Research, Society and Development, v. 11, n. 7, e9511729687, 2022
(CC BY 4.0) | ISSN 2525-3409 | DOI: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i7.29687

Análise da integração da indústria 4.0 e economia circular para consolidação do conceito da remanufatura 4.0: um estudo bibliométrico

Analysis of the integration of industry 4.0 and circular economy to consolidate the concept of remanufacturing 4.0: a bibliometric study

Análisis de la integración de la industria 4.0 y la economía circular para consolidar el concepto de remanufactura 4.0: un estudio bibliométrico

Recebido: 27/04/2022 | Revisado: 03/05/2022 | Aceito: 12/05/2022 | Publicado: 16/05/2022

Alexandre Fernando Coutinho da Silva
ORCID: https:// orcid.org/0000-0002-0172-812X
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail alexandrecoutinho@id.uff.br
Anderson de Oliveira Ribeiro
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3460-4374
Centro Universitário Geral Di Biase, Brasil
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail: andersonribeiro@ugb.edu.br
Bruna Sacramento de Souza Cruz
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9600-9434
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail: brunasacramento@id.uff.br
Caique Pereira de Almeida
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3196-4307
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail: caiquepereira@id.uff.br
Kelly Alonso Costa
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7018-5982
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail: kellyalonso@id.uff.br
Francisco Santos Sabbadini
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7018-5982
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil
Universidade Federal Fluminense, Brasil
E-mail: franciscosabbadini@gmail.com

Resumo
Indústria 4.0 e Economia Circular são temas emergentes que vêm ganhando o interesse profundo no meio acadêmico. Trata-se de dois campos de pesquisa independentes, que quando pesquisados em conjunto podem ser considerados interligados contribuindo para facilitar o entendimento de que a indústria 4.0 e economia circular podem ser trabalhados juntos. O estudo apresentado neste artigo descreve a evolução das publicações científicas e traça o perfil bibliométrico encontrado na literatura. O método de pesquisa foi o estudo bibliométrico com a finalidade de reconhecer quais são as ações e estratégias mais latentes no estudo por meio da integração das palavras-chaves que relacionam a remanufatura com a indústria 4.0 e/ou economia circular. Foi utilizado o software VOSviewer para agrupamento e agrupamento hierárquico de palavras-chave e áreas. Os resultados deste artigo demostram o aumento do número de publicações que interrelacional a Remanufatura e Indústria 4.0, entre 2019 e 2021 houve um crescimento de 66,6% e que as principais ferramentas da Indústria 4.0 na construção de uma Remanufatura 4.0 são: Internet of Things, Big Data e Additive Manufacturing.
Palavras-chave: Remanufatura; Remanufatura 4.0; Indústria 4.0; Economia circular.

Abstract
Industry 4.0 and Circular Economy are emerging topics that have been gaining deep interest in the academic world. These are two independent fields of research, which when researched together can be considered interconnected, contributing to facilitate the understanding that industry 4.0 and circular economy can be worked together. The study presented in this article describes the evolution of scientific publications and traces the bibliometric profile found in the literature. The research method was the bibliometric study in order to recognize which are the most latent actions and strategies in the study through the integration of keywords that relate remanufacturing with industry 4.0 and/or circular economy. The VOSviewer software was used for grouping and hierarchical grouping of keywords and areas.

The results of this article show the increase in the number of publications that interrelate Remanufacturing and Industry 4.0, between 2019 and 2021 there was a growth of 66.6% and that the main tools of Industry 4.0 in building a Remanufacturing 4.0 are: Internet of Things, Big Data and Additive Manufacturing.
Keywords: Remanufacturing; Remanufacturing 4.0; Industry 4.0; Circular economy.

Resumen
La Industria 4.0 y la Economía Circular son temas emergentes que han ganado mucho interés en el mundo académico. Se trata de dos campos de investigación independientes, que cuando se investigan juntos pueden considerarse interconectados, contribuyendo a facilitar la comprensión de que la industria 4.0 y la economía circular pueden trabajar juntas. El estudio presentado en este artículo describe la evolución de las publicaciones científicas y traza el perfil bibliométrico encontrado en la literatura. El método de investigación fue el estudio bibliométrico con el fin de reconocer cuáles son las acciones y estrategias más latentes en el estudio a través de la integración de palabras clave que relacionan la remanufactura con la industria 4.0 y/o economía circular. Se utilizó el software VOSviewer para la agrupación y agrupación jerárquica de palabras clave y áreas. Los resultados de este artículo muestran el incremento en el número de publicaciones que interrelacionan Remanufactura e Industria 4.0, entre 2019 y 2021 hubo un crecimiento del 66.6% y que las principales herramientas de la Industria 4.0 en la construcción de una Remanufactura 4.0 son: Internet de las Cosas, Big Data y Fabricación Aditiva.
Palabras clave: Remanufactura; Refabricación 4.0; Industria 4.0; Economía circular.

1. Introdução

Por meio da manufatura, nossa sociedade transforma matéria prima em bens de consumo e cria os produtos necessários para a satisfação do desejo e necessidades para um melhor bem-estar. A manufatura de matérias primas renováveis e não renováveis, consome quantidades substanciais de energia e libera emissões de poluentes no meio ambiente gerando impacto em todo ecossistema. O processo de transformação de materiais sofre grande evolução devido ao avanço tecnológico e a mudança na demanda dos consumidores. Muitos desafios estão sendo apresentados no campo da manufatura dentro do paradigma da Indústria 4.0 (I40), um destes desafios é a mudança da produção em massa para uma produção de customização em massa e a transformação de um sistema linear de produção para um sistema circular de produção.

O modelo de Economia Circular (EC) surge em substituição ao modelo de Economia Linear (EL), o qual se baseia na extração, produção e descarte. Visto que os recursos disponíveis são finitos, a EC é uma alternativa para um desenvolvimento sustentável pois se baseia em eliminar resíduos e poluição desde o início da cadeia produtiva, busca manter os materiais em uso e realizar a regeneração do sistema (Ellen MacArthur, 2013).

Este conceito vem sendo amplamente difundido entre as nações, principalmente na Europa, o qual faz parte da estratégia da comissão Europeia. "Uma economia circular visa manter o valor dos produtos, materiais e recursos pelo maior tempo possível, devolvendo-os ao ciclo do produto no final da sua utilização, ao mesmo tempo que minimiza a geração de resíduos. Quanto menos produtos descartamos, menos materiais extraímos, melhor para o nosso meio ambiente" (BRESSANELLI, Gianmarco et al, 2020). Além do benefício ecológico, segundo GUERRA, Beatriz C. et al (2021), a EC, permitiria a Europa aumentar a produtividade dos seus recursos 3% ao ano, o que representa um ganho de 0,6 trilhões de euros até 2030, e mais 1,2 trilhão em benefícios não relacionados a recursos e externalidades.

