

30 de setembro a 4 de outubro
Ponta Grossa - PR - Brasil

INDÚSTRIA 4.0 E SUSTENTABILIDADE: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

INDUSTRY 4.0 AND SUSTAINABILITY: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

ÁREA TEMÁTICA: INOVAÇÃO, TECNOLOGIA E EMPREENDEDORISMO

Wesley da Paixão de Oliveira, Universidade Federal de São Carlos, Brasil, wesley.deoliveira93@hotmail.com

Márcia Regina Neves Guimarães, Universidade Federal de São Carlos, Brasil, mrrng@ufscar.br

Pierre Martines de Arruda, Universidade Federal de São Carlos, Brasil, pierre.martines@hotmail.com

Resumo

O artigo consiste em uma revisão sistemática da literatura sobre a sustentabilidade no contexto da Indústria 4.0. 51 artigos indexados na Scopus foram selecionados e analisados. Através da análise bibliométrica, foram encontrados os autores mais relevantes, suas instituições e as estatísticas pertinentes aos títulos, resumos e palavras-chave. Além disso, realizou-se uma análise de redes de citações e de cocitações dos referidos artigos. A temática estudada se mostrou muito recente na literatura, sendo abordada pela primeira vez no ano de 2015. A revisão conduzida indicou que o tema é emergente e desperta o interesse dos pesquisadores ao redor do mundo. O artigo contribuiu com a literatura a partir da apresentação do atual panorama acerca da inserção da sustentabilidade na Indústria 4.0.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Sustentabilidade; Revisão Sistemática; Análise Bibliométrica.

Abstract

This paper consists of a systematic literature review about sustainability in Industry 4.0 context. 51 papers indexed in Scopus were selected and analyzed. Through bibliometric analysis, the most relevant authors, their affiliations and statistics related to titles, abstracts and keywords were found. Furthermore, a citation and co-citation network analysis was carried out. The studied subject is very recent in literature, being approached for the first time in 2015. The conducted review indicated that the topic is emerging and arouses researchers interest around the world. This paper contributed with literature from the presentation of current landscape about sustainability insertion in Industry 4.0.

Keywords: Industry 4.0; Sustainability; Systematic Review; Bibliometric Analysis.

1. INTRODUÇÃO

O ambiente industrial vive um intenso processo de transformação nas suas operações, no qual a inserção da digitalização avançada nas fábricas, a integração entre diversas tecnologias no desenvolvimento de maquinários e de produtos inteligentes, a presença de sistemas de produção modulares e eficientes, e também, cenários de produção onde os manufaturados possuem suficiente autonomia para controlar os seus próprios processos, estão revolucionando as organizações, trazendo um novo paradigma para o campo industrial. Essa revolução manufatureira é conhecida como Indústria 4.0 (Lasi, Kemper, Fettke, Feld, & Hoffmann, 2014). A quarta revolução industrial permite que as organizações lidem com grandes volumes

de informações relevantes e disponíveis em tempo real acerca dos processos produtivos e da conexão entre máquinas e seres humanos, tornando os processos de tomada de decisão mais precisos (Martínez-Olvera & Mora-Vargas, 2019; Rajput & Singh, 2019).

A sustentabilidade é considerada uma das principais preocupações nesse cenário de alta evolução tecnológica, visto que nos tempos atuais, os sistemas de produção precisam incorporar as questões ambientais nas suas operações (Luthra & Mangla, 2018). A literatura buscou entender as prováveis mudanças ambientais decorrentes da quarta revolução industrial (Bányai, Tamás, Illés, Stankevičiūtė, & Bányai, 2019; Bhagawati, Manavalan, Jayakrishna, & Venkumar, 2019; Garcia-Muiña, González-Sánchez, Ferrari, & Settembre-Blundo, 2018; Müller & Voigt, 2018; Stock, Obenaus, Kunz, & Kohl, 2018; Tsai & Lu, 2018; Waibel, Steenkamp, Moloko, & Oosthuizen, 2017). No entanto, não foram encontradas na literatura revisões sistemáticas relacionadas ao tema em questão.

Diante do contexto apresentado, o objetivo do artigo consiste em revisar de forma sistêmica a literatura acerca da sustentabilidade na conjuntura da Indústria 4.0 para: identificar os principais autores, instituições e periódicos mais relevantes; e entender a maneira que a sustentabilidade e a quarta revolução industrial se correlacionam.

O artigo se encontra estruturado da seguinte maneira: a seção 2 apresenta o referencial teórico relacionado à Indústria 4.0, à sustentabilidade e à correlação entre esses conceitos; a seção 3 exibe a metodologia adotada no estudo e as estatísticas relacionadas aos dados iniciais obtidos; a seção 4 retrata a análise bibliométrica dos autores e das instituições mais relevantes, e também, as estatísticas inerentes aos títulos, aos resumos e às palavras-chave; a seção 5 expõe a análise de citação e de cocitação dos artigos selecionados; e a seção 6 apresenta as conclusões da revisão sistemática.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Uma revisão teórica sobre os conceitos e as características pertinentes à Indústria 4.0, as características e o papel da sustentabilidade e a ligação entre ambos os conceitos é apresentada nessa seção.

2.1 Indústria 4.0

O termo Indústria 4.0 surgiu em 2011 na Alemanha com o objetivo de promover fundamentais avanços e melhorias a todos os processos industriais relacionados com a manufatura, engenharia, cadeia de suprimentos e gerenciamento do ciclo de vida através de redes de comunicação baseadas em *Internet of Things (IoT)*, *Internet of Services (IoS)* e *Cyber-Physical Systems (CPS)*, promovendo a integração de recursos, pessoas, máquinas e serviços em tempo real (Chauhan, Sharma, & Singh, 2019; Garrido-Hidalgo et al., 2018; Hermann, Pentek, & Otto, 2016; Stock, Obenaus, Kunz, & Kohl, 2018). Dados estimados pelo *Boston Consulting Group* em 2015 mostram que nos próximos 10 anos, a quarta revolução industrial irá aumentar o índice de produtividade da manufatura alemã em torno de 5% a 8%, elevando os ganhos do setor para valores entre 90 e 150 bilhões de euros (Gu, Guo, Hall, & Gu, 2019).

