

Uma revisão bibliométrica sobre Sistemas Ciber-físicos (2008 - 2019): aplicação da teoria do enfoque meta analítico consolidado

Lucas Caldas Danelon Lopes, (Engenharia de Produção/Faculdade de Tecnologia/ Universidade de Brasília),
lucascaldasdanelon@gmail.com

Milena Rodrigues Santos, (Engenharia de Produção/Faculdade de Tecnologia/ Universidade de Brasília)
milena.mrsantos@gmail.com

Ari Melo Mariano, (Engenharia de Produção/Faculdade de Tecnologia/ Universidade de Brasília)
arimariano@unb.br

Resumo: Este estudo teve como objetivo consolidar a literatura de impacto presente em Web of Science e Scopus, sobre Sistemas Ciber-Físicos (CPS) entre os anos de 2008 e 2019, demonstrando os anos de publicação, o número de citações por ano, principais países, palavras-chave, principais artigos, autores e suas linhas de pesquisa. Para isto, utilizou-se a Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado e os métodos de *co-citation*, *bibliographic coupling* e *Text Field*. Foram utilizadas as plataformas *Web of Science* e *Scopus* para a obtenção dos dados e o software *VosViewer* para a visualização da densidade de informação em mapas de calor. Verificou-se que o tema tem relevância mundial, mas desenvolve-se principalmente na Alemanha e que seus principais autores László Monostori (2014 e 2016) e Lee Jay (2015) abordam desde a conceituação de sistemas ciber-físicos, ramos de pesquisa e desenvolvimento e as dificuldades de implementação, e que existem revisões bibliográficas como a de Edward A. Lee (2015) que demonstram a aplicação dos CPS por meio de modelos determinísticos em projetos.

Palavras chave: Sistemas Ciber-físicos, Indústria 4.0, Bibliometria, Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado.

A Bibliometric Review on Cyber-Physical Systems (2008 - 2019): Applying the Consolidated Meta-Focus Approach Theory

Abstract: This study aims to identify the state of research on cyber-physical systems (CPS) between 2008 and 2019, identify the years of publication, the number of citations per year, main countries, keywords, main articles, authors and their lines of research. For this, the Theory Consolidated of the Analytical Approach was used with the methods of citation, bibliographic coupling and Text Field. They platforms Web of Science, Scopus were used for data analysis and VosViewer software for visualizing their heat maps. This topic has worldwide relevance, but it's developed mainly in Germany and its main authors László Monostori (2014 and 2016) and Lee Jay (2015) explains since the cyber-technical systems theory, research and development branches and its difficulties of implementation. Besides that there are bibliographic analyzes such as Edward A. Lee (2015) that demonstrates the application of CPS through deterministic models in projects.

Key-words: Cyber-physical systems (CPS), Industry 4.0, Bibliometrics, Theory Consolidated of the Analytical Approach (TEMAC)

1. Introdução

É notória a necessidade de desenvolvimento da indústria para acompanhar o crescente mercado consumidor e o surgimento da Indústria 4.0, com maior produtividade e interconexão entre as áreas de uma indústria, além de sistemas de produção considerados mais flexíveis (LEITÃO et. al, 2016).

Nesse contexto surgiram os Sistemas Ciber-Físicos (CPS), considerados sistemas computacionais que possuem uma conexão abundante com o mundo físico (ACATHECH , 2012), desse modo, sendo projetado para a interação de uma rede de elementos físicos e cibernéticos (LEITÃO et. al, 2016). Para exemplificar, existem tecnologias já existentes que usam o conceito de CPS como carros autônomos, edifícios inteligentes e fabricação inteligente.

Deste modo, este estudo busca responder: quais os principais autores do tema de Sistemas Ciber-Físicos (CPS) ? Quais os principais fronts?

Compreender os principais avanços da área de CPS e para onde se caminha é importante para saber os desafios para implementação, aceitação e uso destes sistemas.

Assim, este artigo por objetivo consolidar a literatura de impacto presente em Web of Science e Scopus, sobre Sistemas Ciber-Físicos (CPS) entre os anos de 2008 e 2019. Por conseguinte, para a investigação dos dados o *software VosViewer* foi utilizado com o propósito de visualizar a densidade de informações em forma de mapas de calor. No tópico 2 é apresentado o método utilizado, no 3 a revisão bibliográfica e os resultados e finalizando com as considerações finais no tópico 4.

