

# Mapping the Impacts of Industry 4.0 on Performance Measurement Systems

M. Lopes and R. Martins

**Abstract**— Industry 4.0 technologies have the potential to enhance performance measurement systems dramatically. Although there are many reviews on Industry 4.0, there are none with attention on the interplay between Industry 4.0 and performance measurement systems. Thus, this article presents a scientific map on Industry 4.0 impacts on performance measurement systems. We applied bibliometric analysis and content analysis in a sample of 325 documents gathered from the Web of Science scientific index. R Bibliometrix package and VOSviewer software supported the data processing and analysis. The major results point out that scientific production has been rising since 2015, but it still is in the initial maturity stage without a few top productive authors and with high productivity of technological areas compared to business administration and operations management areas. This latest evidence calls attention to more research on how to use Industry 4.0 technologies in management systems. The results disclose positive impacts of Industry 4.0 technologies on performance measurement systems. The significant trend is the development of intelligent systems that provide adequate information for decision-making in real time with an extension to the entire supply chain. However, this green field calls for an interdisciplinary research effort from technological and management domains to apprehend the proper value to all stakeholders.

**Index Terms**—Bibliometric Analysis, Industry 4.0, Performance Measurement Systems, Performance Measures, Scientific Mapping, Supply Chain Management.

## I. INTRODUÇÃO

A medição e a gestão do desempenho são reconhecidas, nas organizações, como essenciais para se atingir os objetivos com eficiência e eficácia para cumprir a missão. Nesse sentido, os sistemas de medição de desempenho (SMDs) são elementos essenciais da gestão do desempenho [1]–[3].

O aumento da complexidade dos SMDs na era digital, devido às crescentes mudanças no ambiente interno e externo das organizações, levou ao aumento da quantidade de dados a serem coletados em tempo real, processados e analisados para fornecer informações significativas para apoiar a tomada de decisões nas empresas também em tempo real [4]–[7]. Nesse cenário emergente caracterizado por mudanças disruptivas e transformacionais, o uso da perspectiva de Sistemas de Sistemas (SoS) pode ser muito mais útil para entender o papel dos SMDs. Tal visão favorece o aprendizado e a adaptação, requer uma abordagem mais aberta e holística e pressupõe que

um conjunto de múltiplos sistemas independentes pode ser agrupado para produzir uma “infinidade de respostas” mais adequadas para a tomada de decisão [1], [8].

Diante dessas rápidas transformações no ambiente de negócios e nos requisitos dos *stakeholders*, a necessidade de processamento e análise em tempo real dessa “infinidade de respostas” para a tomada de decisões corretas, especialmente em prazo muito curto, são essenciais. A conectividade e o intercâmbio aprimorado de dados e informações viabilizados pelas tecnologias digitais da Indústria 4.0, entre elas, a Internet das Coisas, *Big Data Analytics*, *Cyber-Physical Systems* e Simulação, têm um impacto considerável na melhoria da tomada de decisão [9], [10]. Embora seja ainda um grande desafio, a integração dessas tecnologias favorece a transformação das organizações causando mudanças nos modelos de negócios e nos processos de fabricação e prestação de serviços [11], [12]. Apesar dessas tecnologias terem potencial para o aperfeiçoamento dos SMDs, existe uma lacuna na literatura sobre como elas estão afetando as maneiras que as organizações medem e gerenciam o desempenho [3], [13].

Dessa forma, o objetivo deste artigo é realizar um mapeamento da produção científica sobre os impactos da Indústria 4.0 nos SMDs. Três questões de pesquisa guiam o desenvolvimento deste artigo: (1) qual o estado atual das pesquisas sobre SMDs na Indústria 4.0? (2) quais as estruturas de conhecimento formadas em torno dessa temática? (3) quais as tendências e oportunidades relacionadas a essa temática identificadas na literatura existente?

O restante do artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção II apresenta a fundamentação teórica sobre a temática; a Seção III apresenta o *design* da pesquisa com o método utilizado e os conceitos básicos de bibliometria e mapeamento científico; a Seção IV exhibe os resultados análise bibliométrica; por fim, a Seção V apresenta as conclusões do artigo com as tendências, oportunidades e contribuições do estudo para o campo de pesquisa.

## II. REFERENCIAL TEÓRICO

A medição de desempenho é o processo de quantificação da eficácia e eficiência das ações passadas. Já um SMD é um conjunto de medidas usado para quantificar a eficácia e eficiência dessas ações. Eficácia é entendida como o nível alcançado em relação às necessidades dos *stakeholders*. Já eficiência refere-se ao uso econômico dos recursos da empresa para fornecer um certo nível de satisfação para esses mesmos *stakeholders* [2], [14]. O desempenho aferido hoje trata dos resultados e impactos das ações passadas e também influencia o desempenho futuro [15].

O SMD é um dos sistemas de informação centrais do processo

M. A. Lopes, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo, Brasil, marcelolopes@ufscar.br.

R. A. Martins, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo, Brasil, ram@dep.ufscar.br.

de gestão de desempenho. Ele é importante porque fornece uma indicação da sua atual posição no mercado e ajuda a desenvolver futuras estratégias e operações, além de otimizar a alocação de recursos e apoiar a tomada de decisões [8], [16]. O SMD pode ser utilizado para comunicar a estratégia e as metas de uma organização e alinhar os objetivos dos funcionários com os objetivos organizacionais. Desta forma, pode induzir a comportamentos desejados e indesejados. Também permite que os gerentes acompanhem o próprio desempenho e avaliem o desempenho dos funcionários de uma forma eficaz e eficiente [2], [17]–[19]. Do ponto de vista SoS, um SMD é um subsistema da gestão do desempenho e o conjunto de medidas de desempenho do SMD é um subsistema dele [1].

A evolução das tecnologias de fabricação e dos sistemas de informação, as mudanças na natureza do trabalho, novas estruturas e culturas das organizações, e a servitização contribuem para crescente complexidade dos SMDs [8]. Isso significa que os SMDs das organizações devem ser dinâmicos e resilientes para acompanhar essas modificações, a fim de fornecer dados e informações relevantes para a tomada de decisão. Sendo assim, a revisão periódica do SMD é muito importante para avaliar o alinhamento entre a estratégia e o conjunto de medidas de desempenho [4], [14], [20].

A temática da Indústria 4.0 começou a surgir a partir do resultado de um projeto entre o governo alemão, empresas e universidades para desenvolver a competitividade e modernizar a indústria alemã a partir de 2010, porém o termo tornou-se conhecido a partir de 2011 na feira CeMAT em Hannover na Alemanha [21]–[23]. A quarta revolução industrial envolve a conexão e integração entre um mundo digital/virtual e um mundo real/físico, em que máquinas e dispositivos inteligentes constantemente se comunicam e se interagem, definindo de forma autônoma o curso das ações e criando as chamadas “fábricas inteligentes” [24]–[26]. A Indústria 4.0 pode resultar na geração de novos modelos de negócios e novas formas de criar valor na manufatura [27], [28].

Existem quatro componentes considerados como base da Indústria 4.0: os Sistemas Físico-Cibernéticos (do inglês, *Cyber Physical Systems - CPS*), a Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things - IoT*), a Internet dos Serviços (do inglês, *Internet of Services - IoS*) e as Fábricas Inteligentes (do inglês, *Smart Factories*) [29]. Além desses quatro componentes básicos, outras oito tecnologias fundamentais estão transformando as relações tradicionais da produção industrial: realidade aumentada, robôs autônomos, simulação, manufatura aditiva, big data, computação em nuvem, segurança cibernética e integração horizontal e vertical de sistemas [30].

A adoção do conjunto de tecnologias mencionadas permite uma profunda transformação das organizações. Assim, as tecnologias da Indústria 4.0 impactam diretamente nos SMDs e podem, conseqüentemente, facilitar a tomada de decisões e permitir a capacidade de resposta a rupturas e falhas, considerados grandes desafios nas organizações [11], [31], [32].

A IoT permite a conectividade e integração entre os processos e os recentes desenvolvimentos e aplicações de sistemas IoT industriais, como radiofrequência, sensores, atuadores, telefones celulares e tecnologia 5G poderão proporcionar a captura de dados em tempo real do sistema de manufatura para retratar situações reais, permitindo o desenvolvimento de

SMDs para medição de desempenho em tempo real [33]–[35]. *Big data analytics* pode identificar e monitorar problemas de desempenho em processos de negócio pela análise de dados e disseminação de informações dos SMDs, pois tem a capacidade de extrair informações valiosas de uma grande quantidade de dados, estruturados e não estruturados, gerados em alta velocidade e disseminar informações adequadas para suportar os processos de tomada de decisão [3], [36]. Essa capacidade pode conduzir a uma melhor tomada de decisão e gerar mais vantagens competitivas para as organizações [37]. Nas fábricas inteligentes da Indústria 4.0, com uso de CPS, a integração dos SMDs com as máquinas e sistemas robóticos vai possibilitar a melhoria da medição de desempenho do sistema de produção, com o monitoramento em tempo real [38], [39].

### III. MÉTODO DE PESQUISA

#### A. Análise Bibliométrica

A bibliometria é adequada para estudar a produção científica num determinado campo de saber e vislumbrar problemas a serem investigados por pesquisas futuras [40], [41].

As etapas de uma análise bibliométrica, adaptada de Zupic e Cater [42], são as seguintes: (1) *design* do estudo: definição do objetivo, escolha do banco de dados e definição dos filtros a serem aplicados para delimitação da amostra; (2) coleta e tratamento dos dados: seleção, captura e tratamento dos dados bibliométricos após aplicação dos filtros definidos no passo anterior; (3) análise de dados: emprego de softwares para análises bibliométricas e estatísticas; (4) interpretação: interpretar e descrever as descobertas.