A conectividade, a descentralização, a automação e a digitalização são percebidas como as principais características da Indústria 4.0 por transformarem os sistemas convencionais de produção em sistemas inteligentes, nos quais componentes, dispositivos digitais e máquinas “conversam” entre si com intuito de promover o autogerenciamento da cadeia produtiva, garantindo assim, a sua autonomia de adaptação e de otimização (de Sousa Jabbour, Jabbour, Godinho Filho, & Roubaud, 2018; Gu et al., 2019). Ademais, o escopo da Indústria 4.0 compreende uma grande variedade de tecnologias (e.g. veículos elétricos, fontes de energias renováveis, *Big Data*, *blockchain*, inteligência artificial, realidade virtual, dentre outras) (Lin, Shyu, & Ding, 2017).

Sendo assim, o paradigma da quarta revolução industrial é composto essencialmente por três dimensões com digitalização e interligação inteligente dos seus componentes: a integração horizontal ao longo de toda a cadeia de valor do ciclo de vida de um produto e de produtos adjacentes; a engenharia *end-to-end* ao longo de todo o ciclo de vida de um produto, ou seja, desde a aquisição da matéria prima até o final da vida desse produto; e a integração vertical e sistemas de produção em redes (Stock & Seliger, 2016).

2.2 Sustentabilidade

O conceito de sustentabilidade surgiu na área de silvicultura, baseado no seguinte princípio: a quantidade extraída de madeira jamais deve ser maior do que o volume produzido pela floresta no novo ciclo de crescimento (Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Hultink, 2017; Kuhlman & Farrington, 2010). O termo teve seu uso generalizado após o conceito de desenvolvimento sustentável ter sido apresentado no relatório Brundtland pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1987. O relatório afirma que o desenvolvimento sustentável objetiva atender às necessidades demandadas pela atual geração de modo que não seja comprometida a capacidade das futuras gerações de atenderem às suas próprias necessidades (Heinberg, 2010; Kuhlman & Farrington, 2010). No entanto, a sustentabilidade é um conceito muito abrangente, possuindo cerca de 300 definições diferentes, com vários termos utilizados sob diferentes perspectivas (e.g. prevenção de poluição, produção mais limpa, química verde, etc.) e por conta disso, a literatura carece de um consenso a respeito de sua conceituação (Adams, Jeanrenaud, Bessant, Denyer, & Overy, 2016; Geissdoerfer et al., 2017; Glavič & Lukman, 2007).

Devido à proposta do artigo, a sustentabilidade será observada sob a ótica do chamado tripé da sustentabilidade, que busca integrar de maneira balanceada as questões sociais, econômicas e ambientais. Nessa abordagem, são levados em consideração três aspectos: o social, cujas ações tomadas devem sempre respeitar os seres humanos e o capital social; o econômico, diretamente relacionado com os lucros e a liquidez das empresas, o que garante sua sobrevivência no mercado; e o ambiental, que preza pela racional utilização de recursos e pela produção somente de emissões que podem ser gerenciadas de forma natural pelo ecossistema (Birkel, Veile, Müller, Hartmann, & Voigt, 2019; Geissdoerfer et al., 2017).

2.3 Indústria 4.0 e Sustentabilidade

As tecnologias empregadas no ambiente da Indústria 4.0, aliadas aos dados obtidos em tempo real das linhas de produção e dos parceiros da cadeia de suprimentos, possibilitam a utilização e a alocação de recursos (e.g. materiais, produtos, energia, etc.) de maneira muito mais eficiente (Jabbour, Jabbour, Foropon, & Godinho Filho, 2018). A literatura apresenta exemplos relacionados: ao uso do *blockchain* com o objetivo de melhorar as operações em redes de energia, na promoção de energia limpa na China, e a sua integração com outras fontes tecnológicas e aplicações sustentáveis na indústria alimentar (Fu, Shu, & Liu, 2018; Zhao et al., 2019); o uso do *IoT* para melhorar a interação homem-máquina em fábricas inteligentes e sustentáveis, e ainda, no contexto do gerenciamento de cadeias de suprimento sustentáveis, auxiliando os processos de tomada de decisão e a rápida obtenção de dados (Garrido-Hidalgo et al., 2018; Manavalan & Jayakrishna, 2019); à utilização do *Big Data* para obter grandes volumes de dados relacionados aos estoques, às movimentações perigosas, aos níveis de ruído, dentre outros, com o intuito de auxiliar na definição de um *layout* sustentável e robusto para as organizações de maneira geral (Kumar, Singh, & Lamba, 2018).

A quarta revolução industrial é uma grande oportunidade para as organizações criarem valores industriais e sustentáveis nas três perspectivas do tripé da sustentabilidade: na econômica, através do desenvolvimento de novos modelos de negócios, economizando energia, reduzindo os custos operacionais e utilizando recursos renováveis; na ambiental, reduzindo as emissões

de gases do efeito estufa, reduzindo desperdícios e o consumo de energia de fontes não renováveis, aplicando a economia circular, desenvolvendo produtos sustentáveis, realizando *retrofitting* em máquinas, em equipamentos e em sistemas; na social, melhorando as condições de trabalho e também da sociedade localizada no entorno, reduzindo a quantidade de acidentes no trabalho, aumentando a motivação e estimulando a criatividade da mão de obra (Luthra & Mangla, 2018; Manavalan & Jayakrishna, 2019; Müller, Kiel, & Voigt, 2018; Stock & Seliger, 2016; Varela, Araújo, Ávila, Castro, & Putnik, 2019).

3. METODOLOGIA

A metodologia de revisão sistemática proposta por Tranfield, Denyer e Smart (2003) é um processo científico, transparente e replicável que permite a avaliação do escopo da literatura através da identificação dos estudos existentes, da seleção e da avaliação desses trabalhos, sintetizando os dados obtidos e as contribuições mais relevantes, constatando *gaps* de pesquisa e destacando os limites do conhecimento. O artigo se baseou na revisão sistemática realizada por Fahimnia, Sarkis e Davarzani (2015) a respeito das cadeias de suprimentos na conjuntura da sustentabilidade. Da mesma forma que na revisão de Fahimnia, et al. (2015), a pesquisa foi realizada somente na base de dados da Scopus, pois a mesma é o maior banco de dados da literatura revisado por pares, com mais de 20.000 periódicos indexados, abrangendo pesquisas nas áreas de tecnologia, de ciência, de ciências sociais, de medicina, de artes e de humanas. Ademais, as análises de citações da Scopus incluem mais artigos do que as da Web of Science (M. E. Falagas, Pitsouni, Malietzis, & Pappas, 2007).