2. Metodologia

Este estudo é do tipo exploratório, com abordagem quantitativa, utilizando a Teoria do Enfoque Meta Analítico Consolidado – TEMAC, de Mariano e Rocha (2017), que está dividida em três passos: (i) Preparação da pesquisa, (ii) Apresentação e interrelação dos dados, (iii) Detalhamento, modelo integrador e validação por evidências (disponível em www.pesquisatemac.com) .

A preparação da pesquisa consistiu em estabelecer os parâmetros de busca para sistemas de produção ciber-físicos em plataformas de pesquisa confiáveis. Foram utilizadas duas bases de dados (*Web of Science* – WOS, por representar uma base sólida e internacional da ciência, a plataforma *Scopus* – uma base de dados mais ampla que aceita outros idiomas).

A pesquisa na base de dados *Web of Science* foi realizada entre os dias 31/08/2019 e 01/09/2019, com o seguinte protocolo de pesquisa:

Protocolo de Pesquisa	
<i>Web of Science</i>	Resultados
Palavra-chave	"cyber-physical systems"
Período de análise	2008 – 2019
Tipo	Tópicos
Resultado inicial	6.096

Categorias do <i>Web of Science</i>	<i>Engineering Industrial (456) / Engineering Manufacturing (256)</i>
Resultado final	588
Extração de dados	500

Fonte: *Web of Science* (2019)

Tabela 1 – Protocolo de pesquisa na plataforma *Web of Science*

Protocolo de Pesquisa	
<i>Web of Science</i>	Resultados
Palavra-chave	<i>"cyber-physical systems"</i>
Período de análise	2016 – 2019
Tipo	Tópicos
Resultado inicial	4.147
Categorias do <i>Web of Science</i>	<i>Engineering Industrial (346) / Engineering Manufacturing (227)</i>
Resultado final	466

Fonte: *Web of Science* (2019)

Tabela 2 – Protocolo de pesquisa para *coupling* na plataforma *Web of Science*

A pesquisa na base de dados *Scopus* foi realizada entre os dias 31/08/2019 e 01/09/2019, com o seguinte protocolo de pesquisa:

Protocolo de Pesquisa	
<i>Scopus</i>	Resultados
Palavra-chave	<i>"cyber-physical systems"</i>
Período de análise	2008 – Present
Tipo	<i>Article title, Abstract, Keywords</i>
Resultado inicial	508
Categorias do <i>Web of Science</i>	<i>Engineering (394)</i>
Resultado final	394

Fonte: *Scopus* (2019)

Tabela 3 – Protocolo de pesquisa na plataforma *Scopus*

Protocolo de Pesquisa	
<i>Scopus</i>	Resultados
Palavra-chave	<i>"cyber-physical systems"</i>
Período de análise	2016 – Present
Tipo	<i>Article title, Abstract, Keywords</i>
Resultado inicial	371
Categorias do <i>Web of Science</i>	<i>Engineering (291)</i>

Fonte: *Scopus* (2019)

Tabela 4 – Protocolo de pesquisa para *coupling* na plataforma *Scopus*

A exportação dos dados foi realizada nos formatos .txt e .csv para utilização dos dados a posteriori nos *softwares* Excel e *VOSViewer*. A interrelação dos dados foi realizada majoritariamente no software Excel e o detalhamento, modelo integrador e validação por evidências foram realizados por meio de mapeamento científico no *software VOSViewer* versão 1.6.13.

Foi utilizado o método de mapeamento científico para sintetizar o histórico de pesquisas passadas. De acordo com Zupic; Cater (2014) o mapeamento científico é um dos diversos métodos utilizados para realizar a tarefa de sintetizar pesquisas anteriores, sendo uma abordagem quantitativa dos métodos de pesquisa bibliométrica, utilizando os métodos de bibliometria visando investigar e analisar a literatura científica e suas relações.