Dentro do modelo de economia circular estão os princípios reduzir, reutilizar e reciclar, porém eles não são suficientes para diminuir o impacto causado na absorção dos recursos naturais, a escala de produção tem sido muito maior que a capacidade de reciclagem dos materiais. Adicionou-se então a remanufatura ao conceito de EC (Morseletto, 2020). A Remanufatura é definida como a regeneração industrial de produtos (H.-J. Bullinger, 2009), tornado possível sua reutilização. Steinhilper (1999) afirma que produtos remanufaturados têm qualidade igual ou superior aos produtos novos. Diferentemente da reciclagem que consome muita energia e preserva somente o valor material do produto, a Remanufatura mantém a maior parte do valor agregado do bem, dando-lhe uma segunda vida útil, adicionando etapa do processo produtivo (Bernard, Sophie, 2011).

De forma a suportar a implantação do modelo circular e seus princípios de sustentabilidade os governos e indústrias

devem utilizar a inovação como fator chave de sucesso. Silvestre, 2019. O contexto da Industria 4.0 (I4.0) pode impulsionar o desenvolvimento da EC e seus princípios (Tet e al, 2020).

A I40 integra um sistema de comunicação entre os equipamentos e produtos de uma fábrica inteligente conectada, a CSF. Essa CSF é capaz de monitorar e controlar os processos de forma hiperconectada, evita desperdícios de matérias-primas e energia, agrega valor aos produtos e serviços (PARK, Sungbum, 2016).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é verificar a utilização das ferramentas da I40 como inteligência artificial, computação em nuvem, big data, internet das coisas, sistemas cyber-físicos e manufatura aditiva, entre outros que podem ser utilizadas na remanufatura de produtos no âmbito da EC. A partir de uma análise bibliométrica, pretende-se obter as informações de como está sendo construído o conceito da Remanufatura 4.0, seus principais pesquisadores, o avanço ao longo do tempo, os hot topics que estão se desenvolvendo na área e os principais países de atuação. Será feita uma análise do conteúdo das pesquisas de maior relevância no assunto.

A estrutura de desenvolvimento deste artigo é composta de 5 seções. A primeira aborda a introdução do tema pesquisado. A segunda seção apresenta a revisão teórica respeito da Remanufatura e I40. A seção três traz a metodologia utilizada. A quarta seção mostra a análise dos resultados obtidos e a quinta e última, a conclusão e sugestão de pesquisas futuras.

2. Referencial teórico

2.1 Remanufatura

Segundo Gray e Charter (2006), a remanufatura teve início na primeira guerra mundial, em que os tanques utilizados foram remanufaturados e posteriormente utilizados na segunda guerra mundial. Conforme descrevem Bakshi e Fiksel (2003), a remanufatura pode ser considerada como o modelo de negócios que engloba todos os aspectos de sustentabilidade. Remanufaturar é recuperar um produto descartado, quebrado ou usado às suas especificações originais por meio de processamento industrial, promovendo o reuso de materiais e melhorando sua qualidade e funcionalidade (Bouzon, 2010).

Segundo Östlin et al., (2009) o principal motivador é o retorno econômico, uma vez que os custos com matéria-prima são reduzidos, além da possibilidade de alcançar novos mercados e melhorar a imagem corporativa da empresa. Para Giuntini e Gaudette (2003), do ponto de vista ambiental, destacam-se a diminuição do uso de recursos naturais, redução de emissões ao meio ambiente, reaproveitamento de materiais usados, extensão do ciclo de vida dos produtos ou de seus componentes e minimização na geração de resíduos.

2.2 Indústria 4.0

O termo I40, também conhecido como quarta revolução industrial, manufatura inteligente, indústria da internet ou indústria integrada (Hofmann et al., 2017) surgiu a partir de iniciativas estratégicas do governo da Alemanha para consolidar o país como líder na área de tecnologia e fortalecer sua competitividade global (Kagermann et al., 2013).

O termo foi descrito por Kagermann et al. (2013) como “uma realidade em que as redes globais são estabelecidas pelas empresas sob a forma de Sistemas Físico-Cibernéticos (CPS – Cyber-Physical Systems) que incorporam máquinas, sistemas de armazenagem e instalações de produção que são capazes de trocar informação e cooperar de forma autônoma através da Internet das Coisas (IoT - Internet of Things) desencadeando ações e controlando uns aos outros de forma independente”

2.3 Economia Circular

Pearce e Turner (1990) afirmam que o termo EC foi usado pela primeira vez na literatura ocidental na década de 1980,

para descrever um sistema fechado de interações economia-ambiente. O conceito é originário da teoria e do pensamento do desenvolvimento ecoindustrial, baseado na filosofia do "ganho-ganho" de que uma economia saudável e a saúde ambiental podem coexistir (Geng et al., 2011).

O modelo circular propõe fechar o ciclo (Extrair, transformar, produzir, utilizar e descartar) repensando práticas econômicas e sociais de modo a aproximar o funcionamento do sistema econômico a forma como a natureza executa seus processos. O modelo é capaz de reduzir drasticamente a quantidade de novos recursos necessários para a produção assim como a quantidade de resíduos descartados, mas para isso é necessário estabelecer novas relações sociais (Ellen Macarthur Foundation, 2012).

3. Metodologia

Para uma identificação da utilização das ferramentas da I40 na construção do conceito de Remanufatura 4.0 (Butzer, Steffen et al, 2016) foi realizada uma revisão sistemática da literatura como implementada por Rosa et al., 2020 e Dantas et al, 2021. Esta revisão da literatura permitirá a delimitação da estrutura existente de publicações científicas que suportam a construção do conceito Remanufatura 4.0. E este tipo de estudo fornece uma visão geral da relação e evolução dos tópicos ajudando no desenvolvimento da teoria de uma área científica específica.

3.1 Escopo do tópico

Para a realização do objetivo desta pesquisa foram considerados apenas artigos revisados por pares e publicados em língua inglesa. O intervalo de tempo para a busca dos artigos foi de 2016 até 2021 este o limite inferior se deu pelo fato do termo Remanufatura 4.0 surgir no trabalho de (Butzer, Steffen et al, 2016). Foram utilizadas as bases de dados Scopus e Web of Science por sua abrangência e relevância neste campo de pesquisa e por suas metodologias de inclusão de periódicos e seleção dos será explicitada nas próximas sessões.