3.1 Formulação da questão de pesquisa

Inicialmente, foi formulada a seguinte questão de pesquisa a ser respondida pela revisão sistemática da literatura: “Como a sustentabilidade é incorporada no âmbito da Indústria 4.0?”. Assim, buscou-se: entender como a questão da sustentabilidade é inserida e abordada pela Indústria 4.0; e compreender a correlação existente entre os referidos conceitos.

3.2 Definição das palavras-chave e da expressão de busca

As palavras-chave utilizadas na Scopus para a coleta dos dados incluem “Industr* 4.0” e “Sustain*”. Foi empregado o asterisco (*) no final das palavras para uma maior amplitude dos resultados retornados pela busca realizada, tal símbolo indica que são aceitas todas as variações dos sufixos das palavras. A expressão de busca utilizada foi (“Industr* 4.0” AND “Sustain*”) e seu emprego ocorreu nos títulos, resumos e palavras-chave dos trabalhos.

3.3 Resultados iniciais

A pesquisa inicial resultou num total de 447 trabalhos, incluindo artigos, artigos de conferência, livros, capítulos de livros, editoriais, dentre outros. Dessa maneira, os resultados iniciais não apresentam quaisquer restrições na busca realizada na base de dados da Scopus. A Tabela 1 agrupa os resultados obtidos.

EXPRESSÃO DE BUSCA	TOTAL DE TRABALHOS ENCONTRADOS
(“Industr* 4.0” AND “Sustain*”)	447

Tabela 1 – Resultados iniciais obtidos

3.4 Refinamento dos resultados iniciais

Foram realizados dois processos de filtragem nos resultados iniciais para selecionar os artigos a serem analisados. O primeiro filtro excluiu os trabalhos que não são artigos científicos, os artigos que não são revisados por pares e os que não foram elaborados em língua inglesa,

resultando em 160 artigos. O segundo filtro consistiu na leitura dos títulos, dos resumos, das introduções e das conclusões desses 160 artigos com o intuito de escolher somente aqueles que tratam da sustentabilidade no cenário da Indústria 4.0. Ao todo, 51 artigos foram considerados para as análises subsequentes. A Figura 1 ilustra o procedimento de seleção dos artigos a serem averiguados.

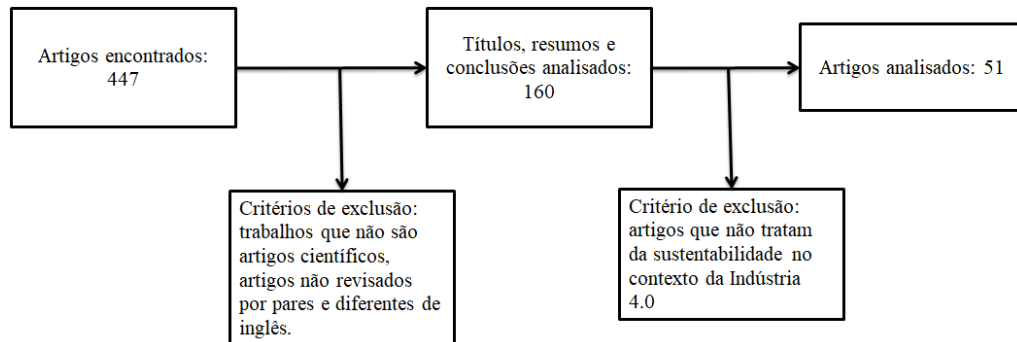


Figura 1 – Processo de filtragem dos resultados iniciais

3.5 Estatísticas dos dados iniciais

A Figura 2 exibe o total de artigos publicados por ano. A primeira publicação acerca da sustentabilidade no contexto da Indústria 4.0 ocorreu com Siemieniuch, Sinclair e Henshaw (2015), cujo foco do artigo consistiu em entender o papel da engenharia sustentável (e.g. baixo consumo de energia, menor quantidade de materiais requisitados na produção, menores índices de resíduos e de emissões de gases, etc.) na mitigação dos potenciais efeitos dos chamados “*Global Drivers*” (e.g. demografia populacional, segurança alimentar e energética, segurança e proteção da comunidade) dentro do processo de transição para a Indústria 4.0 que alguns países estavam presenciando. Até 2017, poucos artigos haviam sido publicados dentro do tema estudado nessa revisão. No entanto, é possível observar um pico de trabalhos desenvolvidos em 2018, com 24 artigos publicados, e também em 2019, quando 22 artigos foram realizados até o momento em que foi feita a busca. A Tabela 2 exibe os 10 periódicos que mais publicaram sobre o tema, percebe-se que o periódico com o maior número de artigos é o *Sustainability (Switzerland)* com 11 publicações, seguido por *Process Safety And Environmental Protection* com quatro publicações e por *Computers And Industrial Engineering* e *Journal Of Cleaner Production*, ambos com três publicações. Juntos, os 10 periódicos foram responsáveis por 33 publicações.