As análises realizadas via mapeamento se fundamentam nos conceitos de *Co-citation*, *bibliographic coupling* e *Title Field*. O método de *Co-citation* conecta diferentes autores, documentos e revistas baseado nas aparições em conjunto na lista de referência obtida através das bases de dados. O método *Bibliographic Coupling* conecta autores, documentos e revistas baseados no número de referências que compartilham. Por fim, o método de *Title Field* analisa as palavras mais recorrentes nos títulos dos artigos analisados. Segundo Cobo et al (2011), os métodos *Co-citation* e *Bibliographic Coupling* são utilizados na análise da estrutura intelectual de um determinado campo de pesquisa científica, identificando quais as abordagens que mais contribuem (com o método de *Co-citation*) e quais as principais frentes das linhas de pesquisa (com o método *Bibliographic Coupling*).

A questão da pesquisa bibliométrica está relacionada às pesquisas recentes a respeito de Sistemas Ciber-Físicos (CPS). Para a realização da pesquisa, foram escolhidos os métodos *Co-citation*, *Bibliographic Coupling* e *Title Field*.

3. Revisão bibliométrica através do mapeamento científico e resultados

3.1. Interrelação dos dados

A pesquisa realizada possibilitou realizar diversas relações entre os dados extraídos. Inicialmente, obteve-se a relação de quantidade de publicações por ano. Artigos acerca do tema surgiram no ano de 2010 com uma pequena quantidade de artigos, mais precisamente 2 artigos, sendo os primeiros autores: Stamatis Karnouskos relacionando CPS com *SmartGrids*; Xie Lulu e Wang Zhongjie abordando sobre Internet das Coisas (IoT) e CPS. É perceptível que ao longo dos anos ocorreu um crescimento nas publicações relacionadas ao tema, tendo seu auge até dado momento no ano de 2017 com um total de 140 artigos publicados na plataforma *Web Of Science*. Como pode ser observado na figura 1.



Figura 1 – Anos de publicação do tema CPPS na plataforma. Fonte: Web of Science.

Posteriormente, analisou-se a quantidade de citações ao longo dos anos. Como era de se esperar, houve um crescimento de 2011 até o ano presente de quase 100%, passando de 7 citações no primeiro ano analisado à 1468 citações em 2019, como demonstrado na figura 2. Assim, é notório o crescimento da relevância de Sistemas Ciber-Físico no cenário acadêmico mundial.



Figura 2 – Número de citações por ano. Fonte: Web of Science

Além disso, notou-se que o principal país relacionado ao tema é a Alemanha com 28% das publicações seguidos por Estados Unidos e China. Em relação ao Brasil, ele aparece como 13º país em relação ao nº de publicações na plataforma em questão. Como pode-se observar na figura abaixo.

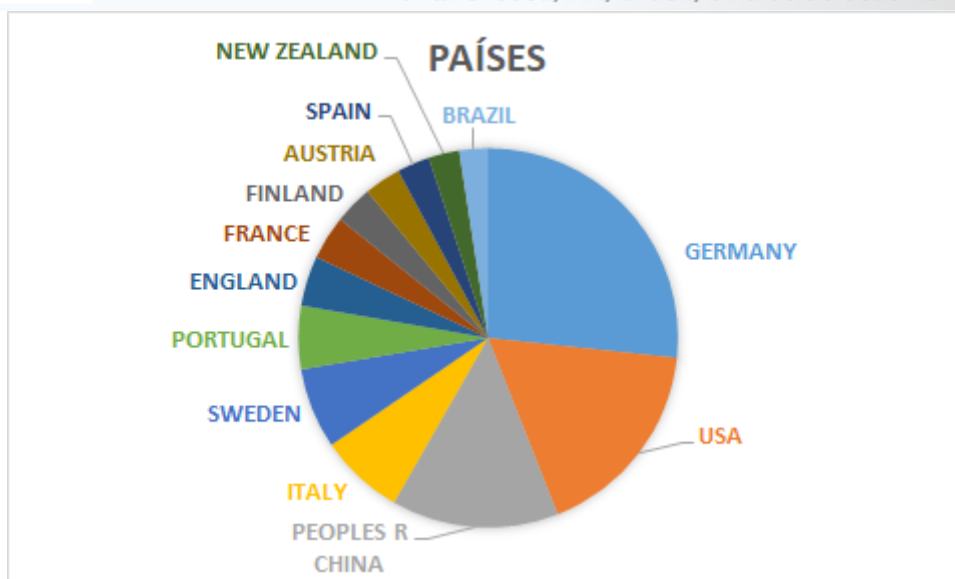


Figura 3 – Países com publicações sobre CPS desde 2008 na plataforma. Fonte: Web of Science.