#### B. Estruturas de Conhecimento

O mapeamento científico trata de três “estruturas de conhecimento” para investigar o conhecimento científico num domínio do saber. A primeira estrutura é a conceitual que permite entender os principais temas e tendências abordados por um campo de pesquisa. A segunda estrutura é a intelectual que revela como os trabalhos dos autores influenciam a comunidade científica num campo. Por fim, a terceira estrutura é a social que apresenta como autores, instituições e países se relacionam em um campo de pesquisa científica [39], [43], [44].

O pacote R *Bibliometrix* [43], [45] é utilizado juntamente com o software *VOSviewer* [46] para dar suporte às análises bibliométricas nas três estruturas de conhecimento.

A seguir serão descritas as técnicas de análise bibliométrica utilizadas nessa pesquisa de acordo com cada estrutura de conhecimento.

##### 1) Estrutura Conceitual

A análise *co-word* é uma técnica de análise de conteúdo que utiliza padrões de coocorrência de pares de itens (ou seja, palavras ou frases nominais) em um corpo de texto para identificar as relações entre as ideias dentro das áreas apresentadas nesses textos [47]. A relação de coocorrência entre duas palavras-chave é determinada pelo número de artigos em uma base de documentos em que ambas são utilizadas conjuntamente, seja no título, no resumo ou na lista de palavras-chave. O mapeamento com uso dessas redes pode revelar possíveis temáticas de pesquisa sobre um determinado assunto [48].

## 2) Estrutura Intelectual

O acoplamento bibliográfico existe quando dois artigos citam uma ou mais referências em comum. Já a análise de cocitação foca nos pares de referências citadas em pelo menos dois documentos da amostra [49]. O acoplamento bibliográfico mensura a proximidade entre dois artigos comparando suas referências e quanto maior o número de referências que compartilham, maior a similaridade entre eles, que pode ser temática, teórico, metodológica ou outra particularidade compartilhada [50]. A premissa fundamental da análise de cocitação é que, quando dois ou mais documentos ou autores são citados juntos, em uma pesquisa posterior, há uma proximidade temática, conceitual e/ou metodológica entre os citados, na visão do autor citante [51], [52]. Desse modo, quanto maior o número de vezes que dois documentos são citados juntos, mais provável que eles sejam relacionados em conteúdo [53].

### C. Coleta dos Dados para a Análise Bibliométrica

A Tabela I, adaptada de Leite [54], apresenta o protocolo para a coleta de dados para a análise bibliométrica com a escolha da base de dados e dos devidos filtros. A coleta de dados foi realizada em 22/05/2020.

TABELA I PROTOCOLO DA COLETA DE DADOS PARA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	
Filtros	Especificações
<b>Tipo de documento</b>	Articles, Review, Early Access
<b>Termos de busca pesquisados</b>	<b>Grupo 1:</b> industry 4.0; smart manufactur*; smart factor*; digital manufactur*; cyber-physical system*; cyber physical system*; digitalization; digitalization; digital ubiquity; internet of things; big data* <b>Grupo 2:</b> performance measur*; performance metric*; key-performance indicator*; measur* performance; performance indicator*; KPI*
<b>Operador boleano</b>	AND entre grupos. OR entre os termos de busca.
<b>Base de dados</b>	Web of Science
<b>Campos de busca</b>	Título, resumo e palavras-chave
<b>Áreas de pesquisa</b>	Engineering or Business Economics or Operations Research Management Science. Na seleção dessas áreas, utilizou-se a opção "Refinar".
<b>Idioma</b>	Inglês
<b>Anos de publicação</b>	Sem janela de tempo.
<b>Observações</b>	As palavras apresentadas nos termos de busca foram pesquisadas no título, resumo e palavras-chave dos documentos. O símbolo * em alguns termos de busca pesquisados significa que o sufixo dessas palavras pode variar, por isso esse recurso foi utilizado para abranger derivações dos termos de busca e aumentar o retorno de documentos.

A busca nas áreas de pesquisa escolhidas da base de dados *Web of Science*, conforme o protocolo da análise bibliométrica (Tabela I), resultou em uma amostra com 325 documentos.

## IV. RESULTADOS

### A. Análise Descritiva e Interpretação dos Resultados

A análise dos metadados dos 325 documentos da amostra foi feita com o uso do pacote R *Bibliometrix* rodado no software *RStudio* com interface *Biblioshiny* para tratamento e execução de parte das análises bibliométricas.

Dos 325 documentos da amostra, 310 são artigos (95,4%) e

15 revisões (4,6%), publicados em 160 periódicos, com 1.100 diferentes palavras-chave no período de 2012 a 2020.

A Fig. 1 apresenta a evolução do número de publicações ao longo dos anos e seu impacto, em termos de média de citações por ano. Essa métrica é a razão entre a média de citações dos artigos publicados no ano dividido pelo número de anos que os artigos foram publicados. Assim, há uma compensação do tempo em que as publicações estão ativas e a comparação entre os anos é mais adequada.

Pode-se observar que no período, houve um aumento contínuo e expressivo da produção científica a partir de 2015, ano da disseminação do termo Indústria 4.0 e seus sinônimos. Observa-se também um declínio no impacto, em termos de média de citações por ano, entre 2012 e 2019, porém esse declínio não é contínuo, apresentando variações. Os artigos mais citados nesse período são Davis et al. [55], Zhou et al. [56] e Wu et al. [57], com 221, 125 e 198 citações respectivamente. Esses documentos influenciaram significativamente o impacto nos anos de 2012 e 2014.

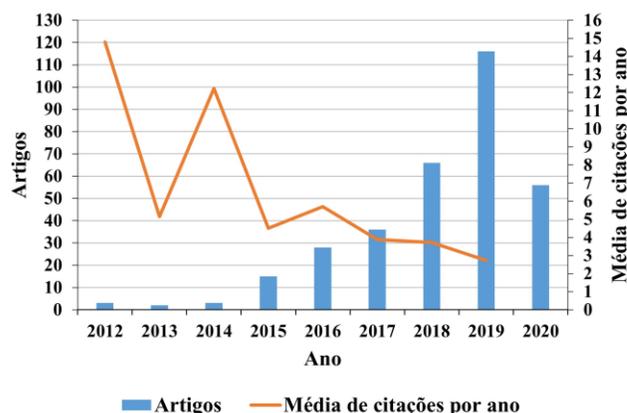


Fig. 1. Produção científica anual e seu impacto.

A Tabela II complementa a Fig. 1 com a apresentação da lista dos 10 artigos mais citados, a fonte em que foram publicados, o total de citações e o total de citações por ano.

TABELA II  
LISTA DOS 10 DOCUMENTOS MAIS CITADOS NA AMOSTRA

Documento	Total de citações	Total de citações por ano
HAAS H, 2016, J LIGHTWAVE TECHNOL	315	63,0
DAVIS J, 2012, COMPUT CHEM ENG	221	24,6
WU Q, 2014, IEEE INTERNET THINGS J	198	28,3
ZHOU J, 2012, IEEE TRANS PARALLEL DIST	125	13,9
SHARMA PK, 2018, IEEE ACCESS	108	36,0
THANH NAM PHAM TNP, 2015, IEEE ACCESS	59	9,8
GHONEIM MT, 2015, ELECTRONICS	57	9,5
MORABITO R, 2017, IEEE ACCESS	52	13,0
WANG H, 2015, IEEE NETW	52	8,7
HWANG G, 2017, INT J PROD RES	49	12,3
PORTUGAL I, 2018, EXPERT SYST APPL	49	16,3
KWON O, 2013, EXPERT SYST APPL	48	6,0

O documento de maior impacto da Tabela II é "What is LIFI" de Haas et al. [58], com 315 citações e 63 citações por ano. Esse documento trata de estudos relacionados a melhoria de indicadores de desempenho de sistemas de comunicação sem fio via *LIFI* (*Light-fidelity*), para fornecer a conectividade necessária nas aplicações de internet das coisas. Logo após, seguem Davis et al. [55], Wu et al. [57], Zhou et al. [56] e

Sharma et al. [59]. Entre os documentos da Tabela II, Hwang et al. [33] é o único artigo que trata da melhoria dos SMDs com a aplicação da IoT para capturar dados em tempo real utilizados na avaliação de desempenho do processo de produção.

Observa-se ainda na Tabela II que apesar de alguns documentos tratarem de medição do desempenho e Indústria 4.0, a maioria trata a questão do desempenho com uso de indicadores, medidas, métricas e *KPIs* para expressar o desempenho de tecnologias ou mesmo da Indústria 4.0. Esses documentos não pertencem ao campo de SMDs.

A Fig. 2 ilustra o aspecto dinâmico das ocorrências das palavras-chave mais utilizadas pelos autores da amostra ao longo do tempo. É possível observar o domínio das cinco palavras-chave mais citadas, em ordem decrescente: *internet of things*, *big data*, *Industry 4.0*, *cyber-physical systems* e *performance measurement*.

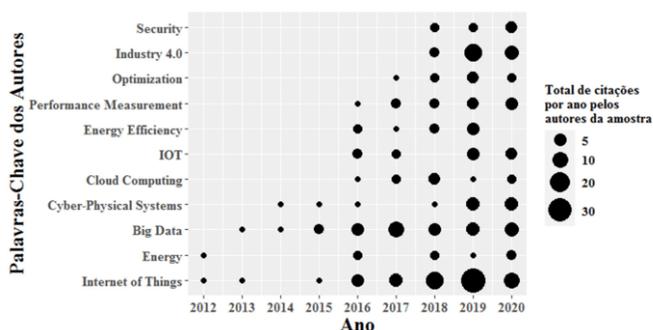


Fig. 2. Crescimento das palavras-chave.