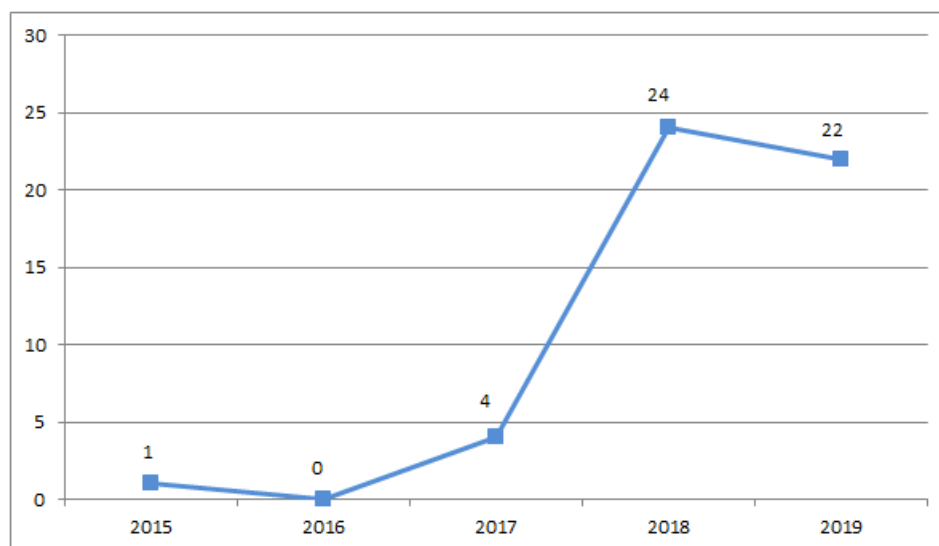


Figura 2 – Quantidade de artigos publicados por ano

PERIÓDICO	QUANTIDADE DE PUBLICAÇÕES
<i>Sustainability (Switzerland)</i>	11
<i>Process Safety And Environmental Protection</i>	4
<i>Computers And Industrial Engineering</i>	3
<i>Journal Of Cleaner Production</i>	3
<i>Applied Sciences (Switzerland)</i>	2
<i>Benchmarking</i>	2
<i>Computers In Industry</i>	2
<i>International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing Green Technology</i>	2
<i>International Journal Of Production Research</i>	2
<i>Procedia Manufacturing</i>	2
Total	33

Tabela 2 – Os 10 periódicos com maior número de publicações

4. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

A análise bibliométrica é o estudo quantitativo das informações contidas nos mais variados trabalhos (e.g. autores, títulos, resumos, dentre outras) (Broadus, 1987). Existem inúmeros *softwares* de análise bibliométrica como BibExcel, Pajek, CiteSpace, VOSviewer e Publish or Perish. O programa adotado nessa revisão foi o VOSviewer versão 1.6.11, que elabora grandes mapas bibliométricos de fácil visualização e interpretação (van Eck & Waltman, 2010).

4.1 Autores mais relevantes

A Tabela 3 destaca os 11 autores com as maiores quantidades de publicações. Ao todo, 171 autores foram identificados nos 51 artigos da revisão sistemática. Beier, G., Müller, J. M., Niehoff, S. e Voigt, K. I. possuem três publicações, sendo estes os autores com o maior número de trabalhos realizados. Beier possui *h-index* igual a três na Scopus, é do *Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS)* e realiza pesquisas voltadas para inúmeras áreas como ciências ambientais, engenharia, negócios e gestão, assim como Müller, da *Facchochshule Salzburg* e com *h-index* igual a cinco, Niehoff, também do *Institute for Advanced Sustainability Studies (IASS)* e *h-index* igual a dois, e Voigt, da instituição *Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg* e *h-index* igual a 10. Juntos, os autores da Tabela 3 publicaram 26 artigos. É válido destacar a significativa contribuição dos autores brasileiros Jabbour, A. B. L de Souza e do autor Jabbour, C. J. C., ambos da *Montpellier Business School* e com *h-index* iguais a 22 e 30, respectivamente, e também, do pesquisador Godinho Filho, M., da Universidade Federal de São Carlos e com *h-index* igual a 17. Todos estes realizam pesquisas multidisciplinares também voltadas para os campos da engenharia, das ciências ambientais, dos negócios e da gestão.

AUTOR	QUANTIDADE DE PUBLICAÇÕES
Beier, G.	3
Müller, J. M.	3
Niehoff, S.	3
Voigt, K. I.	3
de Sousa Jabbour, A. B. L.	2
Godinho Filho, M.	2
Jabbour, C. J. C.	2

Jayakrishna, K.	2
Manavalan, E.	2
Singh, S. P.	2
Xue, B.	2
Total	26

Tabela 3 – Autores com a maior quantidade de publicações

4.2 Estatísticas das instituições dos autores

A Tabela 4 indica as 16 principais instituições que publicaram sobre a temática da sustentabilidade no conteúdo da Indústria 4.0. Ao todo, foram identificadas 96 afiliações. A *Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg*, a Universidade de São Paulo – USP e a *Chinese Academy of Sciences* possuem três publicações, sendo estas as instituições que mais contribuíram com o assunto estudado. É importante mencionar, além da Universidade de São Paulo, a Universidade Federal de São Carlos, que possui duas publicações sobre o assunto, sendo estas duas as instituições brasileiras que mais contribuíram com o contexto abordado nessa revisão sistemática. É possível perceber a participação de diversas instituições distribuídas ao redor do mundo, tanto em países desenvolvidos, quanto nos emergentes. As afiliações presentes na Tabela 4 foram responsáveis pela publicação de 35 artigos ao todo.

INSTITUIÇÃO	PAÍS	QUANTIDADE DE PUBLICAÇÕES
<i>Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg</i>	Alemanha	3
Universidade de São Paulo - USP	Brasil	3
<i>Chinese Academy of Sciences</i>	China	3
<i>Institute for Advanced Sustainability Studies IASS</i>	Alemanha	2
<i>Universiteit Stellenbosch</i>	África do Sul	2
<i>Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia</i>	Itália	2
<i>University College Dublin</i>	Irlanda	2
<i>Tecnologico de Monterrey</i>	México	2
<i>Fachhochschule Salzburg</i>	Áustria	2
<i>Vellore Institute of Technology</i>	Índia	2
Universidade Federal de São Carlos	Brasil	2
<i>University of Plymouth</i>	Reino Unido	2
<i>Shenyang Institute of Applied Ecology Chinese Academy of Sciences</i>	China	2
<i>Indian Institute of Technology Delhi</i>	Índia	2
<i>Kaunas University of Technology</i>	Lituânia	2
<i>Montpellier Business School</i>	França	2
Total		35

Tabela 4 – Instituições com os maiores números de publicações

4.3 Estatísticas dos títulos, dos resumos e das palavras-chave

A Tabela 5 agrupa os 18 termos mais recorrentes nos títulos e resumos dos artigos analisados. Dentre os 1741 termos identificados, a palavra com maior ocorrência foi *industry* com 148 aparições, seguido por *paper*, com 49 e *sustainability*, com 41 ocorrências. A Tabela 6 apresenta a contagem realizada para as palavras-chave. Foram encontradas 544 palavras-chave, com 13 destas sendo as mais recorrentes. A palavra-chave *Industry 4.0* possuiu a maior frequência, com 45 aparições, sucedida por *sustainability* com 25 e por *sustainable development*, com 21 ocorrências. Ao comparar os resultados apresentados pelas tabelas, é possível perceber uma consistência dos termos utilizados nos títulos, resumos e palavras-

chave. Por exemplo, as principais palavras de ambas as tabelas estão relacionadas com tecnologias empregadas na Indústria 4.0, com o próprio conceito da quarta revolução industrial, com os conceitos de sustentabilidade e com o tripé da sustentabilidade.