Por fim, analisou-se os artigos mais citados referentes ao tema de sistemas ciber-físicos que pertencem ao autor László Monostori, professor e doutor da Academia de Ciências da Hungria. Já seu segundo artigo mais citado, em conjunto com os autores Kadar, B.; Bauernhansl, T.; et al., foi publicado 2 anos depois do primeiro. São eles:

Título	Nº de Citações	Ano de publicação
<i>Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D Challenges</i>	283	2014
<i>Cyber-physical systems in manufacturing</i>	211	2016

Fonte: Web of Science

No artigo de 2014 – publicado na *PROCEDIA CIRP* a partir da *47th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS)* – o autor procura deixar claro a relação entre ciência da computação, tecnologia da informação, comunicação e a ciência e tecnologia da manufatura. Como também, explica a convergência entre o mundo virtual e o físico, além de mostrar as origens, expectativas e possíveis linhas de pesquisa e desenvolvimento de sistemas de produção ciber-físicos.

Por fim, foi realizada uma análise das palavras-chave, com a finalidade de identificar as principais linhas de pesquisa. A Figura 4 apresenta o "word cloud" criado pela ferramenta *VosViewer* que realiza análise de conteúdo. Foi realizada a análise de conteúdo utilizando as palavras-chave dos 500 artigos da base Web of Science.