A palavra-chave *internet of things* é a mais antiga, mais utilizada pelos pesquisadores e a que possui um crescimento contínuo e expressivo a partir de 2016. Para não alterar os metadados originais dos documentos, a palavra-chave IoT foi mantida em separado de *internet of things*. O termo *performance measurement* associado aos SMDs é crescente, porém não é possível saber se apenas trata-se do desempenho e não dos sistemas. Interessante notar também o uso do termo *big data*.

A Lei de Lotka prevê que uma pequena quantidade de autores tende a publicar uma grande quantidade artigos num domínio. Isso geralmente ocorre quando o campo atinge maturidade com o estabelecimento dos principais autores [60], [61]. A Fig. 3 oferece uma comparação entre a produtividade dos autores do campo com o modelo da Lei de Lotka para os dados da amostra.

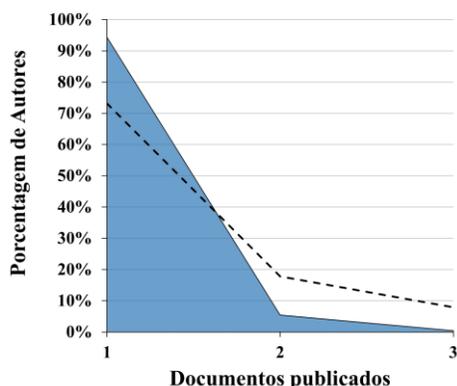


Fig. 3. Lei de Lotka para autores sobre a temática da pesquisa.

A área escura do gráfico representa a frequência da porcentagem de autores da amostra que publicaram um, dois ou mais artigos. A linha tracejada representa a frequência esperada de acordo com a Lei de Lotka. A amostra estudada apresenta uma frequência, além da esperada devido aos autores "ocasionais", i.e., aqueles que publicaram apenas um documento (94,3% do total) e menor que a esperada para autores que publicaram dois ou mais documentos. O resultado evidencia que não existem autores com alta produtividade em relação a temática dessa pesquisa, típica característica de um campo em desenvolvimento. Complementando, a Tabela III apresenta os autores mais produtivos da amostra (0,4% do total) com três publicações.

TABELA III  
OS AUTORES MAIS PRODUTIVOS DA AMOSTRA COM TRÊS PUBLICAÇÕES

Autor	País da instituição do autor	Artigos	Artigos fracionados	Total de citações
Angappa Gunasekaran	E.U.A.	3	1,2	11
Kijun Han	Coréia do Sul	3	0,5	81
Hwang Gyusun	Coréia do Sul	3	0,8	64
Jinwoo Park	Coréia do Sul	3	0,8	64

A Tabela IV apresenta os periódicos em que os artigos da amostra foram publicados com o total de artigos publicados e respectivo impacto em citações. Foram consideradas somente as fontes com mais de 5 artigos publicados. Observa-se que as principais fontes são das áreas de engenharia, tecnologia e ciência da computação. Atuando especificamente nessas áreas, vale destacar o periódico multidisciplinar *IEEE Access* com 9,8% do total de publicações e com maior impacto em número de citações (316 citações).

TABELA IV  
AS FONTES COM MAIOR NÚMERO DE PUBLICAÇÕES

Fontes	Artigos	Total de citações	% dos artigos
IEEE Access	32	316	9,8
IEEE Internet of Things Journal (IEEE I.T.J.)	16	285	4,9
Sensors	16	138	4,9
Computers & Industrial Engineering (C.I.E.)	9	56	2,8
Journal of Supercomputing	8	44	2,5
International Journal of Production Research (I.J.P.R.)	7	62	2,2
Computer Communications	6	35	1,8
IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (IEEE T.P.D.S.)	6	145	1,8
Computer Networks	5	16	1,5
Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking (E.J.W.C.N)	5	6	1,5
Industrial Management & Data Systems (I.M.D.S.)	5	42	1,5
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing (R.C.I.M)	5	14	1,5

A Fig. 4 apresenta a dinâmica das fontes da Tabela IV ao longo do tempo. O destaque fica para o *IEEE Access*, que possui crescimento contínuo a partir de 2015. Outras fontes ligadas à Engenharia de Controle como o *Sensors* e *IEEE Internet of Things Journal* apresentam crescimento mais recentemente. Essas três fontes abordam pesquisas em áreas técnicas e possuem relação direta com as tecnologias emergentes da Indústria 4.0. Elas não têm enfoque gerencial. Já as fontes mais ligadas às áreas de produção, manufatura e gestão de operações como o *Industrial Management & Data Systems (I.M.D.S.)* e



Devido ao alto número de documentos em cada *cluster*, são apresentados na Tabela VI somente os principais documentos de cada *cluster*, considerando as maiores forças totais de ligação dentro do *cluster*. A Tabela VI também mostra os documentos mais bem classificados, em termos de força total de ligação, entre todos os documentos da rede. Os documentos do *cluster 2* estão mais alinhados a área de gestão e aos SMDs. Por isso, ele foi subdividido para uma análise mais minuciosa.

TABELA V  
CLASSIFICAÇÃO DA LITERATURA DA ANÁLISE DE COCITAÇÃO

Cluster	Cor do cluster	Número de documentos	Temática do cluster
1	Azul	16	Impactos da interconectividade digital da internet das coisas na comunicação industrial.
2a	Vermelho	52	A gestão da medição do desempenho frente aos negócios emergentes.
2b			A análise inteligente de dados agregando valor para a tomada de decisão.
2c			O uso do <i>big data analytics</i> na melhoria da performance organizacional com ênfase na área de <i>supply chain management</i> .
3	Verde	51	Conceitos, tendências e oportunidades da Indústria 4.0 e suas tecnologias.

C. Análise de Conteúdo da Rede de Cocitação de Documentos

No *cluster 1*, são tratadas as tecnologias digitais e, mais especificamente, as pesquisas envolvendo implantação, problemas e tendências sobre a Internet das Coisas (IoT).

Atzori *et al.* [63] relatam diferentes visões do paradigma da IoT, fazem uma revisão das tecnologias facilitadoras e identificam os principais problemas nessa área de pesquisa. Nesse sentido, Gubbi *et al.* [64] apresentam uma visão centrada na nuvem para a implantação mundial da IoT e discutem as principais tecnologias facilitadoras e domínios de aplicativos que provavelmente impulsionarão a pesquisa sobre essa tecnologia. Já Wollschlaeger *et al.* [65] tratam das tendências tecnológicas e o impacto que elas podem ter na comunicação industrial. Especificamente, eles analisam o impacto da IoT e CPSs na automação industrial na perspectiva da Indústria 4.0.

No *cluster 2a*, as principais referências citadas são sobre gestão e medição de desempenho. Em geral, discutem a importância, a evolução, desafios e tendências desse campo de pesquisa frente aos negócios emergentes.

Kaplan e Norton [66] tratam do *Balanced Scorecard (BSC)*, um conhecido e muito aplicado sistema de gestão e medição de desempenho estratégico. Por sua vez, Neely *et al.* [67] revisam a literatura à época acerca de sete vetores de mudança dos SMDs, entre os quais merece destaque o poder da tecnologia da informação. Mais especificamente, Beamon [68] é um dos trabalhos pioneiros sobre medidas de desempenho para gestão da cadeia de suprimentos.

Kennerly e Neely [20] tratam da evolução dos SMDs para que eles provenham informações adequadas aos tomadores de decisão. Nesse sentido, Melnyk *et al.* [69] relatam que os SMDs precisam ser revisados corretamente e periodicamente para acompanhar as mudanças em ambientes dinâmicos e turbulentos, mantendo assim um alinhamento entre a estratégia e o conjunto de medidas de desempenho. Nessa mesma linha, Bititci *et al.* [8] revisam o campo da medição de desempenho, apresentam a evolução e tendências das pesquisas relacionadas aos SMDs e discutem os principais desafios no campo.

Taticchi *et al.* [70] revisam a literatura sobre gestão e medição de desempenho para pequenas e médias empresas (PMEs) e grandes empresas e revelam uma lacuna na literatura sobre o tema relacionado às PMEs. Já Franco-Santos *et al.* [17] abordam as consequências da medição de desempenho contemporânea no comportamento das pessoas, nas capacidades organizacionais e no desempenho em todos os níveis da organização.

Bourne *et al.* [71] analisam as fases de *design*, implantação, uso e atualização dos SMDs e destacam que para manter um alinhamento com a estratégia, os SMDs devem ser revistos e atualizados continuamente. Nessa mesma linha, Nudurupati *et al.* [14] revisam a literatura à época sobre o papel dos sistemas de informação gerenciais e a gestão de mudanças ao longo do ciclo de vida da medição de desempenho. Além disso, discutem os SMDs em ambientes de negócios emergentes.

No *cluster 2b*, o destaque é o uso do *big data* como fonte de vantagem competitiva dada a sua importância para a tomada de decisão e o direcionamento de novas pesquisas na área de *business intelligence and analytics (BI&A)*.