TERMO	FREQUÊNCIA
<i>Industry</i>	148
<i>Paper</i>	49
<i>Sustainability</i>	41
<i>Technology</i>	35
<i>Challenge</i>	29
<i>Study</i>	27
<i>Company</i>	26
<i>Thing</i>	20
<i>Internet</i>	18
<i>Implementation</i>	17
<i>Process</i>	17
<i>Circular Economy</i>	16
<i>Framework</i>	15
<i>Work</i>	14
<i>Opportunity</i>	13
<i>Product</i>	13
<i>Context</i>	13
<i>Analysis</i>	13

Tabela 5 – Os termos mais utilizados nos títulos e resumos

PALAVRA-CHAVE	FREQUÊNCIA
<i>Industry 4.0</i>	45
<i>Sustainability</i>	25
<i>Sustainable Development</i>	21
<i>Manufacturing</i>	11
<i>Internet Of Things</i>	11
<i>Manufacture</i>	7
<i>Circular Economy</i>	7
<i>Product Design</i>	6
<i>Industrial Revolutions</i>	6
<i>Decision Making</i>	5
<i>Internet</i>	5
<i>Embedded Systems</i>	5
<i>Sustainable Operations</i>	5

Tabela 6 – As palavras-chave mais recorrentes nos artigos

5. ANÁLISE DE REDES

Existem muitos programas que auxiliam nas análises de citação e de cocitação como Pajek, VOSviewer e Gephi. Assim como na seção anterior, foi utilizado o *software* VOSviewer versão 1.6.11 nas análises supracitadas devido à facilidade de visualização dos resultados obtidos.

5.1 Análise de citações

A análise de citações demonstra a quantidade de vezes que um trabalho ou um grupo de documentos foi citado ao longo do tempo na literatura, atestando a qualidade e a significância que determinados trabalhos possuem (MacRoberts & MacRoberts, 1996; Smith, 1981).

A Tabela 7 apresenta os 10 trabalhos mais citados na literatura relacionada à sustentabilidade e à Indústria 4.0. O artigo com o maior número de citações é o de Müller, Kiel e Voigt (2018), com 43 no total. Este artigo tratou da relevância da Indústria 4.0, mais especificamente, dos desafios e das oportunidades para a quarta revolução industrial no âmbito da sustentabilidade em diferentes organizações e setores. O artigo de Jabbour, Jabbour, Foropon e Godinho Filho

(2018) recebeu 36 citações, sendo o segundo mais referenciado. Este artigo propôs a integração entre a Indústria 4.0 e a produção ambientalmente sustentável para remodelar os atuais padrões de consumo e de produção. Os artigos de Jabbour, Jabbour, Godinho Filho e Roubaud (2018) e de Siemieniuch et al. (2015) são os mais citados posteriormente, com 30 citações recebidas. O primeiro elaborou um roteiro de aplicação dos princípios da economia circular nas abordagens da Indústria 4.0, enquanto que o segundo abordou o posicionamento da engenharia sustentável na conjuntura de transição para a Indústria 4.0.

AUTOR (ANO)	NÚMERO DE CITAÇÕES
Müller, Kiel e Voigt (2018)	46
de Sousa Jabbour, Jabbour, Foropon e Godinho Filho (2018)	36
de Sousa Jabbour, Jabbour, Godinho Filho e Roubaud (2018)	30
Siemieniuch, Sinclair e Henshaw (2015)	30
Waibel, Steenkamp, Moloko e Oosthuizen (2017)	23
Beier, Niehoff, Ziems e Xue (2017)	21
Luthra e Mangla (2018)	20
Müller e Voigt (2018)	16
Bressanelli, Adrodegari, Perona e Saccani (2018)	16
Lin, Shyu e Ding (2017)	15

Tabela 7 – Os 10 artigos mais citados

A Figura 3 ilustra a rede de citações gerada pelo VOSviewer. Foram incluídos 25 artigos na rede, o que gerou sete *clusters* (representados pelas diferentes cores na figura) e 43 ligações entre os mesmos. O artigo de Bonilla, Silva, da Silva, Gonçalves e Sacomano (2018) é o que possui o maior número de ligações na rede, totalizando nove *links*, o que indica que este trabalho citou nove artigos que fazem parte dos 51 que foram analisados ao longo desta revisão. O referido trabalho discutiu o impacto do desenvolvimento, das operações e das tecnologias, da integração e da conformidade da Indústria 4.0 nos objetivos de desenvolvimento sustentável, a longo prazo. O segundo artigo com maior quantidade de ligações é o de Waibel, Steenkamp, Moloko e Oosthuizen (2017), com oito *links*, cujo objetivo do trabalho consistiu em avaliar os elementos técnicos, ambientais, sociais e econômicos de possíveis inovações inteligentes no contexto da eficiência de recursos.