3.2 Definição da amostra

O primeiro passo foi realizar uma busca preliminar por palavras-chave que correlaciona a Remanufatura com a I40 ou EC. A lógica utilizada na busca foi: ("remanufacturing 4.0"OR"remanufacturing") AND ("industry 4.0 " OR "smart manufacturing" OR "industrie 4.0 "OR "circular economy"). Desta busca foram eliminados os artigos duplicados usando o programa Zotero V5.0 (Nuraini, Maftukhah Wening, 2020) que resultou em 391 artigos. As palavras chaves destes artigos foram extraída, somando um total de 1635 palavras chaves, e uma análise de frequência através do programa VOSviewer (Van Eck, N.J.; Waltman, L., 2011) permitiu determina quais palavras-chave representam cada uma das áreas: remanufatura ("remanufacture" or "remanufactured products" or "remanufacturing" or "smart remanufacturing"); economia circular ("circular business models" or "circular design" or "circular economy" or "smart circular economy") ; Industria 4.0 ("industry 4.0" OR "industrie 4.0" OR "internet of things" OR "iot" OR "smart manufacturing" OR "smart industry")

O segundo passo foi realizar uma busca da interseção das áreas Remanufatura, EC e I40 a partir da abordagem adotada para as palavras-chave: ("remanufacture" or "remanufactured products" or "remanufacturing" or "smart remanufacturing") AND ("circular business models" or "circular design" or "circular economy" or "smart circular economy") AND ("industry 4.0" OR "industrie 4.0" OR "internet of things" OR "iot" OR "smart manufacturing" OR "smart industry. Como feito no passo um foi eliminado os artigos duplicados e obtivemos uma base bibliográfica de 39 artigos.

3.3 Análise dos dados

Uma vez identificados todos os artigos, estes foram coletados e gerenciados por meio do software Zotero V5.0. As

publicações foram então transferidas para planilhas e organizadas a partir dos critérios selecionados para posterior extração dos resultados e análise de conteúdo. Foi realizada a leitura do título, resumo, introdução, resultados e conclusão de todos os artigos para a identificação das questões: tecnologias que estão utilizadas na Remanufatura? Setores que estão trabalhando com Remanufatura? Desafios e oportunidades da Remanufatura? Quais locais publicam mais artigos? As publicações foram divididas em quatro grupos: artigos de revisão, estudo de caso, desenvolvimento der práticas e metodologias e estudo misto. Estudos mistos são aqueles que combinam dois ou mais tipos de análise mencionados anteriormente.

Utilizamos o software VOSviewer no apoio na análise bibliométricas e na busca da estrutura de análise de citação, co-citação, acoplamento bibliográfico e análise de coautoria dos 39 artigos selecionados. O VOSviewer é uma ferramenta gratuita para o tratamento de dados bibliométricos, sua funcionalidade de mineração de texto permite a criação de "mapa de termos" e estes fornecem uma visão geral das interrelações dos conteúdos dos artigos de como eles se relacionam entre si. Quanto maior for a ocorrência de um termo no título, palavras-chave e/ou resumo, mais significativo é o termo a ser exibido e isto é apresentado em um mapa bidimensional no qual os termos estão localizados de tal forma que a distância entre dois termos indica a relação dos termos, quanto menor a distância entre dois termos, mais fortes sua interrelação os termos relacionados entre si.

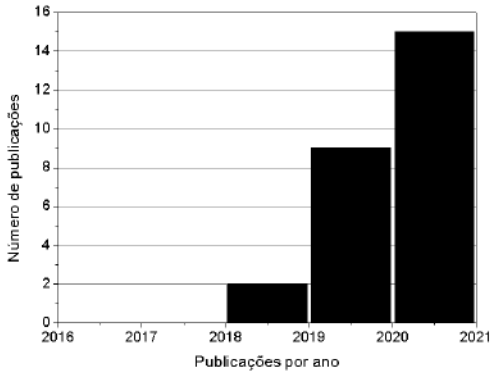
O VOSviewer tem três forma de visualização dos dados, este estudo utilizaremos use apenas a visualização da rede de correlações entre as palavras-chave. Na visualização da rede, cada item é representado por um rótulo, estes rótulos estão representados por círculo e o tamanho da apresentação do rótulo é determinado pelo, o peso do item é definido pelo número de ocorrência dos termos. A cor de um item é determinada pelo cluster ao qual o item pertence. As linhas entre os itens representam seus relacionamentos.

4. Resultados

As publicações relacionando os temas economia circular e a indústria 4.0 vem crescendo em número a partir de 2018, como pode ser observado na figura 1, no ano de 2019 a quantidade de artigos publicados com os temas abordados, aumentaram em 350% em relação ao ano anterior, e em 2020 a evolução seguiu crescendo com uma de 66,6%. Tal fato, reforça a expectativa inicial sobre o crescimento da abordagem do tema. O resultado do processo de pesquisa em termos do número de trabalhos publicados por ano é mostrado na Figura 1.

A figura 2 mostra os países onde estão localizados os pesquisadores envolvidos nas publicações, esses que foram divididos em três blocos de acordo com a quantidade de publicações. O bloco 1 formado por confederações com mais de 10 publicações, o bloco 2 compreende entre 5 e 10 publicações e o bloco 3 menos de 5 publicações. O Reino Unido é o único local que se enquadra no bloco 1. Itália, China, Índia e África do Sul formam um segundo bloco de concentração. Esses dois blocos responderam por cerca de 60% do número total de trabalhos publicados, é importante observar que o segundo bloco é formado por países com alto índice de poluição ambiental. Vale ainda destacar o EUA, pois ocupa o terceiro bloco em quantidade de publicações e é apontado por muitas pesquisas como o país mais poluidor do planeta, por outro lado, a china também está entre os maiores poluidores e não performa em publicações apresenta tantas publicações. Uma possível explicação é a existência de um modelo de negócio ou atividades econômicas e estatais nos EUA que impulsionam o estudo e a implementação de processos de Remanufatura.

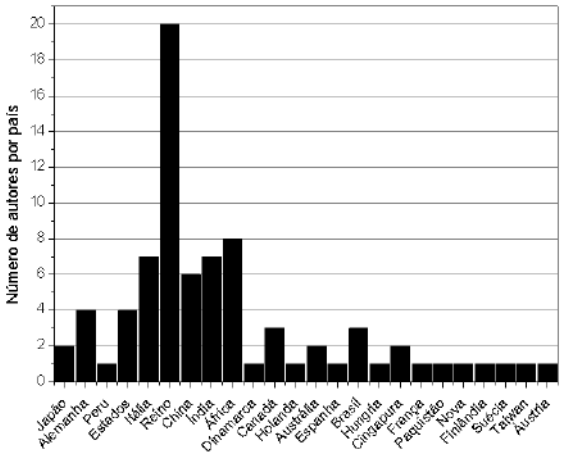
Figura 1 - Série histórica de artigos publicados, taxa média de crescimento de 6 artigos por ano.



Fonte: Autores.