Lavalle *et al.* [72] exploram os desafios e as oportunidades associadas ao uso do *business analytics* e avaliam como as organizações mais inteligentes estão incorporando a análise de dados para transformar informações em ideias e ações,

TABELA VI  
PRINCIPAIS DOCUMENTOS DE CADA CLUSTER

Cluster 1	Total link strenght	Cluster 2a	Total link strenght	Cluster 2b	Total link strenght	Cluster 2c	Total link strenght	Cluster 3	Total link strenght
Wollschlaeger <i>et al.</i> (2017)	62	Beamon (1999)	70	Chen <i>et al.</i> (2012)	98	Gunasekaran A. (2017)	144 (1°)	Lasi <i>et al.</i> (2014)	123 (3°)
Gubbi <i>et al.</i> (2013)	57	Melnyk <i>et al.</i> (2014)	54	Lavalle <i>et al.</i> (2011)	85	Wamba <i>et al.</i> (2015)	141 (2°)	Lee <i>et al.</i> (2015)	121 (4°)
Atzori <i>et al.</i> (2010)	62	Neely <i>et al.</i> (2005)	53	Mcafee e Brynjolfsson (2012)	61	Wang <i>et al.</i> (2016)	123 (3°)	Hofmann e Rüsche (2017)	117 (5°)
		Kaplan e Norton (1996)	49	Mayer-Schönberger e Cukier (2013)	51	Wamba <i>et al.</i> (2017)	116 (6°)	Liao <i>et al.</i> (2017)	106 (8°)
		Bititci <i>et al.</i> (2012)	48	Davenport T.H. (2014)	40	Waller e Fawcett (2013)	109 (7°)	Lee <i>et al.</i> (2014)	101 (9°)
		Bourne <i>et al.</i> (2000)	46			Hazen <i>et al.</i> (2014)	88	Hermann <i>et al.</i> (2016)	100 (10°)
		Kennerly e Neely (2003)	42			Akter <i>et al.</i> (2016)	86	Ivanov <i>et al.</i> (2016)	88
		Neely <i>et al.</i> (1999)	41			Gupta e George (2016)	82	Schmidt <i>et al.</i> (2015)	84
		Franco-Santos <i>et al.</i> (2012)	37					Sanders <i>et al.</i> (2016)	59
		Nudurupati <i>et al.</i> (2011)	28					Kagermann <i>et al.</i> (2013)	56
		Taticchi <i>et al.</i> (2010)	26						
		Kaplan e Norton (1992)	19						

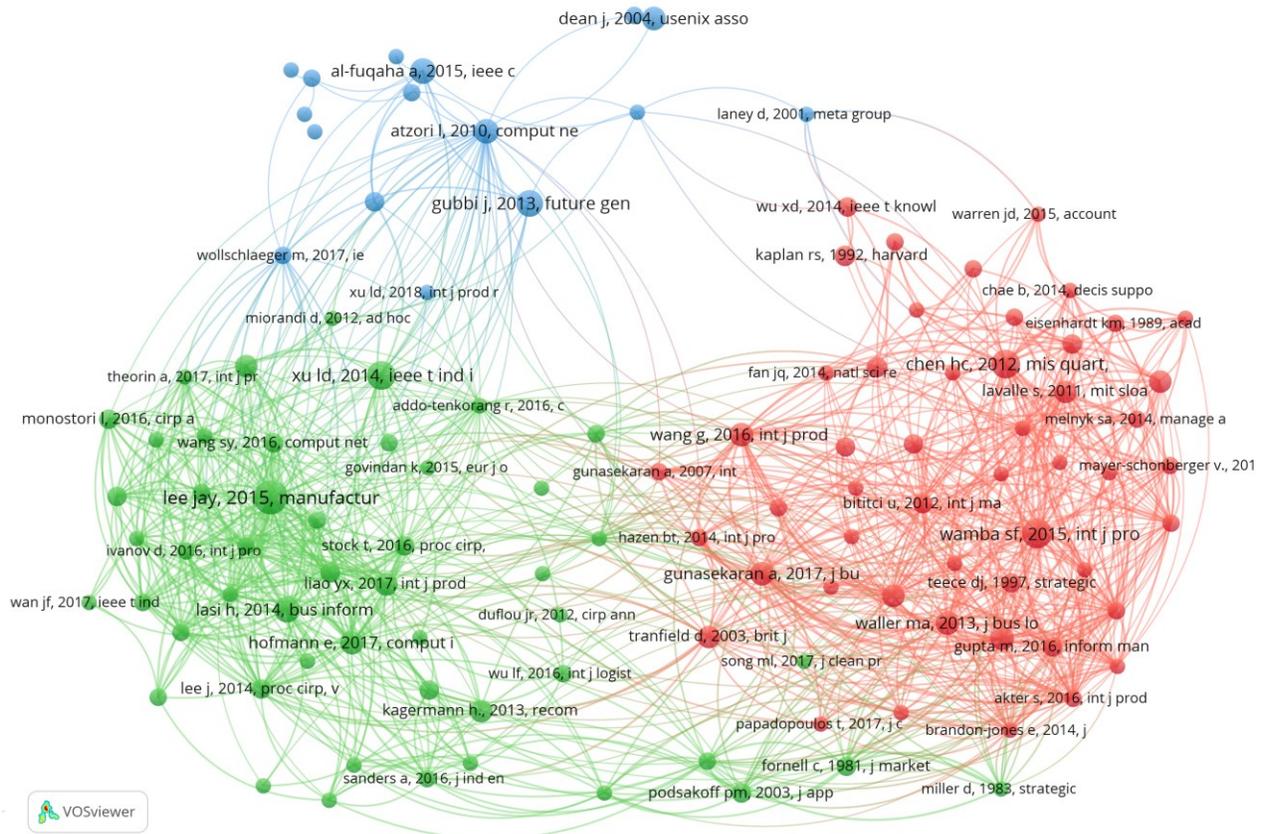


Fig. 6. Rede de cocitação de documentos.

agregando valor para a tomada de decisão. Nesse sentido, Chen et al. [73] analisam a evolução, aplicação e as áreas emergentes de pesquisa em *business intelligence and analytics (BI&A)* mostrando a sua relevância para as empresas e como o *big data analytics* pode oferecer novas direções para a pesquisa em *BI&A*.

Mcafee e Brynjolfsson [74] abordam a vantagem competitiva com o uso do *big data* e seu potencial para revolucionar a gestão no processo de tomada de decisão. Conceituam três características do *big data* (volume, velocidade e variedade) e apontam a mudança na cultura de tomada de decisão como um dos maiores desafios para sua implantação. Já Mayer-Schönberger e Cukier [75] apresentam estudos empíricos sobre uso do *big data* e destacam o futuro potencial, as ressalvas e preocupações em relação a tecnologia. Por fim, Davenport [76] explica como o *big data* pode ser usado pelas empresas para promover uma melhor tomada de decisão, especialmente sobre inovação.

No *cluster 2c*, as referências analisam e interpretam informações envolvendo *big data analytics* e suas derivações para descobrir padrões e identificar informações úteis para a tomada de decisão e melhoria do desempenho organizacional, principalmente da área de *supply chain management*.

Wamba et al. [77] analisam as perspectivas de definição e as aplicações de *big data* e fornecem informações sobre a geração de valor por meio da implantação dessa tecnologia da Indústria 4.0. Nessa mesma linha, Wang et al. [78] descrevem a importância do *big data business analytics (BDBA)* e revisam e classificam a literatura sobre a aplicação do *BDBA* em logística e gestão da cadeia de suprimentos. Além disso, apresentam o

uso de métodos e técnicas para coletar, disseminar, analisar e usar informações oriundas do *big data*.

Waller e Fawcett [79] mostram a importância e as implicações das pesquisas envolvendo *data science*, *predictive analytics* e *big data* para a tomada de decisões na cadeia de suprimentos. Nesse sentido, Gunasekaran et al. [80] abordam o impacto da apropriação do *big data and predictive analytics (BDPA)* na gestão da cadeia de suprimentos e no desempenho da organização. Os resultados da pesquisa sugerem que a conectividade e compartilhamento de informações sob o efeito da mediação e comprometimento da alta gerência são positivamente relacionados à aceitação do BDPA.

Akter et al. [81] propõe um modelo de *big data analytics capability (BDAC)* fundamentada na teoria baseada em recursos e na visão do sociomaterialismo para melhorar o desempenho das empresas. O modelo hierárquico destaca o papel da capacidade da gestão, capacidade tecnológica e talento na melhoria do desempenho da empresa. Nessa mesma base, Wamba et al. [82] propõe um modelo de BDAC e examinam o impacto desse modelo na *firm performance (FPER)*, bem como os efeitos mediadores do *process oriented dynamic capabilities (PODC)* na relação entre BDAC e FPER e descobrem que três componentes do BDAC (infraestrutura, gestão e recursos humanos) influenciam fortemente a FPER. Já Gupta e George [83] identificam vários recursos que, em conjunto, criam uma capacidade de *big data analytics (BDA)* e verificam que essa capacidade leva a um desempenho superior da empresa. Hazen et al. [84] introduzem o problema da qualidade dos dados no contexto da gestão da cadeia de suprimentos e propõe métodos para monitorar e controlar a qualidade dos dados, explorando diferentes teorias.

No *cluster 3*, as referências citadas tratam dos conceitos, da evolução, dos problemas, das tendências e oportunidades relacionadas à Indústria 4.0 e suas tecnologias, bem como os princípios para sua implantação.

Lasi *et al.* [85] aborda conceitos fundamentais e tendências da Indústria 4.0 e Schmidt *et al.* [86] apresentam o resultado de um estudo sobre o potencial da Indústria 4.0 e o uso de suas tecnologias, como o *big data* e *cloud computing*. Mais especificamente, Lee *et al.* [87] abordam as tendências da transformação de serviços de manufatura no ambiente de *big data*, bem como a disponibilidade de ferramentas inteligentes de *analytics* preditiva para gerir *big data* e obter transparência e produtividade.