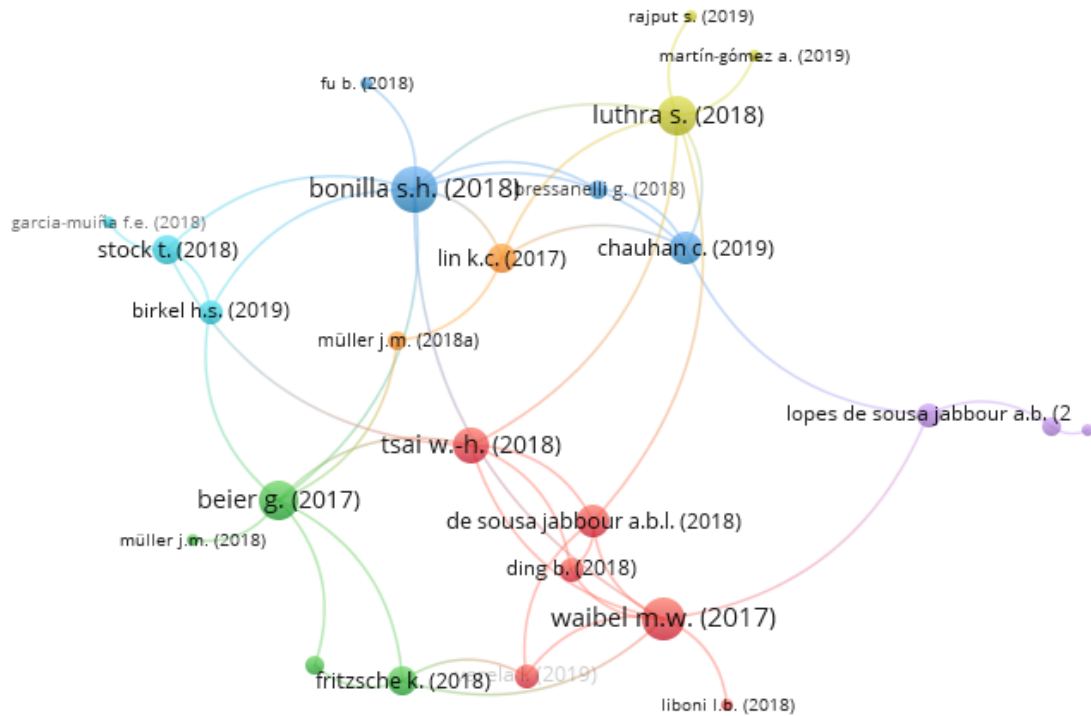


Figura 3 – Rede de citações

5.2 Análise de cocitações

A análise de cocitação mensura a quantidade de artigos que fizeram citações de qualquer par de documentos. Então, essa técnica é empregada em diversos estudos para mapeamento científico e esta consiste em duas etapas: na primeira, o *cluster* de cocitação é formado, ou seja, ocorre o agrupamento dos documentos em uma rede; e em seguida, ocorre a análise de cocitação propriamente dita, que é o diagnóstico dos resultados obtidos na etapa anterior (Boyack & Klavans, 2010).

A Figura 4 apresenta a rede de cocitações gerada pelo mesmo *software* utilizado anteriormente. Foram identificadas 3.982 referências citadas pelos 51 artigos estudados, 3.234 destas compuseram a referida rede com 29 *clusters* e 245.116 ligações entre si. O trabalho mais citado foi o de Stock e Seliger (2016), com 20 citações. O artigo apresentou uma revisão do estado da arte da literatura sobre a Indústria 4.0, com base em práticas e trabalhos desenvolvidos recentemente, e em seguida, foi apresentada uma visão geral das diferentes oportunidades para a adoção da manufatura sustentável dentro do ambiente da quarta revolução industrial. É possível afirmar que essa foi a referência mais importante para os artigos estudados, visto que o segundo e o terceiro documentos mais citados foram referenciados somente cinco vezes.



Figura 4 – Rede de cocitações

6. CONCLUSÕES

O artigo apresentou uma revisão sistemática e uma análise bibliométrica acerca da sustentabilidade no contexto da Indústria 4.0. A revisão sistemática, aliada à análise bibliométrica, ajudou a identificar o panorama atual da literatura em relação à abordagem da sustentabilidade no ambiente da Indústria 4.0, além de apontar os trabalhos mais recentes publicados, estes podem ser utilizados na identificação das pesquisas mais relevantes já realizadas, e também, das potenciais referências cruciais para o entendimento do assunto estudado.

Foi possível averiguar que existem poucos estudos publicados que abordam a temática analisada. O tema é muito recente e emergente na literatura, apresentando rápidos crescimentos em quantidades de pesquisas realizadas dentro de um período de dois anos, o que indica um aumento no interesse de vários pesquisadores ao redor do mundo nessa temática. Desta forma, pode-se afirmar que a sustentabilidade é um tópico importante dentro da Indústria 4.0. Os trabalhos analisados apresentaram ideias, ferramentas, técnicas e tecnologias com o intuito de incorporar as dimensões da sustentabilidade nos mais variados contextos da Indústria 4.0 (e.g. gerenciamento da cadeia de suprimentos, manufatura digital e sustentável, dentre outros).

A revisão elaborada apresenta as seguintes limitações: o uso de uma única base de dados para a coleta das informações, neste caso, a Scopus; a seleção e análise de somente artigos científicos; a inclusão única de artigos elaborados na língua inglesa; e os critérios de seleção e de filtragem foram pautados no julgamento e na percepção dos autores, o que pode ter levado a não inclusão de algum artigo relevante para o estudo.

Como sugestões para futuras pesquisas, destacam-se: utilizar outras bases de dados além da Scopus; incluir outros tipos de trabalho na análise; verificar trabalhos elaborados em outros idiomas, especialmente em alemão, por ser o país de origem da quarta revolução industrial; se possível, discutir sobre os artigos selecionados com vários pesquisadores para assegurar a consistência e a qualidade dos dados a serem obtidos; e fazer uso de *softwares* mais complexos para enriquecer as análises efetuadas. Todas as sugestões apresentadas ajudam a aperfeiçoar os achados dessa revisão. Apesar das limitações apresentadas, o artigo contribuiu

com a literatura destacando o amplo escopo de atuação que o tema possibilita aos pesquisadores.