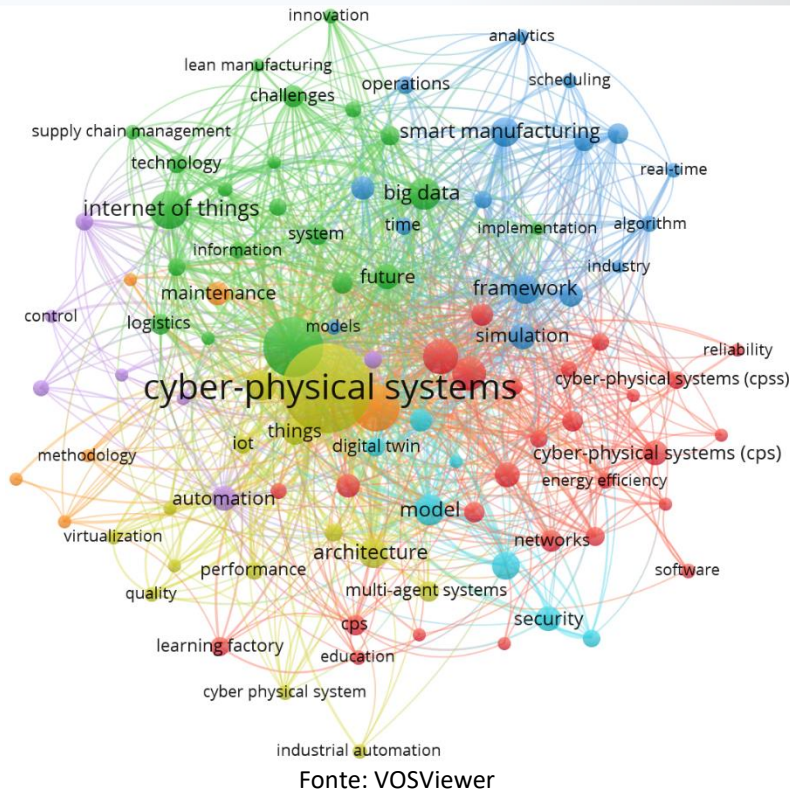


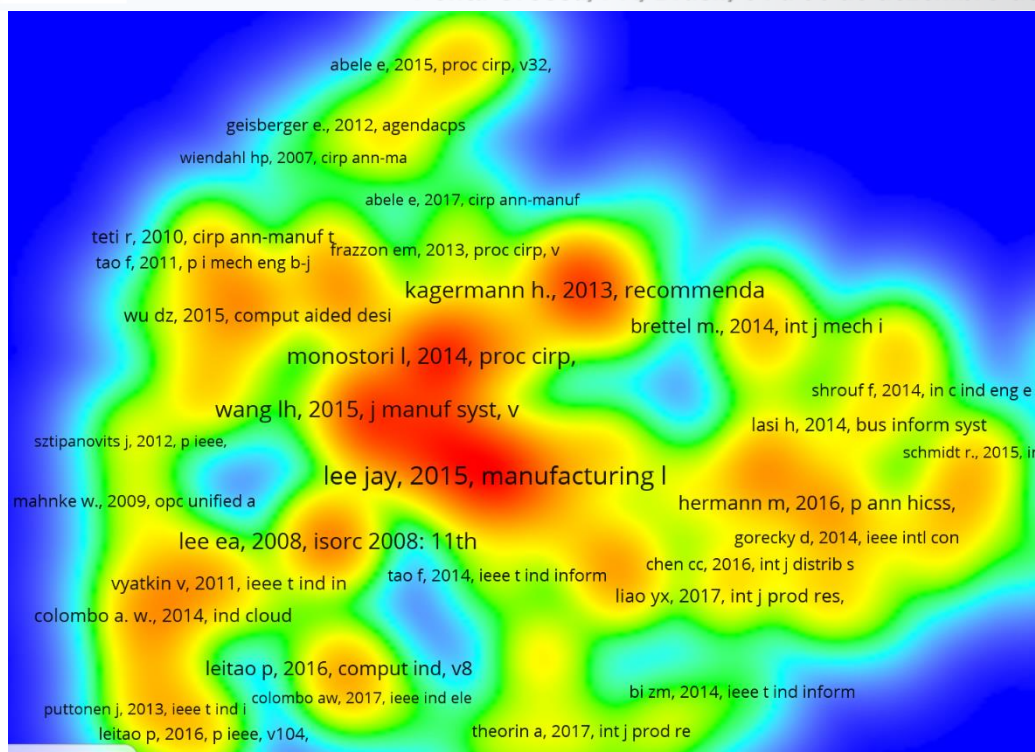
Figura 4 – Palavras-chave dos artigos da base de dados *Web of Science*

Pode-se notar na Figura 5 as palavras-chave com maior destaque: *cyber-physical systems*, *Internet of Things (IoT)*, *big data*, *architecture*, *cyber-physical production systems* e *industry 4.0*. Tais palavras-chave tem correlação entre si pois os sistemas de produção ciber-físicos são vistos como os sistemas base para a quarta revolução industrial (Indústria 4.0), além de serem desenvolvidos a partir da proposta de arquitetura de 5 níveis mencionada por Lee (2015) e Monostori (2016) e se conectam com temas também relacionados à indústria 4.0 como IoT e *Big Data*.

3.2. Detalhamento, modelo integrador e validação por evidências

Para o detalhamento da análise dos autores e dos artigos, ou seja, uma visualização da estrutura conceitual da área, optou-se pelo uso de gráficos chamados mapas de calor. As cores mais quentes e fontes em negrito representam os autores/conceitos que são usados com frequência, enquanto as cores mais frias e fontes menores indicam as palavras que são usadas apenas esporadicamente (ZUPIC e ČATER, 2015).

Foram usadas uma análise bibliométrica de co-citação (Figura 6) e o *Coupling* (Figura 7). A análise de co-citação de referências mostra os artigos citados com regularidade em outros estudos (SERRA et al., 2012).



Fonte: Web of Science

Figura 5 – Co-citation de artigos na plataforma VOSViewer com a base de dados *Web of Science*