Em relação a implantação da Indústria 4.0, Kagermann *et al.* [88] apresentam recomendações nesse sentido e Lee *et al.* [89] propõe uma diretriz específica para *cyber-physical systems*. Além disso, Hermann *et al.* [90] definem a Indústria 4.0 e identificam seis princípios de *design* para sua implantação: interoperabilidade, virtualização, descentralização, capacidade em tempo real, orientação ao serviço e modularidade.

Acerca da gestão da cadeia de suprimentos, Ivanov *et al.* [91] apresentam um modelo dinâmico e um algoritmo para o planejamento de curto prazo em fábricas inteligentes da Indústria 4.0. Já Hofmann e Rüsçh [29] discutem as oportunidades da Indústria 4.0 no contexto da gestão logística e revelam oportunidades em termos de descentralização, autorregulação e eficiência.

Sanders *et al.* [92] analisam a Indústria 4.0 e a manufatura enxuta, tratando do dilema dos fabricantes, considerando o investimento necessário e os benefícios não percebidos.

Por fim, Liao *et al.* [93] revisam a literatura sobre a Indústria 4.0 e investigam os avanços acadêmicos indicando deficiências e tendências de pesquisa.

### 3) Acoplamento Bibliográfico de Documentos

A Fig. 7 apresenta a rede de acoplamento bibliográfico dos documentos mais importantes da amostra formada por 103 nós (documentos), 412 links e 10 clusters. O tamanho do nó indica a quantidade de citações de cada documento da amostra e quanto maior o número de referências que os documentos compartilham, maior a força de ligação entre eles em termos da base teórica [62].

Apesar da grande quantidade de citações de alguns documentos como Haas *et al.*, [58], Wu *et al.* [57], Zhou *et al.* [56] e Sharma *et al.* [59], a maior parte dos acoplamentos estão relacionados a estudos técnicos envolvendo Indústria 4.0 ou suas tecnologias. Assim, serão analisados somente os clusters 1 e 2, pois são os que apresentam acoplamentos mais alinhados com a área de gestão e SMDs na Indústria 4.0.

A Tabela VII apresenta o número total de documentos dos clusters 1 e 2 e a temática central, elaborada a partir da análise de conteúdo dos principais documentos de cada cluster.

Para uma análise mais objetiva, a Tabela VIII apresenta somente os acoplamentos mais relevantes desses dois clusters de acordo com a força total de ligação, ou seja, a similaridade temática entre eles. O cluster 1 foi subdividido após a análise de conteúdo de seus artigos. Também são apresentados os documentos mais bem classificados, em termos de força total de ligação, entre os documentos de toda a rede de acoplamento bibliográfico.

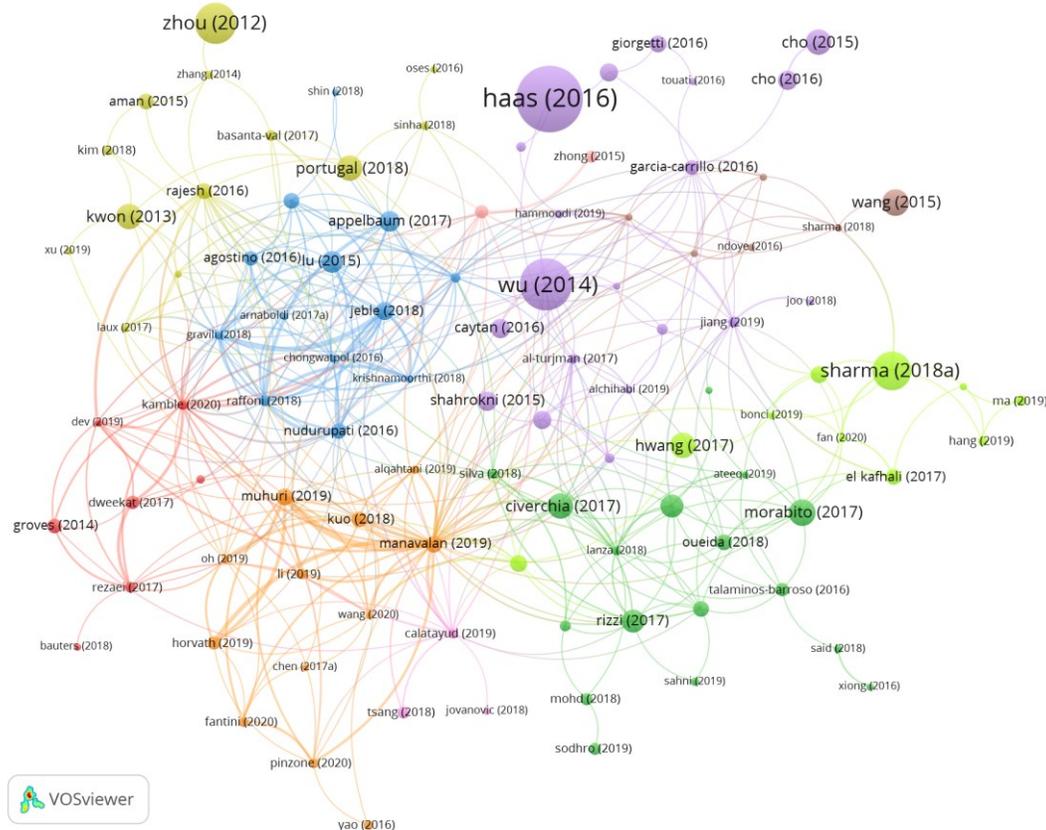


Fig. 7. Rede de acoplamento bibliográfico de documentos.

Embora a Fig. 7 mostre que o artigo de Kamble e Gunasekaran [94] localiza-se na fronteira do *cluster* 2, a análise de conteúdo do artigo revelou a sua proximidade com a temática do *cluster* 1b, assim ele foi realocado.

TABELA VII  
CLASSIFICAÇÃO DA LITERATURA DA ANÁLISE DE ACOPLAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Cluster	Cor do cluster	Número de artigos	Temática do cluster
1a	Azul	13	Medição e gestão do desempenho com <i>business analytics</i> .
1b			<i>Big data analytics</i> no suporte à tomada de decisões em <i>supply chain management</i> .
2	Vermelho	7	Medição do desempenho em tempo real na cadeia de suprimentos usando internet das coisas.

TABELA VIII  
PRINCIPAIS ARTIGOS DE CADA CLUSTER

Cluster 1a	Total link strength	Cluster 1b	Total link strength	Cluster 2	Total link strength
Raffoni et al. (2018)	58 (5°)	Jeble et al. (2018)	78 (2°)	Dweekat et al. (2017)	20
Nudurupati et al. (2016)	48 (6°)	Kamble e Gunasekaran (2020)	70 (3°)	Rezaei et al. (2017)	24
Krishnamoorthi e Mathew (2018)	40 (7°)	Gravili et al. (2018)	70 (3°)		
Appelbaum et al. (2017)	30 (10°)				

#### D. Análise de Conteúdo da Rede de Aoplamento Bibliográfico

No *cluster* 1a, os artigos são sobre o uso da *business analytics* na medição do desempenho e fornecimento de informações para a tomada de decisão. Appelbaum et al. [95] criam um framework *Managerial Accounting Data Analytics* (MADA) baseado no *Balanced Scorecard* e utilizam *business analytics* em dados contábeis para realizar a medição de desempenho corporativo e fornecer informações para a tomada de decisão. Por sua vez, Krishnamoorthi e Mathew [96] ampliam o uso do *business analytics* para capturar como os recursos analíticos contribuem para o desempenho dos negócios.

Existe uma forte ligação entre os estudos de Nudurupati et al. [13] e Raffoni et al. [97]. Nudurupati et al. [13] exploram como os modelos e práticas de PMM devem ser renovados para serem resilientes e refletirem os avanços nas economias digitais e concluem que as organizações devem incorporar a avaliação do desempenho em uma rede mais ampla, envolvendo várias partes interessadas e que elas precisam entender como os desenvolvimentos tecnológicos poderão criar vantagens competitivas. Nesse sentido, Raffoni et al. [97] mostram que além de incentivar o diálogo, o *business performance analytics* (BPA) pode colaborar com a medição e gestão do desempenho na identificação de variáveis críticas de desempenho, fontes potenciais de risco e interdependências relacionadas. Destacam também questões críticas na implantação de abordagens baseadas em dados. Vale destacar que a sociedade vive um momento de alerta para a gestão de riscos devidos aos efeitos da pandemia da Covid-19.

No *cluster* 1b, os documentos mostram a importância do *big data analytics* como suporte à tomada de decisão na gestão da cadeia de suprimentos. Kamble e Gunasekaran [94] identificam os vários PMMs usados para avaliar o *big data-driven supply*

*chain* (BDDSC) e propõe um SMD do BDDSC que guiará os gerentes a ter um SMD robusto.

Jeble et al. [98] e Gravili et al. [99] são os mais fortemente acoplados entre os documentos de todos os *clusters*. Jeble et al. [98] desenvolvem um modelo teórico para explicar o impacto do *big data* e *big data and predictive analytics* (BDPA) nas metas de desenvolvimento sustentável de negócios da organização e para guiar pesquisas sobre o processo de geração do *big data*. Já Gravili et al. [99] examinam a influência do *digital divide* (DD) e da *digital alfabization* (DA) nesse processo e buscam obter informações sobre como o *big data* poderia ser útil na tomada de decisões na gestão da cadeia de suprimentos.