REFERÊNCIAS

- Adams, R., Jeanrenaud, S., Bessant, J., Denyer, D., & Overy, P. (2016). Sustainability-oriented Innovation : A Systematic Review. *International Journal of Management Reviews*, 18, 180–205. <https://doi.org/10.1111/ijmr.12068>
- Ardanza, A., Moreno, A., Segura, Á., de la Cruz, M., & Aguinaga, D. (2019). Sustainable and flexible industrial human machine interfaces to support adaptable applications in the Industry 4.0 paradigm. *International Journal of Production Research*, 57(12), 4045–4059. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1572932>
- Bányai, T., Tamás, P., Illés, B., Stankevičiūtė, Ž., & Bányai, Á. (2019). 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*, 16(4), 634. <https://doi.org/10.3390/ijerph16040634>
- Beier, G., Niehoff, S., & Xue, B. (2018). More Sustainability in Industry through Industrial Internet of Things? *Applied Sciences*, 8(2), 219. <https://doi.org/10.3390/app8020219>
- Beier, G., Niehoff, S., Ziems, T., & Xue, B. (2017). Sustainability aspects of a digitalized industry – A comparative study from China and Germany. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 4(2), 227–234. <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0028-8>
- Bhagawati, M. T., Manavalan, E., Jayakrishna, K., & Venkumar, P. (2019). *Identifying Key Success Factors of Sustainability in Supply Chain Management for Industry 4.0 Using DEMATEL Method*. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2490-1>
- Birkel, H. S., Veile, J. W., Müller, J. M., Hartmann, E., & Voigt, K. I. (2019). Development of a risk framework for Industry 4.0 in the context of sustainability for established manufacturers. *Sustainability (Switzerland)*, 11(2), 1–27. <https://doi.org/10.3390/su11020384>
- Bonilla, S. H., Silva, H. R. O., da Silva, M. T., Gonçalves, R. F., & Sacomano, J. B. (2018). Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. *Sustainability (Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/su10103740>
- Boyack, K. W., & Klavans, R. (2010). Co-Citation Analysis , Bibliographic Coupling , and Direct Citation : Which Citation Approach Represents the Research Front Most Accurately? *JOURNAL OF THE AMERICAN SOCIETY FOR INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 61(12), 2389–2404. <https://doi.org/10.1002/asi>
- Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M., & Saccani, N. (2018). Exploring how usage-focused business models enable circular economy through digital technologies. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/su10030639>
- Broadus, R. N. (1987). Toward a definition of “bibliometrics.” *Scientometrics*, 12(5–6), 373–379. <https://doi.org/10.1007/BF02016680>
- Byrne, G., Dimitrov, D., Monostori, L., Teti, R., van Houten, F., & Wertheim, R. (2018). Biologicalisation: Biological transformation in manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 21, 1–32. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.03.003>
- Chauhan, C., Sharma, A., & Singh, A. (2019). A SAP-LAP linkages framework for integrating Industry 4.0 and circular economy. *Benchmarking: An International Journal*. <https://doi.org/10.1108/BIJ-10-2018-0310>
- de Sousa Jabbour, A. B. L., Jabbour, C. J. C., Foropon, C., & Godinho Filho, M. (2018). When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.017>

- de Sousa Jabbour, A. B. L., Jabbour, C. J. C., Godinho Filho, M., & Roubaud, D. (2018). Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. *Annals of Operations Research*, 270(1–2), 273–286. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2772-8>
- Ding, B. (2018). Pharma Industry 4.0: Literature review and research opportunities in sustainable pharmaceutical supply chains. *Process Safety and Environmental Protection*, 119, 115–130. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.031>
- Fahimnia, B., Sarkis, J., & Davarzani, H. (2015). Green supply chain management: A review and bibliometric analysis. *International Journal of Production Economics*, 162, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.01.003>
- Falagas, M. E., Pitsouni, E. I., Malietzis, G. A., & Pappas, G. (2007). Comparison of PubMed, Scopus, Web of Science, and Google Scholar: strengths and weaknesses. *The FASEB Journal*, 22(2), 338–342. <https://doi.org/10.1096/fj.07-9492lsf>
- Franciosi, C., Iung, B., Miranda, S., & Riemma, S. (2018). Maintenance for Sustainability in the Industry 4.0 context: a Scoping Literature Review. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 903–908. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.459>
- Fritzsche, K., Niehoff, S., & Beier, G. (2018). Industry 4.0 and climate change-exploring the science-policy gap. *Sustainability (Switzerland)*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/su10124511>
- Fu, B., Shu, Z., & Liu, X. (2018). Blockchain enhanced emission trading framework in fashion apparel manufacturing industry. *Sustainability (Switzerland)*, 10(4), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su10041105>
- García-Muñina, F., González-Sánchez, R., Ferrari, A., & Settembre-Blundo, D. (2018). The Paradigms of Industry 4.0 and Circular Economy as Enabling Drivers for the Competitiveness of Businesses and Territories: The Case of an Italian Ceramic Tiles Manufacturing Company. *Social Sciences*, 7(12), 255. <https://doi.org/10.3390/socsci7120255>
- Garrido-Hidalgo, C., Hortelano, D., Roda-Sanchez, L., Olivares, T., Ruiz, M. C., & Lopez, V. (2018). IoT Heterogeneous Mesh Network Deployment for Human-in-the-Loop Challenges Towards a Social and Sustainable Industry 4.0. *IEEE Access*, 6, 28417–28437. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2836677>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Ghadimi, P., Wang, C., Lim, M. K., & Heavey, C. (2019). Intelligent sustainable supplier selection using multi-agent technology: Theory and application for Industry 4.0 supply chains. *Computers and Industrial Engineering*, 127(September 2018), 588–600. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.050>
- Glavič, P., & Lukman, R. (2007). Review of sustainability terms and their definitions. *Journal of Cleaner Production*, 15(18), 1875–1885. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.12.006>
- Gružauskas, V., Baskutis, S., & Navickas, V. (2018). Minimizing the trade-off between sustainability and cost effective performance by using autonomous vehicles. *Journal of Cleaner Production*, 184, 709–717. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.302>
- Gu, F., Guo, J., Hall, P., & Gu, X. (2019). An integrated architecture for implementing extended producer responsibility in the context of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 57(5), 1458–1477. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1489161>
- Gupta, A., & Basu, B. (2019). Sustainable Primary Aluminium Production: Technology Status and Future Opportunities. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. <https://doi.org/10.1007/s12666-019-01699-9>
- Habanik, J., Grecikova, A., & Krajco, K. (2019). The impact of new technology on sustainable development. *Engineering Economics*, 30(1), 41–49. <https://doi.org/10.5755/j01.ee.30.1.20776>
- Heinberg, R. (2010). What Is Sustainability? In *The Post Carbon Reader: Managing the 21st Century's*

Sustainability Crises (pp. 1–9).

- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 3928–3937. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
- Jensen, J. P., & Remmen, A. (2017). Enabling Circular Economy Through Product Stewardship. *Procedia Manufacturing*, 8(October 2016), 377–384. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.048>
- Kohtamäki, M., Parida, V., Oghazi, P., Gebauer, H., & Baines, T. (2019). Digital servitization business models in ecosystems: A theory of the firm. *Journal of Business Research*, (xxxx), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.06.027>
- Kuhlman, T., & Farrington, J. (2010). What is sustainability? *Sustainability*, 2(11), 3436–3448. <https://doi.org/10.3390/su2113436>
- Kumar, R., Singh, S. P., & Lamba, K. (2018). Sustainable robust layout using Big Data approach: A key towards industry 4.0. *Journal of Cleaner Production*, 204, 643–659. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.327>
- Lasi, H., Kemper, H.-G., Fettke, P., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. [https://doi.org/DOI 10.1007/s12599-014-0334-4](https://doi.org/DOI%2010.1007/s12599-014-0334-4) The
- Liboni, L. B., Liboni, L. H. B., & Cezarino, L. O. (2018). Electric utility 4.0: Trends and challenges towards process safety and environmental protection. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 593–605. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.027>
- Lin, K. C., Shyu, J. Z., & Ding, K. (2017). A cross-strait comparison of innovation policy under industry 4.0 and sustainability development transition. *Sustainability (Switzerland)*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/su9050786>
- Luthra, S., & Mangla, S. K. (2018). Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.018>
- MacRoberts, M. H., & MacRoberts, B. R. (1996). Problems of Citation Analysis. *Scientometrics*, 36(3), 435–444.
- Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2019). A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers and Industrial Engineering*, 127, 925–953. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.030>
- Martín-Gómez, A., Aguayo-González, F., & Luque, A. (2019). A holonic framework for managing the sustainable supply chain in emerging economies with smart connected metabolism. *Resources, Conservation and Recycling*, 141(November 2018), 219–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.035>
- Martínez-Olvera, C., & Mora-Vargas, J. (2019). A comprehensive framework for the analysis of Industry 4.0 value domains. *Sustainability (Switzerland)*, 11(10), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su11102960>
- Miranda, J., Ponce, P., Molina, A., & Wright, P. (2019). Sensing, smart and sustainable technologies for Agri-Food 4.0. *Computers in Industry*, 108, 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.02.002>
- Müller, J. M., & Voigt, K. I. (2018). 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*, 5(5), 659–670. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0056-z>
- Müller, J. M., Kiel, D., & Voigt, K. I. (2018). What drives the implementation of Industry 4.0? The role of opportunities and challenges in the context of sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/su10010247>
- Murmura, F., & Bravi, L. (2017). Additive manufacturing in the wood-furniture sector. *Journal of Manufacturing Technology Management*. <https://doi.org/10.1108/jmtm-08-2017-0175>

- Okorie, O., Salonitis, K., Charnley, F., Moreno, M., Turner, C., & Tiwari, A. (2018). Digitisation and the circular economy: A review of current research and future trends. *Energies*, *11*(11), 1–31. <https://doi.org/10.3390/en11113009>
- Pinzone, M., Albè, F., Orlandelli, D., Barletta, I., Berlin, C., Johansson, B., & Taisch, M. (2019). A framework for operative and social sustainability functionalities in Human-Centric Cyber-Physical Production Systems. *Computers and Industrial Engineering*, (xxxx), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.03.028>
- Rajput, S., & Singh, S. P. (2019). Industry 4.0 – challenges to implement circular economy. *Benchmarking*. <https://doi.org/10.1108/BIJ-12-2018-0430>
- Santos, J., Muñoz-Villamizar, A., Ormazábal, M., & Viles, E. (2019). Using problem-oriented monitoring to simultaneously improve productivity and environmental performance in manufacturing companies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *32*(2), 183–193. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1552796>
- Scharl, S., & Praktiknjo, A. (2019). The Role of a Digital Industry 4.0 in a Renewable Energy System. *International Journal of Energy Research*, *43*(8), 3891–3904. <https://doi.org/10.1002/er.4462>
- Siemieniuch, C. E., Sinclair, M. A., & Henshaw, M. J. C. (2015). Global drivers, sustainable manufacturing and systems ergonomics. *Applied Ergonomics*, *51*, 104–119. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.04.018>
- Smith, L. C. (1981). Citation analysis. *Library Trends*.
- Stock, T., & Seliger, G. (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, *40*, 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- Stock, T., Obenaus, M., Kunz, S., & Kohl, H. (2018). Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. *Process Safety and Environmental Protection*, *118*, 254–267. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.026>
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. *British Journal of Management*, *14*, 207–222.
- Tsai, W. H., & Lu, Y. H. (2018). A framework of production planning and control with carbon tax under industry 4.0. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(9). <https://doi.org/10.3390/su10093221>
- Tumelero, C., Sbragia, R., & Evans, S. (2019). Cooperation in R & D and eco-innovations: The role in companies' socioeconomic performance. *Journal of Cleaner Production*, *207*, 1138–1149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.146>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, *84*(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Varela, L., Araújo, A., Ávila, P., Castro, H., & Putnik, G. (2019). Evaluation of the relation between lean manufacturing, industry 4.0, and sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(5), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su11051439>
- Waibel, M. W., Steenkamp, L. P., Moloko, N., & Oosthuizen, G. A. (2017). Investigating the Effects of Smart Production Systems on Sustainability Elements. *Procedia Manufacturing*, *8*(October 2016), 731–737. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.094>
- Yang, S., M. R., A., Kaminski, J., & Pepin, H. (2018). Opportunities for Industry 4.0 to Support Remanufacturing. *Applied Sciences*, *8*(7), 1177. <https://doi.org/10.3390/app8071177>
- Yazdi, P. G., Azizi, A., & Hashemipour, M. (2018). An empirical investigation of the relationship between overall equipment efficiency (OEE) and manufacturing sustainability in industry 4.0 with time study approach. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(9). <https://doi.org/10.3390/su10093031>
- Zhao, G., Liu, S., Lopez, C., Lu, H., Elgueta, S., Chen, H., & Boshkoska, B. M. (2019). Blockchain technology in agri-food value chain management: A synthesis of applications, challenges and future research

directions. *Computers in Industry*, 109, 83–99. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.04.002>