Foram consideradas palavras com no mínimo duas ocorrências e a análise da frequência de ocorrência da amostra de 205 palavras-chave realizadas com o software VOSviewer resultou na formação de seis cluster (Figura 3), estes cluster representam o coocorrência das palavras-chave nos artigos de nossa amostra. Os clusters são agrupados: (a) cluster um (vermelho) é composto por 12 termos, big data, design, digital technologies, digitalization, economy, future, industry, products, remote monitoring technology, sustainable supply chain, system e servitization; (b) cluster dois (verde) tem 9 palavras e é composto por internet of things, optimization, product life-cycle, remanufacture, remanufacturing, reuse, simulation, sustainability e system; (c) cluster três (azul) composto por 9 palavras, estás palavras são big data analytics, firm performance, implementation, industry 4.0, pls-sem, reverse logistics, supply chain management, sustainable development e technologies; (d) cluster quatro (amarelo) tem 5 palavras, elas são circular economy, product service system, reverse supply chain, supply chain e sustainable manufacturing; (e) cluster cinco (roxo) e formado por 5 termos business models, challenges, climate-change, management e waste management; (f) cluster seis (azul claro) tem 3 palavras, ela são cyber-physical systems, smart products e smart remanufacturing.

Figura 2 – Distribuição das publicações por país: destaque para o Reino Unido como ampla participação no desenvolvimento da Remanufatura 4.0.

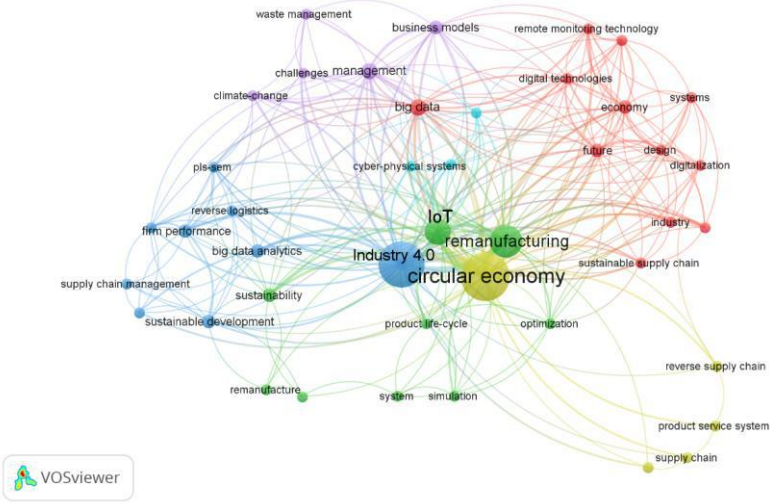


Fonte: Autores.

Os artigos selecionados apresentam quatro termos com preponderância como pode ser vista na Figura 3 “economia

circular", "indústria 4.0", "remanufatura" e "internet das coisas" respectivamente segundo sua importância. Os termos "remanufatura" e "internet das coisas" pertencem ao cluster dois e são os termos de maior frequência. Economia circular é o termo com maior frequência no cluster quatro e o cluster três apresenta maior ocorrência do termo indústria 4.0. Um ponto a se ressaltar na Figura 3 é que os quatros termos mais presentes mesmo estando muito próximos que é um indicativo de forte relação não apresentam conexões forte entre si.

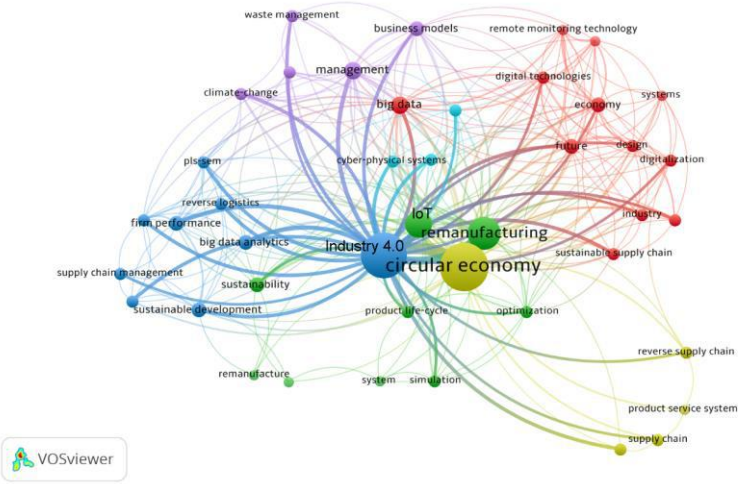
Figura 3 - Visualização de rede das palavras-chave de alta frequência associadas a " Economia Circular " (amarelo), "I40" (azul), "Remanufatura" (verde) e "IoT" (verde).



Fonte: Autores.

A Figura 4 destaca as palavras-chave associadas à EC. O termo EC está interrelacionado com todos os clusters e praticamente com todas as palavras-chave deles. Este resultado mostra que a EC é um campo do conhecimento unificador para a construção do conceito de Remanufatura 4.0.

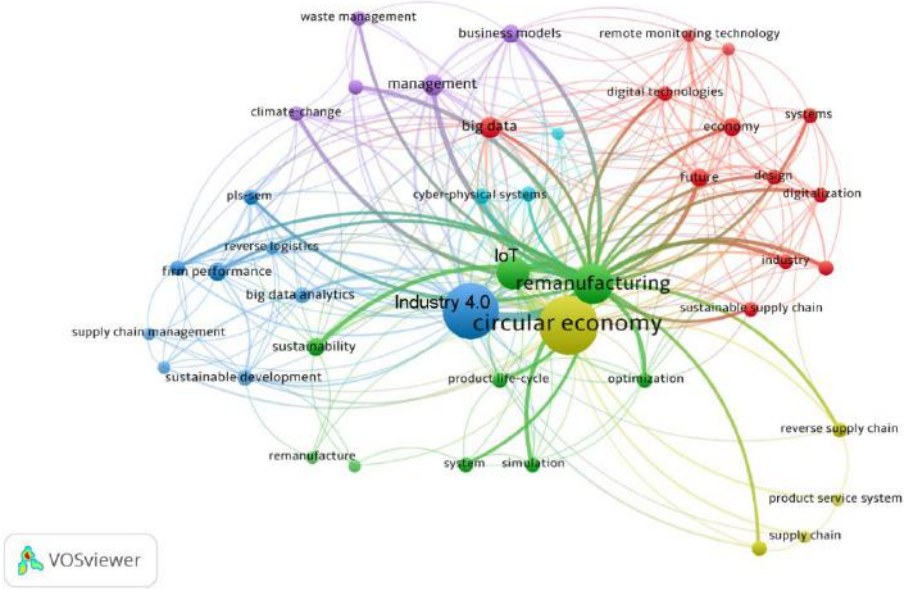
Figura 4 - Visualização da rede das palavras-chave associadas a "I40" em azul.



Fonte: Autores.