No *cluster* 2, os dois artigos apresentam uma grande semelhança teórica e tratam do uso da internet das coisas nos SMDs para a gestão da cadeia de suprimentos.

Dweekat et al. [100] apresentam a prática na cadeia de suprimentos e descrevem como a abordagem proposta pode ajudar a desenvolver SMDs e aplicativos habilitados pela IoT enquanto Rezaei et al. [101] desenvolvem um *framework* baseado na IoT para medição do desempenho da cadeia de suprimentos com alinhamento das decisões em tempo real.

## V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um mapeamento da produção científica sobre os impactos da Indústria 4.0 nos SMDs com uma análise bibliométrica dos 325 documentos de uma amostra do índice científico *Web of Science* que apontou resultados interessantes relacionados as questões de pesquisa.

Acerca da produção científica, observou-se a relevância e contemporaneidade das pesquisas sobre o tema SMDs associados a Indústria 4.0, constatada por meio da rede de coocorrência de palavras-chave e pelo crescimento contínuo e expressivo da produção científica a partir de 2015, apesar do termo Indústria 4.0 ter sido cunhado em 2011. Embora o interesse seja crescente, ainda não temos no campo uma pequena quantidade de autores com produção crescente e destacada. Isso foi comprovado com a aplicação da Lei de Lotka nos documentos da amostra. O campo ainda está em seu estado inicial de maturidade, o que é uma oportunidade para os pesquisadores.

O *IEEE Access* foi o periódico com maior número de publicações e maior impacto em número de citações. A partir de 2015, esse periódico também demonstra uma tendência crescente na divulgação da temática do campo. Vale ressaltar que muito da produção é das áreas de engenharia, tecnologia e ciência da computação em comparação com as áreas de gestão de operações e administração. Apenas uma parcela dos 325 documentos trata de modificações nos SMDs causados pela Indústria 4.0. Isso demonstra a importância de pesquisas para integrar as áreas e incorporar as novas tecnologias nos sistemas de gestão.

Com relação às estruturas de conhecimento do campo, os artigos da amostra citam referências importantes e conhecidas da área de SMDs (*cluster* 2a – Tabela VI), mas elas não são tão recentes, se comparadas aos documentos que envolvem a temática da Indústria 4.0 e suas tecnologias (*cluster* 3 – Tabela VI). Isso é um efeito do nível baixo de maturidade sem o estabelecimento de novas referências com enfoque específico

no tema. Assim, pode-se afirmar que existe uma janela de oportunidade para desenvolvimento de pesquisas no tema. Contudo, o estudo revelou trabalhos interessantes específicos na temática tais como [13], [33], [35], [94], [97], [100], [101]. Como já apresentado, esses artigos tratam exclusivamente de SMDs na Indústria 4.0 e configuram um primeiro passo relevante proporcionado por essa investigação.

Acerca dos impactos que a Indústria 4.0 vem causando nos SMDs, as análises apresentam perspectivas interessantes. Com o uso das tecnologias da Indústria 4.0 é possível ter SMDs mais autônomos e heterogêneos, com medidas de desempenho capazes de capturar contextos locais do ambiente e uma ampla gama de fenômenos do ambiente externo e a análise de uma grande quantidade e variedade de dados contribuirá na descoberta de padrões. A tendência crescente da utilização nos SMDs de informações adequadas fornecidas pela aplicação de *big data analytics* e suas derivações para análise preditiva *online*, principalmente nas áreas de gestão das operações com destaque para a cadeia de suprimentos foi observada na rede de citação de documentos e na rede de acoplamento bibliográfico, bem como os impactos da interconectividade digital da internet das coisas na comunicação industrial.

Esses resultados revelaram a importância estratégica da gestão da cadeia de suprimentos com possibilidade da incorporação do desempenho em uma rede mais ampla, com aplicação das tecnologias da Indústria 4.0. O crescimento de redes complexas de organizações, explorando as principais competências dos processos de negócios e colaborando globalmente para criar valor e vantagem competitiva, exigirá uma avaliação de desempenho dentro da cadeia de suprimentos estendida e do ambiente de negócios da empresa. Isso demandará dos usuários dos SMDs uma compreensão holística de recursos e competências da cadeia de suprimentos. A tendência captada na pesquisa indica que a integração das tecnologias da Indústria 4.0 nos SMDs, pode ajudar no desenvolvimento de sistemas inteligentes que podem causar impacto positivo nos SMDs, principalmente para suportar a gestão da cadeia de suprimentos.

Por fim, a análise bibliométrica da literatura permitiu uma visualização mais ampla do emprego das tecnologias da Indústria 4.0 em SMDs em vários campos de pesquisa, bem como demonstrou que essa proposta pode ser utilizada em vários níveis da organização. O desenvolvimento de estudos em outras áreas da indústria, como por exemplo, a manufatura, ou em outros setores da economia, como serviços e agronegócio, são oportunidades nesse campo de pesquisa. Além disso, a análise bibliométrica foi capaz de endereçar problemas a serem investigados em pesquisas futuras e oferecer novos conhecimentos para apoiar pesquisadores no desenvolvimento de estudos mais aprofundados sobre o tema.

#### REFERÊNCIAS

- [1] M. Bourne, M. Franco-Santos, P. Micheli, and A. Pavlov, "Performance measurement and management: a system of systems perspective," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 8, pp. 2788–2799, 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1404159.
- [2] A. Neely, M. Gregory, and K. Platts, "Performance measurement system design: a literature review and research agenda," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 25, no. 12, pp. 1228–1263, 2005, doi: 10.1108/01443570510633639.
- [3] R. Mello and R. A. Martins, "Can big data analytics enhance performance measurement systems?," *IEEE Eng. Manag. Rev.*, vol. 47, no. 1, pp. 52–57, 2019, doi: 10.1109/EMR.2019.2900645.
- [4] M. Bourne, A. Neely, J. Mills, and K. Platts, "Implementing performance measurement systems: a literature review," *Int. J. Bus. Perform. Manag.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–24, 2003, doi: 10.1504/IJBPM.2003.002097.
- [5] Y. Demchenko, P. Grosso, C. De Laat, and P. Membrey, "Addressing big data issues in scientific data infrastructure," in *2013 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, 2013, pp. 48–55, doi: 10.1109/CTS.2013.6567203.
- [6] P. Zikopoulos, C. Eaton, D. Deroos, T. Deutsch, and G. Lapis, *Understanding Big Data: analytics for enterprise class Hadoop and streaming data*. McGraw-Hill, 2012.
- [7] R. Mello, L. R. Leite, and R. A. Martins, "Is big data the next big thing in performance measurement systems?," in *IEEE Annual Conference and Expo 2014*, 2014, pp. 1837–1846.
- [8] U. Bititci, P. Garengo, V. Dörfler, and S. Nudurupati, "Performance measurement: challenges for tomorrow," *Int. J. Manag. Rev.*, vol. 14, no. 3, pp. 305–327, 2012, doi: 10.1111/j.1468-2370.2011.00318.x.
- [9] A. Genovese, S. C. Lenny Koh, N. Kumar, and P. K. Tripathi, "Exploring the challenges in implementing supplier environmental performance measurement models: A case study," *Prod. Plan. Control*, vol. 25, no. 13–14, pp. 1198–1211, 2014, doi: 10.1080/09537287.2013.808839.
- [10] K. Jung, S. S. Choi, B. Kulvatunyou, H. Cho, and K. C. Morris, "A reference activity model for smart factory design and improvement," *Prod. Plan. Control*, vol. 28, no. 2, pp. 108–122, 2017, doi: 10.1080/09537287.2016.1237686.
- [11] D. Trotta and P. Garengo, "Industry 4.0 key research topics: a bibliometric review," in *2018 7th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)*, 2018, pp. 113–117, doi: 10.1109/ICITM.2018.8333930.
- [12] I. V. Ferreira, J. A. Bighetti, and E. P. Godoy, "Development of a Wireless Gateway for Industrial Internet of Things Applications," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 17, no. 10, pp. 1637–1644, 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.8986441.
- [13] S. S. Nudurupati, S. Tebboune, and J. Hardman, "Contemporary performance measurement and management (PMM) in digital economies," *Prod. Plan. Control*, vol. 27, no. 3, pp. 226–235, 2016, doi: 10.1080/09537287.2015.1092611.
- [14] S. S. Nudurupati, U. S. Bititci, V. Kumar, and F. T. S. Chan, "State of the art literature review on performance measurement," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 60, no. 2, pp. 279–290, 2011, doi: 10.1016/j.cie.2010.11.010.
- [15] M. Lebas and K. Euske, "A conceptual and operational delineation of performance," in *Business performance measurement: theory and practice*, Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2002, pp. 65–79.
- [16] L. Berrah, G. Mauris, and F. Vernadat, "Information aggregation in industrial performance measurement: rationales, issues and definitions," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 42, no. 20, pp. 4271–4293, 2004, doi: 10.1080/00207540410001716534.
- [17] M. Franco-Santos, L. Lucianetti, and M. Bourne, "Contemporary performance measurement systems: a review of their consequences and a framework for research," *Manag. Account. Res.*, vol. 23, no. 2, pp. 79–119, 2012, doi: 10.1016/j.mar.2012.04.001.
- [18] V. Maestrini, D. Luzzini, P. Maccarrone, and F. Caniato, "Supply chain performance measurement systems: a systematic review and research agenda," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 183, pp. 299–315, 2017, doi: 10.1016/j.ijpe.2016.11.005.
- [19] A. Tung, K. Baird, and H. P. Schoch, "Factors influencing the effectiveness of performance measurement systems," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 31, no. 12, pp. 1287–1310, 2011, doi: 10.1108/01443571111187457.
- [20] M. Kennerley and A. Neely, "Measuring performance in a changing business environment," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 23, no. 2, pp. 213–229, 2003, doi: 10.1108/01443570310458465.
- [21] K. Schwab, *The fourth industrial revolution*, 1st ed. Cologny/Geneva, Switzerland: World Economic Forum, 2016.
- [22] R. Drath and A. Horch, "Industrie 4.0: hit or hype?," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, IEEE, pp. 56–58, 2014.
- [23] T. Lerher, "Warehousing 4.0 by using shuttlebased storage and retrieval systems," *FME Trans.*, vol. 46, no. 3, pp. 381–385, 2018, doi: 10.5937/fmet1803381L.
- [24] C. Öberg and G. Graham, "How smart cities will change supply chain

