornecendo uma visão geral das pesquisas, seguido de uma análise temática para identificar práticas e tecnologias da I4.0 que contribuem para a implantação da sustentabilidade. Por fim, tomando como base os resultados e as lacunas identificadas, foi apresentado uma proposta de agenda de pesquisa.

A principal contribuição deste artigo encontra-se na compilação das tecnologias da I4.0, suas características e a contribuição para a implementação de práticas da sustentabilidade (Quadro 6). Este formato de apresentação de resultados consegue mostrar um panorama dos estudos que estão sendo realizados sobre a I4.0 e a sustentabilidade de forma condensada. Os diversos estudos utilizados para a elaboração do Quadro 6 tratam do assunto de diversas formas associando a outras temáticas como: desafios e oportunidades das práticas da I4.0 no contexto da sustentabilidade (MÜLLER; KIEL; VOIGT, 2018); objetivos de desenvolvimento sustentável (BAI et al., 2020); ou, vantagens para o cliente (OLÁH et al., 2020). Com isto a relação da sustentabilidade é encontrada de forma secundária dentro das pesquisas. Dessa forma, este panorama de tecnologias e suas contribuições para a sustentabilidade podem ajudar a compreender melhor os caminhos a serem seguidos pelos gestores que desejam ampliar o uso das tecnologias na produção em consonância com a sustentabilidade. É de suma importância a ampliação desses estudos visto que ainda não há uma teoria definida, como também, impactos positivos e negativos identificados com a utilização dessas tecnologias. Bai et al. (2020) salientam ainda que a maior digitalização pode melhorar a igualdade e a economia visto que contribui para um maior acesso a informação e bens de consumo, mas ao mesmo tempo demanda fontes de energia adicionais que irão esgotar os recursos e emitir gases prejudiciais ao meio ambiente, por exemplo.

Diante do contexto da I4.0 este artigo tem limitações quanto a identificação de forma mais detalhada das tecnologias existentes visto que ainda é um cenário incerto de muitas mudanças e avanços. O escopo de análise das publicações para este artigo se limitou àqueles voltados para revisões da literatura ou direcionados para formulação da teoria. Ampliar os critérios de inclusão de artigos abrangendo os que estudam tecnologias de forma específica, como também, cadeia de suprimentos e economia circular podem

trazer novas abordagens. Outra limitação do trabalho foi a utilização de apenas uma base de dados, a *Web of Science*. Tal fato pode ter excluído publicações importantes para a temática. Por fim, utilizou-se os dez artigos mais citados para a análise temática e elaboração do Quadro 6 o que pode ter contribuído para a não identificação de outras tecnologias ou abordagens na sustentabilidade. Dessa forma, futuras revisões da literatura podem incluir outras bases, outros *strings* de pesquisa, outros documentos não considerados nesse artigo e ainda ampliar o escopo de análise dos artigos considerados na análise temática.

Por fim, pesquisas futuras podem utilizar-se do escopo teórico e a agenda de pesquisa apresentados neste artigo como caminho para a identificação de novas práticas de sustentabilidade ligadas à I4.0. Ainda existe uma lacuna para a identificação do uso eficiente dos recursos escassos, matérias-primas, informação, energia e consumo responsável. Muito se fala dos avanços que a I4.0 traz para agregar valor ao produto e a cadeia de suprimentos, no entanto, pouco se sabe sobre os impactos sociais, econômicos e ambientais que podem surgir.

## REFERÊNCIAS

- BAI, C. et al. Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. **International Journal of Production Economics**, v. 229, p. 107776, 2020.
- BEIER, G. et al. Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes – A literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, 2020.
- BONILLA, S. H. et al. Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 10, 2018.
- DE SOUSA JABBOUR, A. B. L. 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**, v. 132, n. October 2017, p. 18–25, 2018.
- ELKINGTON, J. Partnerships from cannibals with forks: The triple bottom line of 21st-century business. **Environmental Quality Management**, v. 8, n. 1, p. 37–51, 1998.
- GHOBAKHLOO, M. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 29, n. 6, p. 910–936, 2018.
- GHOBAKHLOO, M. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, p. 119869, 2020.
- JERÓNIMO SILVESTRE, W.; ANTUNES, P.; FILHO, W. L. Hybrid Bottom Line: Another perspective on the sustainability of organizations. **International Journal of Sustainable Development and World Ecology**, v. 21, n. 5, p. 456–464, 2014.
- KAMARUL BAHRI, M. A. et al. Industry 4.0: A Review on Industrial Automation and Robotic. **Jurnal Teknologi**, v. 78, n. 6–13, p. 137–143, 2016.
- 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**, v. 117, p. 408–425, 2018.
- KIEL, D. et al. **Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0**. [s.l: s.n.]. v. 21
- 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**, v. 58, n. 5, p. 1462–1484, 2020.
- 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 (Switzerland)**, v. 10, n. 1, 2018.

OLÁH, J. et al. Impact of industry 4.0 on environmental sustainability. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 11, p. 1–21, 2020.

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

PRAUSE, G. et al. On sustainable production networks for Industry 4 . 0 To cite this version : HAL Id: hal-01860909. **Entrepreneurship and Sustainability Issues, Entrepreneurship and Sustainability Center**, v. 4, n. 4, p. 421–431, 2017.

QUINTAS, J.; MENEZES, P.; DIAS, J. Information Model and Architecture Specification for Context Awareness Interaction Decision Support in Cyber-Physical Human-Machine Systems. **IEEE Transactions on Human-Machine Systems**, v. 47, n. 3, p. 323–331, 2017.

SCHROEDER, A. et al. Capturing the benefits of industry 4.0: a business network perspective. **Production Planning and Control**, v. 30, n. 16, p. 1305–1321, 2019.

SHARMA, R.; JABBOUR, C. J. C.; LOPES DE SOUSA JABBOUR, A. B. Sustainable manufacturing and industry 4.0: what we know and what we don't. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 34, n. 1, p. 230–266, 2020.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review\* Introduction: the need for an evidence- informed approach. **British Journal of Management**, v. 14, p. 207–222, 2003.

WANG, Q.; WALTMAN, L. Large-scale analysis of the accuracy of the journal classification systems of Web of Science and Scopus. **Journal of Informetrics**, v. 10, n. 2, p. 347–364, 2016.

WHITE, M. D.; MARSH, E. E. Content analysis: A flexible methodology. **Library Trends**, v. 55, n. 1, p. 22–45, 2006.

WITTENBERG, C. Human-CPS Interaction - requirements and human-machine interaction methods for the Industry 4.0. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 19, p. 420–425, 2016.