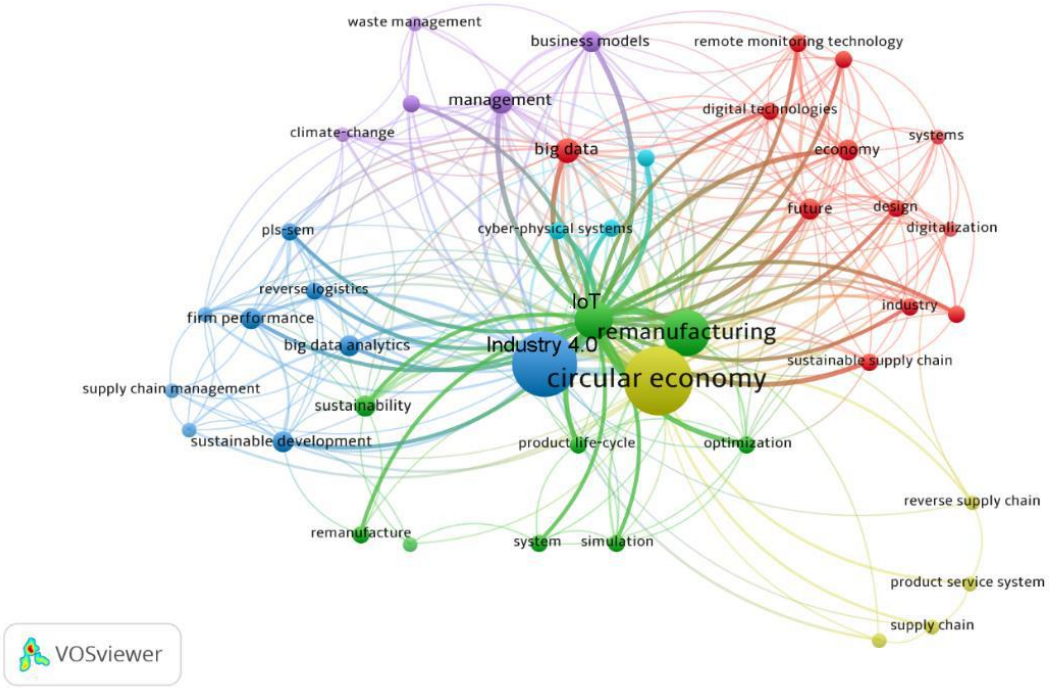
A Figura 5 e a Figura 6 exemplificam que os termos “remanufatura” e “internet das coisas” são complementares na formulação do conceito de remanufatura 4.0. Eles em sua maioria conectam palavras-chave em comum. E como pertencem ao mesmo cluster sua complementaridade pode ser a componente necessária para a consolidação do conceito.

Figura 5 - Visualização da rede das palavras-chave associadas a "Remanufatura" em verde.



Fonte: Autores.

Figura 6 - Visualização da rede das palavras-chave associadas a "IoT" em verde, pois os dois campos fazem parte do mesmo cluster.



Fonte: Autores.

Com foco em vincular a remanufatura com as ferramentas da indústria 4.0, é necessário identificar quais ferramentas fazem parte do contexto atual. A Tabela 2 relaciona as 39 publicações destacadas na revisão da literatura com as ferramentas abordadas. Vale ainda lembrar, que as pesquisas foram limitadas a conteúdos que tratam a EC e I40 em conjunto. A maioria das publicações abordam as ferramentas Internet of Things (59%), Big Data (26%) e Additive Manufacturing (21%). Em contrapartida, ferramentas muito conhecidas no âmbito industrial que apareceram em apenas uma publicação, como os casos da realidade virtual (Kerin & Pham, 2019) e gêmeos digitais (Tiwari et al., 2021). Na Tabela 1 podemos observar as ferramentas identificadas em nossa amostra.

Tabela 1: Ferramentas identificadas da I40 utilizadas na Remanufatura.

Sigla	Ferramenta	Sigla	Ferramenta
IoT	Internet das coisas	BD	*Big Data*
Cloud	Computação em nuvem	RFID	Identificação por Rádio Frequência
AM	Manufatura aditiva	BIM	Modelagem da Informação da construção
SI	Sensores Inteligentes	IMU	Unidades de medição inercial de baixa frequência
ROB	Robótica	NANO	Nanotecnologia
SIM	Simulação	CPPS	Sistemas Cyber-físicos
TW	Gêmeo digital	MD	Mineração de dados
RV	Realidade virtual	BC	*Blockchan*
RA	Realidade aumentada	DOS	Serviços operacionais
AI	Inteligência artificial	M2M	Comunicação máquina a máquina
DP	Digiprime		

Fonte: Autores.

A integração entre conceitos e tecnologias da indústria 4.0 e aspectos ambientais é uma tendência empresarial promissora e necessária para o desenvolvimento organizacional (Gobbo Júnior et al., 2018).

O Tabela 1, apresenta diversas ferramentas da I40 em que as empresas têm adotado para acompanhar a transformação dessa nova era, que está iniciando na manufatura, proporcionando os benefícios que as empresas podem obter com sua implementação em tempo real para otimizar o processo em seus sistemas de produção.

Para melhor direcionar a pesquisa, os artigos foram classificados de acordo com o seu foco principal, a maioria dos artigos (41%) são estudos de caso em setores industriais de manufatura e na sequência são as pesquisas com foco em revisões bibliográficas (26%), outros focos que apareceram na pesquisa foram estudos de caso na construção civil, supply chain, educação, setor de serviços e sustentabilidade. Conforme apresentado na Tabela 2, apenas quatro (25%) publicações não abordaram a ferramenta IoT na elaboração da pesquisa, fato esse que demonstra o domínio da tecnologia no cenário industrial, e principalmente quando se trata de companhias de manufatura.

Tabela 2: I40 tecnologias que suportam a Remanufatura 4.0.