- management: a technical viewpoint,” *Prod. Plan. Control*, vol. 27, no. 6, pp. 529–538, 2016, doi: 10.1080/09537287.2016.1147095.
- [25] P. K. Muhuri, A. K. Shukla, and A. Abraham, “Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 78, pp. 218–235, 2019, doi: 10.1016/j.engappai.2018.11.007.
- [26] P. Zawadzki and K. Zywicki, “Smart product design and production control for effective mass customization in the industry 4.0 concept,” *Manag. Prod. Eng. Rev.*, vol. 7, no. 3, pp. 105–112, 2016, doi: 10.1515/MPER-2016-0030.
- [27] F. Li, A. Nucciarelli, S. Roden, and G. Graham, “How smart cities transform operations models: A new research agenda for operations management in the digital economy,” *Prod. Plan. Control*, vol. 27, no. 6, pp. 514–528, 2016, doi: 10.1080/09537287.2016.1147096.
- [28] R. Geissbauer, J. Vedso, and S. Schrauf, “Industry 4.0: building the digital enterprise,” 2016. [Online]. Available: <https://www.pwc.com/id/en/CIPS/assets/industry-4.0-building-your-digital-enterprise.pdf>.
- [29] E. Hofmann and M. Rüsche, “Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics,” *Comput. Ind.*, vol. 89, pp. 23–34, 2017, doi: 10.1016/j.compind.2017.04.002.
- [30] M. Rübmann *et al.*, “Industry 4.0: the future of productivity and growth in manufacturing,” 2015. [Online]. Available: [https://www.bcg.com/pt-br/publications/2015/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_4\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries](https://www.bcg.com/pt-br/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries).
- [31] B. Hu and D. Kostamis, “Managing supply disruptions when sourcing from reliable and unreliable suppliers,” *Prod. Oper. Manag.*, vol. 24, no. 5, pp. 808–820, 2015, doi: 10.1111/poms.12293.
- [32] H. Maddern, P. A. Smart, R. S. Maull, and S. Childe, “End-to-end process management: implications for theory and practice,” *Prod. Plan. Control*, vol. 25, no. 16, pp. 1303–1321, 2014, doi: 10.1080/09537287.2013.832821.
- [33] G. Hwang, J. Lee, J. Park, and T. W. Chang, “Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 9, pp. 2590–2602, 2017, doi: 10.1080/00207543.2016.1245883.
- [34] R. F. Babiceanu and R. Seker, “Big Data and virtualization for manufacturing cyber-physical systems: a survey of the current status and future outlook,” *Comput. Ind.*, vol. 81, pp. 128–137, 2016, doi: 10.1016/j.compind.2016.02.004.
- [35] S. Kumaraguru, B. Kulvatunyou, and K. C. Morris, “Integrating real-time analytics and continuous performance management in smart manufacturing systems,” in *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS)*, 2014, vol. 440, pp. 175–182, doi: 10.1007/978-3-662-44733-8\_22.
- [36] F. A. R. Silva, “Analytical intelligence in processes: data science for business,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 8, pp. 2240–2247, 2018, doi: 10.1109/TLA.2018.8528241.
- [37] N. K. Gimenez Isasi, E. Morosini Frazzon, and M. Uriona, “Big data and business analytics in the supply chain: a review of the literature,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 10, pp. 3382–3391, 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7387245.
- [38] A. Bonci, M. Pirani, and S. Longhi, “Robotics 4.0: performance improvement made easy,” *IEEE Int. Conf. Emerg. Technol. Fact. Autom. ETFA*, pp. 1–8, 2017, doi: 10.1109/ETFA.2017.8247682.
- [39] L. M. Kipper, L. B. Furstenuau, D. Hoppe, R. Frozza, and S. Iepsen, “Scopus scientific mapping production in industry 4.0 (2011–2018): a bibliometric analysis,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 6, pp. 1605–1627, 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1671625.
- [40] G. Chueke and M. Amatucci, “O que é bibliometria? Uma introdução ao Fórum,” *Rev. Eletrônica Negócios Int.*, vol. 10, no. 2, pp. 1–5, 2015, doi: 10.18568/1980-48651021-52015.
- [41] F. Caviggioli and E. Ughetto, “A bibliometric analysis of the research dealing with the impact of additive manufacturing on industry, business and society,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 208, pp. 254–268, 2019, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.11.022.
- [42] I. Zupic and T. Čater, “Bibliometric methods in management and organization,” *Organ. Res. Methods*, vol. 18, no. 3, pp. 429–472, 2015, doi: 10.1177/1094428114562629.
- [43] M. Aria and C. Cuccurullo, “bibliometrix: an R-tool for comprehensive science mapping analysis,” *J. Informetr.*, vol. 11, no. 4, pp. 959–975, 2017, doi: 10.1016/j.joi.2017.08.007.
- [44] S. A. Morris and B. Van Der Veer Martens, “Mapping research specialties,” in *Annual Review of Information Science and Technology*, vol. 42, 2008, pp. 213–295.
- [45] N. Matloff, *The Art of R Programming: A Tour of Statistical Software Design*. São Francisco, USA: No Starch Press, 2011.
- [46] N. J. van Eck and L. Waltman, “Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping,” *Scientometrics*, vol. 84, no. 2, pp. 523–538, 2010, doi: 10.1007/s11192-009-0146-3.
- [47] Q. He, “Knowledge discovery through co-word analysis,” *Libr. Trends*, vol. 48, no. 1, pp. 133–159, 1999.
- [48] X. Y. Leung, J. Sun, and B. Bai, “Bibliometrics of social media research: a co-citation and co-word analysis,” *Int. J. Hosp. Manag.*, vol. 66, pp. 35–45, 2017, doi: 10.1016/j.ijhm.2017.06.012.
- [49] V. L. S. Guedes and S. Borschiver, “Bibliometria: uma ferramenta estatística para a gestão da informação e do conhecimento, em sistemas de informação e de comunicação e de avaliação científica e tecnológica,” in *Encontro Nacional de Ciência da Informação*, 2005, pp. 1–18.
- [50] E. O. Lucas, J. C. Garcia-Zorita, and E. Sanz-Casado, “Evolução histórica de investigação em informetria: ponto de vista espanhol,” *Liinc em Rev.*, vol. 9, no. 1, pp. 255–270, 2013, doi: 10.18617/liinc.v9i1.509.
- [51] R. P. Smiraglia, “ISKO 11’s diverse bookshelf: an editorial,” *Knowl. Organ.*, vol. 38, no. 3, pp. 179–186, 2011, doi: 10.5771/0943-7444-2011-3-179.
- [52] X. Xu, X. Chen, F. Jia, S. Brown, Y. Gong, and Y. Xu, “Supply chain finance: a systematic literature review and bibliometric analysis,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 204, pp. 160–173, 2018, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.08.003.
- [53] T. Bellardo, “The use of co-citations to study science,” *Libr. Res.*, vol. 2, no. 3, pp. 231–237, 1980.
- [54] L. R. Leite, “Systematic literature review on performance measurement and sustainability,” in *American Society for Engineering Management (ASEM)*, 2012, pp. 869–878.
- [55] J. Davis, T. Edgar, J. Porter, J. Bernaden, and M. Sarli, “Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 47, pp. 145–156, 2012, doi: 10.1016/j.compchemeng.2012.06.037.
- [56] J. Zhou, R. Qingyang Hu, and Y. Qian, “Scalable distributed communication architectures to support advanced metering infrastructure in smart grid,” *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 23, no. 9, pp. 1632–173, 2012, doi: 10.1109/TPDS.2012.53.
- [57] Q. Wu *et al.*, “Cognitive internet of things: a new paradigm beyond connection,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 2, pp. 129–143, 2014, doi: 10.1109/JIOT.2014.2311513.
- [58] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, “What is LiFi?,” *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 1533–1544, 2016, doi: 10.1109/JLT.2015.2510021.
- [59] P. K. Sharma, M. Y. Chen, and J. H. Park, “A software defined fog node based distributed blockchain cloud architecture for IoT,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 115–124, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2757955.
- [60] F. Leimkuhler and Y. Chen, “A Relationship between Lotka’s Law, Bradford’s Law, and Zipf’s Law,” *J. Am. Soc. Inf. Sci.*, vol. 37, no. 5, pp. 307–314, 1986.
- [61] F. Osareh and E. Mostafavi, “Lotka’s Law and authorship distribution in Computer Science using Web of Science (WoS) during 1986–2009,” *Collnet J. Sci. Inf. Manag.*, vol. 5, no. 2, pp. 171–183, 2011, doi: 10.1080/09737766.2011.10700911.
- [62] N. J. Van Eck and L. Waltman, “Visualizing Bibliometric Networks,” in *Measuring scholarly impact: methods and practice*, Springer, 2014, pp. 285–320.
- [63] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, “The internet of things: a survey,” *Comput. Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010, doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.010.
- [64] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, “Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013, doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.
- [65] M. Wollschlaeger, S. Sauter, and J. Jasperneite, “The future of industrial communication: automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0,” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 11, no. 1, pp. 17–27, 2017.
- [66] R. S. Kaplan and D. P. Norton, “Using the Balanced Scorecard as a strategic management system,” *Harvard Business Review*, p. 14, 1996.
- [67] A. Neely, “The performance measurement revolution: why now and what next?,” *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 19, no. 2, pp. 205–228, 1999, doi: 10.1108/01443579910247437.