Paper	IoT	Cloud	AM	SI	ROB	SIM	TW	RV	RA	AI	BD	RFID	BIM	IMU	NANO	CPPS	MD	BC	DOS	DP	M
(Inoue et al., 2020)	X																				
(Bal & Badurdeen, 2020)	X																				
(Spaltini et al., 2021)		X	X																		
(Tiwari et al., 2021)				X	X	X	X														
(Kerin & Pham, 2019)	X							X	X												
(Fofou et al., 2021)			X																		
(Manavalan & Jayakrishna, 2019)	X									X											
(Bag et al., 2021)											X										
(Kravchenko et al., 2020)			X																		
(Rizvi et al., 2021)	X										X	X									
(Delpla et al., n.d.)	X																				
(Ingemarsdotter et al., 2019)	X										X										
(Victor et al., 2020)	X											X									
(Xing et al., 2020)		X											X								
(Roda-Sanchez et al., 2021)	X													X							
(Cezarino et al., 2019)	X		X							X	X										
(Ramakrishna et al., 2020)	X									X					X						
(Pedone et al., 2020)																			X	X	
(Yang, 2019)																X					
(Bag et al., 2021)	X									X	X										
(Blömeke et al., 2020)											X					X	X				
(Subramoniam et al., 2021)	X									X											
(Galparoli et al., 2021)						X															
(Charnley et al., 2019)	X					X															
(Kerin & Pham, 2020)	X					X					X										
(Turner et al., 2019)	X				X						X										
(Tsai et al., 2021)											X										
(Zhang et al., 2018)	X																				
(Alcayaga et al., 2019)	X																				
(Bressanelli et al., 2020)	X	X									X										
(Bag et al., 2021)	X	X								X	X										
(Khan et al., 2021)																		X			
(Massaro et al., 2021)	X				X							X									
(Dev et al., 2020)	X	X										X				X					
(Bag et al., 2020)	X									X		X									
(Okorie et al., 2019)				X							X										
(Ghoreishi & Happonen, 2020)	X									X	X							X			
(Yang et al., 2018)		X	X	X	X							X									
(Bagalagel & ElMaraghy, 2020)		X							X			X					X				
(Nava C., 2020)																					

Fonte: Autores.

Além dos estudos de caso em setores industriais de manufatura, deve ser destacado a quantidade de revisões bibliográficas (10 publicações) encontradas no contexto dessa pesquisa. Dentro desse foco, como pode ser observado na Tabela 3, as ferramentas aparecem mais diluídas entre os artigos analisados, porém IoT (50%) ainda aparece como a ferramenta mais abordada e na sequência Additive Manufacturing (40%) se destaca dentro do foco de revisões bibliográficas.

Vale ainda destacar, que a ferramenta AM apareceu cinco vezes em toda a pesquisa e quatro (80%) delas estão concentradas dentro do campo de revisões bibliográficas.

Tabela 3: I40 tecnologias que suportam a Remanufatura 4.0 – Manufatura.

Paper	*IoT*	*Cloud*	*AM*	*ROB*	*SIM*	*RA*	*IA*	*BD*	*RFID*	*IMU*	*CPPS*	*MD*
(Inoue et al., 2020)	X											
(Bag et al., 2021)	X						X					
(Kravchenko et al., 2020)			X									
(Delpla et al., n.d.)	X											
(Ingemarsdotter et al., 2019)	X							X				
(Victor et al., 2020)	X								X			
(Roda-Sanchez et al., 2021)	X									X		
(Yang, 2019)											X	
(Bag et al., 2021)	X						X	X				
(Kerin & Pham, 2020)	X						X		X			
(Zhang et al., 2018)		X				X			X			X
(Bressanelli et al., 2020)								X			X	X
(Massaro et al., 2021)	X				X							
(Bag et al., 2020)	X			X				X				
(Ghoreishi & Happonen, 2020)	X											
(Bagalagel & ElMaraghy, 2020)	X	X						X				

Fonte: Autores.

A maioria das publicações abordam aplicação da ferramenta IoT na economia circular, com foco em potencializar o nível de informações para melhor gerir a remanufatura dos produtos. A inclinação majoritária para utilização dessa tecnologia era esperada, pois IoT é a ferramenta mais utilizada no contexto de I40.

Tabela 4: I40 tecnologias que suportam a remanufatura 4.0 – Revisões Bibliográficas.

Paper	*IOT*	*Cloud*	*AM*	*SI*	*ROB*	*SIM*	*GD*	*RV*	*RA*	*IA*	*BD*	*BC*	*M2M*
(Spaltini et al., 2021)		X	X										
(Tiwari et al., 2021)				X	X	X	X						
(Kerin & Pham, 2019)	X							X	X				
(Fofou et al., 2021)			X										
(Cezarino et al., 2019)	X		X							X	X		
(Turner et al., 2019)	X									X	X	X	
(Tsai et al., 2021)		X		X	X								X
(Bag et al., 2021)			X										
(Dev et al., 2020)	X					X					X		
(Yang et al., 2018)	X												

Fonte: Autores.

5. Conclusão, Contribuições e Limitações

Os resultados gerados na pesquisa permitiram inferir que os conceitos de indústria 4.0 e economia circular na remanufatura apresentam crescimento representativo nos últimos anos, são temas abordados por diversos pesquisadores dos cinco continentes, com destaque para o Reino Unido na Europa. Contudo, como foi discutido no estudo, a quantidade de artigos que consolidam os temas abordados é relativamente baixa, consequentemente existem muitas áreas dentro desse campo de estudo que ainda foram pouco exploradas.

Dentro do contexto abordado na pesquisa, a ferramenta IoT aparece como a principal referência de implementação de novas tecnologias para buscar resultados sustentáveis. Além da IOT, outras vinte ferramentas foram citadas nos estudos, o que indica alternativas diversificadas para promover soluções sustentáveis, nesse grupo é possível identificar ferramentas que aparecem poucas vezes na investigação, o que corrobora para possíveis estudos futuros.

A Internet of Things (IoT) é a ferramenta mais utilizada dentro do contexto de indústrias 4.0 em geral, e a presente pesquisa apresenta que no campo da remanufatura 4.0 a ferramenta continua liderando o ranking das mais utilizadas, isso acontece pois pode ser facilmente implementada no conceito abordado pela remanufatura, contribuindo diretamente para identificação dos componentes que devem ser substituídos nas peças remanufaturadas.

As oportunidades para pesquisa identificadas neste estudo, mostra que o conjunto de tecnologias I40 são aplicados na prática pelas empresas, possibilitando uma melhor compreensão de como essas tecnologias podem apoiar adequadamente as partes interessadas, como por exemplo clientes e fornecedores.

Embora várias tecnologias tenham sido identificadas, existem muitas áreas de pesquisa não resolvidas que requerem pesquisa adicional nos campos de I40 e economia circular na remanufatura. Esperamos que este trabalho, embora preliminar, tenha proporcionado um quadro de referências para futuras investigações.

Referências

Bakshi, B. R. & Fiksel, J. (2003). *The Quest for Sustainability: Challenges for process systems engineering*. *AlChe Journal* 49(6).

Bressanelli, G. et al. (2020). *Towards circular economy in the household appliance industry:* An overview of cases. *Resources*. 9(11), 128.

BITKOM; VDMA; ZVI. (2016). *Implementation strategy industrie 4.0: report on the results of the industrie 4.0 platform.* Frankfurt, Alemanha.

Bouzon, M. et. al. (2010). *Panorama prático-teórico do Ambiente de Recuperação de Produtos: Um Estudo de Caso em uma Remanufatura de Produtos de Telecomunicações.* XXIX Encontro nacional de engenharia de produção, São Carlos, São Paulo: ABEPRO. Acesso em: 02 de nov. de 2021.

Butzer, S. et al. (2016). *Identification of approaches for remanufacturing 4.0. In: 2016 IEEE European Technology and Engineering Management Summit (E-TEMS).* IEEE. p. 1-6.

Dantas, T. et al. (2021). *How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals.* Sustainable Production and Consumption, 26, 213-227.

Chopra, S. & Meindl, P. (2014). *Gerenciamento da cadeia de suprimentos. Estratégia, planejamento e operações*. *Ed. Peasson/ Pentice Hall*. São Paulo. 2004.

Da Silva, S. (2020). *Uma análise bibliométrica da literatura sobre supply chain management* (SCM).

Macarthur, E. et al. (2013). *Towards the circular economy. Journal of Industrial Ecology*, 2, 23-44.

Nuraini, W. (2020). *Analisis Perbandingan Aplikasi Manajemen Referensi Zotero 5.0. 66. dan Endnote X9*. *Publication Library and Information Science*, 3(2), p. 80-86.

European Parliament. (2016) Industry 4.0. União Europeia.

Geng, Y. et al. (2011). *Towards a national circular economy indicator system in China: An evaluation and critical analysis*. *Journal of Cleaner Production*. 23, 216-224.

Giuntini, R. & Gaudete, K. (2003). *Remanufacturing: The next great opportunity for boosting US productivity*. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007681303000879

Gobbo, J. A. et al. (2018). *Making the links among environmental protection, process safety, and industry 4.0*. Segurança de Processos e Proteção Ambiental, 117, 372-382.

Gray, C & Charter, M. (2006). *Remanufacturing and product design - designing for the 7th Geration*. The Centre for Sustainable Desing.

Hermann, M. et al. (2016). *Design principles for industrie 4.0 scenarios: a literature review*. Annual Hawaii International Conference On System Sciences, 49. Estados Unidos. Proceedings.Washington, DC: IEEE Computer Society. 3928 – 3937.

Hofmann, E. & Rüsch, M. (2017). *Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics.* Computers in Industry. Elsevier.

H.-J. Bullinger, (2019). *Handbuch Unternehmens organisation* – Strategien, Planung, Umsetzung, "Berlin: Springer.

Kagermann, H. et al. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0* Working Group.

Martins, G. (2006). *Administração de materiais e recursos patrimoniais.* Saraiva.

Östlin, E. & Björkman, M. (2009). *Product Life-Cycle Implications for Remanufacturing Strategies.* Journal of Cleaner Production, 17(11), p. 999-1009.

Pearce, D. W., &Turner, R. K. (1990). *Economics of natural resources and the environment*. Hemel Hempstead, Herts: Harvester Wheatsheaf.

Poirier, C. & Reiter, E. (1997). *Otimizando sua rede de negócios*. Futura.

Rosa, P. et al. (2020). *Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review*. International Journal of Production Research, 58(6). 1662-1687.

Schmidt, R. et al. (2015). *Industry 4.0 - potentials for creating smart products: empirical research results*. International Conference On Business Information Systems (Bis), 18. Poznán, Polônia. Proceedings... [s.l.]: Springer International Publishing. p.16 - 27.

Steinhilper R. (1999). *Produktrecycling – Vielfachnutzen durch Mehrfachnutzung,* Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

Van, J. & Waltman, L. *Text Mining and Visualization Using VOSviewer*. ISSI Newsletter. 2011, 7(3), 50–54, (paper, preprint) (arXiv:1109.2058). https://www.vosviewer.com/text-mining-and-visualization-using-vosviewer

Guerra, B. et al. (2021) *Circular economy applications in the construction industry: A global scan of trends and opportunities*. Journal of Cleaner Production, 324, 129125.

Bernard, S. (2011). *Remanufacturing.* Journal of Environmental Economics and Management, 62(3). 337-351.

Silvestre, B. & Ţîrcă, D. (2019). *Innovations for sustainable development: Moving toward a sustainable future*. Journal of Cleaner Production, 208, 325-332.

Dantas, T. et al. (2021). *How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals*. Sustainable Production and Consumption, 26, 213-227.

Park, S. (2016). *Development of innovative strategies for the Korean manufacturing industry by use of the connected smart factory (CSF)*. Procedia Computer Science, 91, 744-750.

Inoue, M. et al. (2020). *"A Modular Design Strategy considering Sustainability and Supplier Selection."* Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing 14.2 JAMDSM0023. Web.

Bal, A. & Fazleena B. (2020). *"A Multi-Objective Facility Location Model to Implement Circular Economy."* Procedia Manufacturing 51 1592-599. Web.

Spaltini, M. et al. (2021). *"A Quantitative Framework for Industry 4.0 Enabled Circular Economy."* Procedia CIRP 98 115-20. Web.

Tiwari, D. et al. (2021). "*A Review of Circular Economy Research for Electric Motors and the Role of Industry 4.0 Technologies."* Sustainability (Basel, Switzerland) 13.17 9668. Web.

Kerin, M. & Duc T. (2019). *"A Review of Emerging Industry 4.0 Technologies in Remanufacturing."* Journal of Cleaner Production 237 117805. Web.

Fofou, F. et al. (2021). "*A Review on the Lifecycle Strategies Enhancing Remanufacturing."* Applied Sciences 11.13 5937. Web.

Manavalan, E. & Jayakrishna K. (2019). "*An Analysis on Sustainable Supply Chain for Circular Economy."* Procedia Manufacturing 33 477-84. Web.

Bag, S. et al. (2021). "*Application of Industry 4.0 Tools to Empower Circular Economy and Achieving Sustainability in Supply Chain Operations."* Production Planning & Control Ahead-of-print.Ahead-of-print: 1-23. Web.

Kravchenko, M. et al. (2020). *Circular economy enabled by additive manufacturing: Potential opportunities and key sustainability aspects.* Paper presented at the Proceedings of the NordDesign Conference, NordDesign 2020, Retrieved from www.scopus.com.

Rizvi, S. W. H., Agrawal, S., & Murtaza, Q. (2021). *Circular economy under the impact of IT tools: A content-based review. International Journal of Sustainable Engineering,* 14(2), 87-97. doi:10.1080/19397038.2020.1773567.

Delpla, V., Kenné, J., & Hof, L. A. (2021). *Circular manufacturing 4.0: Towards internet of things embedded closed-loop supply chains*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, doi:10.1007/s00170-021-08058-3.

Ingemarsdotter, E. K, E. Jamsin, G.W., Kortuem, A. R., & Balkenende. (2019*)."Circular Strategies Enabled by the Internet of Things: A Framework and Analysis of Current Practice."* Sustainability (Basel, Switzerland) 11.20 5689. Web.