- [68] B. M. Beamon, "Measuring supply chain performance," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 19, no. 3, pp. 275–292, 1999, doi: 10.1108/01443579910249714.
- [69] S. A. Melnyk, U. Bititci, K. Platts, J. Tobias, and B. Andersen, "Is performance measurement and management fit for the future?," *Manag. Account. Res.*, vol. 25, no. 2, pp. 173–186, 2014, doi: 10.1016/j.mar.2013.07.007.
- [70] P. Taticchi, F. Tonelli, and L. Cagnazzo, "Performance measurement and management: a literature review and a research agenda," *Meas. Bus. Excell.*, vol. 14, no. 1, pp. 4–18, 2010, doi: 10.1108/13683041011027418.
- [71] M. Bourne, J. Mills, M. Wilcox, A. Neely, and K. Platts, "Designing, implementing and updating performance measurement systems," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, vol. 20, no. 7, pp. 754–771, 2000, doi: 10.1108/01443570010330739.
- [72] S. LaValle, E. Lesser, R. Shockley, M. S. Hopkins, and N. Kruschwitz, "Big Data, analytics and the path from insights to value," *MIT Sloan Management Review*, vol. 52, no. 2, pp. 21–31, 2011.
- [73] H. Chen, R. H. L. Chiang, and V. C. Storey, "Business intelligence and analytics: from big data to big impact," *MIS Q.*, vol. 36, no. 4, pp. 1165–1188, 2012.
- [74] A. McAfee and E. Brynjolfsson, "Big data: the management revolution," *Harvard Business Review*, vol. 90, no. 10, p. 4, 2012.
- [75] V. Mayer-Schönberger and K. Cukier, *Big data: a revolution that will transform how we live, work, and think*. New York, USA: Houghton Mifflin Harcourt, 2013.
- [76] T. H. Davenport, "How strategists use 'big data' to support internal business decisions, discovery and production," *Strateg. Leadersh.*, vol. 42, no. 4, pp. 45–50, 2014, doi: 10.1108/SL-05-2014-0034.
- [77] S. F. Wamba, S. Akter, A. Edwards, G. Chopin, and D. Gnanzou, "How 'big data' can make big impact: findings from a systematic review and a longitudinal case study," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 165, pp. 234–246, 2015, doi: 10.1016/j.ijpe.2014.12.031.
- [78] G. Wang, A. Gunasekaran, E. W. T. Ngai, and T. Papadopoulos, "Big data analytics in logistics and supply chain management: certain investigations for research and applications," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 176, pp. 98–110, 2016, doi: 10.1016/j.ijpe.2016.03.014.
- [79] M. A. Waller and S. E. Fawcett, "Data science, predictive analytics, and big data: a revolution that will transform supply chain design and management," *J. Bus. Logist.*, vol. 34, no. 2, pp. 77–84, 2013, doi: 10.1111/jbl.12010.
- [80] A. Gunasekaran *et al.*, "Big data and predictive analytics for supply chain and organizational performance," *J. Bus. Res.*, vol. 70, pp. 308–317, 2017, doi: 10.1016/j.jbusres.2016.08.004.
- [81] S. Akter, S. F. Wamba, A. Gunasekaran, R. Dubey, and S. J. Childe, "How to improve firm performance using big data analytics capability and business strategy alignment?," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 182, pp. 113–131, 2016, doi: 10.1016/j.ijpe.2016.08.018.
- [82] S. F. Wamba, A. Gunasekaran, S. Akter, S. J. fan Ren, R. Dubey, and S. J. Childe, "Big data analytics and firm performance: effects of dynamic capabilities," *J. Bus. Res.*, vol. 70, pp. 356–365, 2017, doi: 10.1016/j.jbusres.2016.08.009.
- [83] M. Gupta and J. F. George, "Toward the development of a big data analytics capability," *Inf. Manag.*, vol. 53, no. 8, pp. 1049–1064, 2016, doi: 10.1016/j.im.2016.07.004.
- [84] B. T. Hazen, C. A. Boone, J. D. Ezell, and L. A. Jones-Farmer, "Data quality for data science, predictive analytics, and big data in supply chain management: an introduction to the problem and suggestions for research and applications," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 154, pp. 72–80, 2014, doi: 10.1016/j.ijpe.2014.04.018.
- [85] H. Lasi, P. Fettke, H. G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, "Industry 4.0," *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, 2014, doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- [86] R. Schmidt, M. Möhring, R. C. Härtling, C. Reichstein, P. Neumaier, and P. Jozinović, "Industry 4.0 - Potentials for creating smart products: empirical research results," in *18th International Conference on Business Information Systems*, 2015, vol. 208, pp. 16–27.
- [87] J. Lee, H. A. Kao, and S. Yang, "Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment," *Procedia CIRP*, vol. 16, pp. 3–8, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.02.001.
- [88] H. Kagermann, W. Wahlster, and J. Helbig, "Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0," 2013.
- [89] J. Lee, B. Bagheri, and H. A. Kao, "A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems," *Manuf. Lett.*, vol. 3, pp. 18–23, 2015, doi: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
- [90] M. Hermann, T. Pentek, and B. Otto, "Design principles for industrie 4.0 scenarios," in *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, 2016, pp. 3928–3937, doi: 10.1109/HICSS.2016.488.
- [91] D. Ivanov, A. Dolgui, B. Sokolov, F. Werner, and M. Ivanova, "A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 54, no. 2, pp. 386–402, 2016, doi: 10.1080/00207543.2014.999958.
- [92] A. Sanders, C. Elangeswaran, and J. Wulfsberg, "Industry 4.0 implies lean manufacturing: research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing," *J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 9, no. 3, pp. 811–833, 2016, doi: 10.3926/jiem.1940.
- [93] Y. Liao, F. Deschamps, E. de F. R. Loures, and L. F. P. Ramos, "Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 55, no. 12, pp. 3609–3629, 2017, doi: 10.1080/00207543.2017.1308576.
- [94] S. S. Kamble and A. Gunasekaran, "Big data-driven supply chain performance measurement system: a review and framework for implementation," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 1, pp. 65–86, 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1630770.
- [95] D. Appelbaum, A. Kogan, M. Vasarhelyi, and Z. Yan, "Impact of business analytics and enterprise systems on managerial accounting," *Int. J. Account. Inf. Syst.*, vol. 25, pp. 29–44, 2017, doi: 10.1016/j.accinf.2017.03.003.
- [96] S. Krishnamoorthi and S. K. Mathew, "Business analytics and business value: a comparative case study," *Inf. Manag.*, vol. 55, no. 5, pp. 643–666, 2018, doi: 10.1016/j.im.2018.01.005.
- [97] A. Raffoni, F. Visani, M. Bartolini, and R. Silvi, "Business performance analytics: exploring the potential for performance management systems," *Prod. Plan. Control*, vol. 29, no. 1, pp. 51–67, 2018, doi: 10.1080/09537287.2017.1381887.
- [98] S. Jeble, R. Dubey, S. J. Childe, T. Papadopoulos, D. Roubaud, and A. Prakash, "Impact of big data and predictive analytics capability on supply chain sustainability," *Int. J. Logist. Manag.*, vol. 29, no. 2, pp. 513–538, 2018, doi: 10.1108/IJLM-05-2017-0134.
- [99] G. Gravili, M. Benvenuto, A. Avram, and C. Viola, "The influence of the Digital Divide on Big Data generation within supply chain management," *Int. J. Logist. Manag.*, vol. 29, no. 2, pp. 592–628, 2018, doi: 10.1108/IJLM-06-2017-0175.
- [100] A. J. Dwekat, G. Hwang, and J. Park, "A supply chain performance measurement approach using the internet of things," *Ind. Manag. Data Syst.*, vol. 117, no. 2, pp. 267–286, 2017, doi: 10.1108/IMDS-03-2016-0096.
- [101] M. Rezaei, M. A. Shirazi, and B. Karimi, "IoT-based framework for performance measurement," *Ind. Manag. Data Syst.*, vol. 117, no. 4, pp. 688–712, 2017, doi: 10.1108/IMDS-08-2016-0331.



**Marcelo Almir Lopes** possui graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos (1997) e mestrado em Ciências pela Universidade de São Paulo (2012). Atualmente é candidato de doutorado em Engenharia de Produção na Universidade Federal de São Carlos. Pesquisa os seguintes temas: Sistema de Medição de Desempenho e Indústria 4.0.



**Dr. Roberto A. Martins** possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade de São Paulo. Atualmente é Professor Titular da Universidade Federal de São Carlos com interesses nos seguintes temas de pesquisa: Sistemas de Medição de Desempenho para Gestão de Cadeias de Suprimentos Sustentáveis, Uso de Big Data Analytics em Sistemas de Medição de Desempenho e Qualidade 4.0.