Victor, D., Hof Lucas, A., & Jean-Pierre, K. (2020). *Closed loop supply chain optimization for circular manufacturing using industry 4.0 technologies. Paper presented at the Interconnected Supply Chains in an Era of Innovation* - Proceedings of the 8th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, ILS 2020, 220-227. Retrieved from www.scopus.com.

Ke, X., Ki P. K., & David, N. (2020). *"Cloud-BIM Enabled Cyber-Physical Data and Service Platforms for Building Component Reuse."* Sustainability Basel, Switzerland, 10329. Web.

Roda-Sanchez, L., Garrido-Hidalgo, C., García, A. S., Olivares, T., & Fernández-Caballero, A. (2021). *Comparison of RGB-D and IMU-based gesture recognition for human-robot interaction in remanufacturing*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, doi:10.1007/s00170-021-08125-9.

Cezarino, Oranges L., Liboni B. L., Stefanelli, N., Garcia O. B., & Conde S. L. (2021). *"Diving into Emerging Economies Bottleneck: Industry 4.0 and Implications for Circular Economy."* Management Decision 59.8 1841-862. Web.

Ramakrishna, S., Ngowi A., De Jager H., & O Awuzie B. (2020). *"Emerging Industrial Revolution: Symbiosis of Industry 4.0 and Circular Economy: The Role of Universities."* Science, Technology & Society (New Delhi, India) 25.3 505-25. Web.

Roda-Sanchez, L., Garrido-Hidalgo, C., García, A. S., Olivares, T., & Fernández-Caballero, A. (2021). *Comparison of RGB-D and IMU-based gesture recognition for human-robot interaction in remanufacturing*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, doi:10.1007/s00170-021-08125-9.

Yang, S. (2019). *Global challenges and market transformation in support of remanufacturing. Remanufacturing in the circular economy: Operations, engineering and logistics*. 169-210 10.1002/9781119664383.ch7 Retrieved from www.scopus.com.

Bag, Surajit, Shivam G., & Sameer K. (2021). *"Industry 4.0 Adoption and 10R Advance Manufacturing Capabilities for Sustainable Development."* International Journal of Production Economics 231 107844. Web.

Khan, Syed A. R., Asif R., Zhang Y., & Sharon M. (2021). *"Industry 4.0 and Circular Economy Practices: A New Era Business Strategies for Environmental Sustainability."* Business Strategy and the Environment Business Strategy and the Environment, 2021-06-21. Web.

Massaro, M., Secinaro, S., Dal Mas F., Brescia V., & Calandra D. (2021). *"Industry 4.0 and Circular Economy: An Exploratory Analysis of Academic and Practitioners' Perspectives."* Business Strategy and the Environment 30.2 1213-231. Web.

Dev, Navin K, Shankar, R., & Fahham, H. Q. (2020). *"Industry 4.0 and Circular Economy: Operational Excellence for Sustainable Reverse Supply Chain Performance."* Resources, Conservation and Recycling 153 104583. Web.

Bag, Surajit, Gunjan Y., Wood L., Dhamija, P., & Sudhanshu J. (2020). "*Industry 4.0 and the Circular Economy: Resource Melioration in Logistics."* Resources Policy 68 101776. Web.

Okorie, O., Salonitis, K., Charnley, F., Moreno, M., Turner, C., & Tiwari, A. (2019). *Manufacturing data for the implementation of data-driven remanufacturing for the rechargeable energy storage system in electric vehicles* doi:10.1007/978-3-030-04290-5_28 Retrieved from www.scopus.com.

Ghoreishi, M., & Ari Happonen. (2020). *"New Promises AI Brings into Circular Economy Accelerated Product Design: A Review on Supporting Literature."* E3S Web of Conferences 158 6002. Web.

Yang, Shanshan, Aravind M. R, Jacek, K., & Pepin, H. (2018). "*Opportunities for Industry 4.0 to Support Remanufacturing*." Applied Sciences 8.7 1177. Web.

Bagalagel, S., & ElMaraghy, W. (2020). *Product mix optimization model for an industry 4.0-enabled manufacturing-remanufacturing system*. Paper presented at the Procedia CIRP, 93 204-209. 10.1016/j.procir.2020.03.029 Retrieved from www.scopus.com.

Nava, C. (2020). *PVCUPCYCLING - circular economy and zero waste: "upcycling" waste from electrical systems.* Environmental Engineering and Management Journal, 19(10), 1823-1829. Retrieved from www.scopus.com.

Blömeke, S., Rickert, J., Mennenga, M., Thiede, S., Spengler, T. S., & Herrmann, C. (2020). *Recycling 4.0 - mapping smart manufacturing solutions to remanufacturing and recycling operations.* Paper presented at the Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2020.02.045 Retrieved from www.scopus.com.

Subramoniam, R., Erik S., Suresh S., & Donald, H. (2021). "*Riding the Digital Product Life Cycle Waves towards a Circular Economy."* Sustainability (Basel, Switzerland) 13.16 8960. Web.

Galparoli, S., Caielli, A., Rosa, P., & Terzi, S. (2021). *Semi-automated PCB disassembly station* doi:10.1007/978-3-030-74886-9_4 www.scopus.com.

Charnley, F., Divya T., Windo H., Mariale M., Okechukwu O., & Ashutosh T. (2019). *"Simulation to Enable a Data-Driven Circular Economy."* Sustainability (Basel, Switzerland) 11.12 3379. Web.

Kerin, M., & Duc T. P. (2020). "*Smart Remanufacturing: A Review and Research Framework.*" Journal of Manufacturing Technology Management 31.6 1205-235. Web.

Turner, C., Mariale M., Luigi M., Konstantinos S., Fiona C., Ashutosh T., & Windo H. (2019). *"Sustainable Production in a Circular Economy: A Business Model for Re-Distributed Manufacturing."* Sustainability (Basel, Switzerland) 11.16 4291. Web.

Tsai, F. M., Tat-Dat B., Ming-Lang T., Mohd Helmi A., Ming K L., & Anthony SF C. (2021). *"Sustainable Supply Chain Management Trends in World Regions: A Data-driven Analysis."* Resources, Conservation and Recycling 167 105421. Web.

Zhang, Yingfeng, S. L., Yang, L., Yang, H. Miao Li, Huisingh, D., & Lihui Wang. (2018). "*The 'Internet of Things' Enabled Real-time Scheduling for Remanufacturing of Automobile Engines.*" Journal of Cleaner Production 185 562-75. Web.

Alcayaga, A., Wiener, M. & Hansen, E. (2019). "*Towards a Framework of Smart-circular Systems: An Integrative Literature Review."* Journal of Cleaner Production 221 622-34. Web.

Bressanelli, G. Saccani, N., Perona, M & Baccanelli, I. (2020). "*Towards Circular Economy in the Household Appliance Industry: An Overview of Cases."* Resources (Basel) 9.128 128. Web.