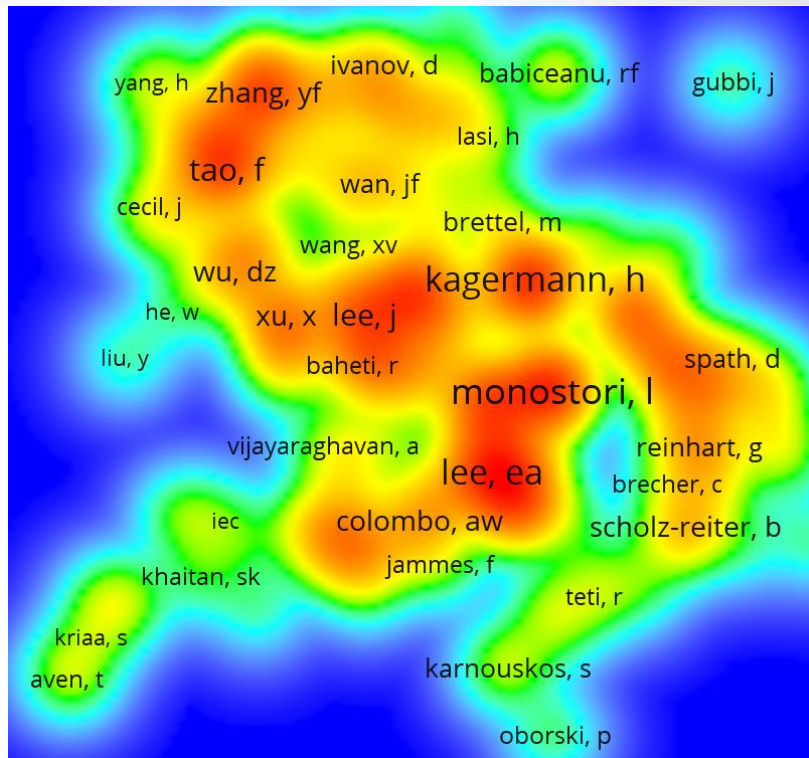
A primeira visualização demonstra uma mancha bem avermelhada, representando os seguintes artigos.

Título	Autor	Ano de publicação
<i>Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0 - based manufacturing system</i>	LEE, Jay; et al	2015
<i>Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D Challenges</i>	MONOSTORI L. WANG, L.;	2014
<i>Current status and advancement of cyber-physical systems in manufacturing</i>	TORNGREN, M.; ONORI, M.;	2015
<i>Recommendations for implementing the strategic initiative industry 4.0</i>	KAGERMANN, H.	2015

Fonte: Web of Science

Tabela 6 – Artigos do mapa de calor de *co-citation*

O artigo de Monostori (2014) apresenta os conceitos de CPS, mostra a relação entre os sistemas virtual e físico, aborda a relação do tema com a indústria 4.0 e elucida a necessidade de pesquisa e desenvolvimento na área. Já o artigo de Lee (2015) apresentam uma arquitetura de 5 níveis do CPS desde o nível de conexão inteligente – que engloba aquisição de dados para monitoramento de processos, máquinas e produção – até o nível de configuração – aplicação das decisões corretivas ou preditivas.

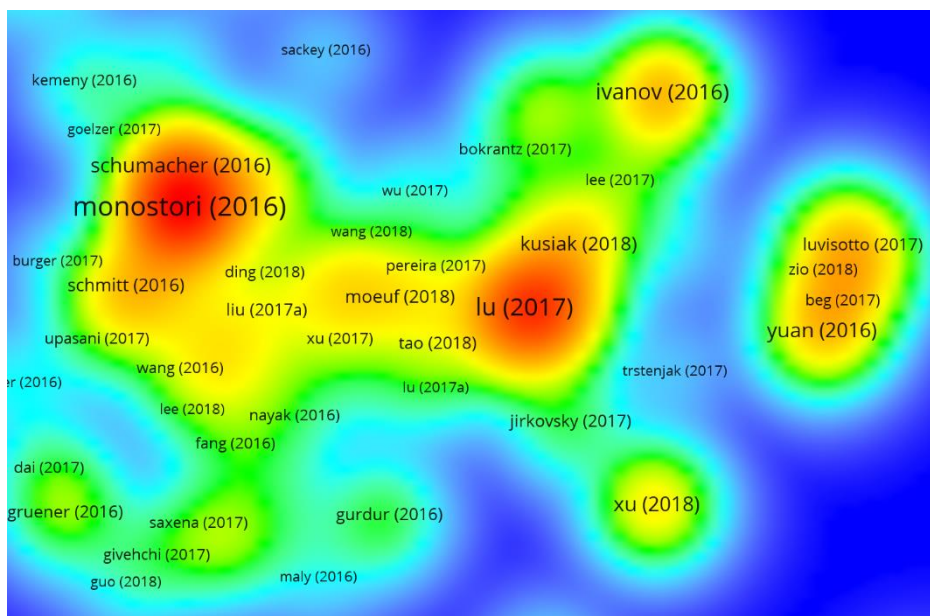


Fonte: Própria

Figura 6 – Co-citation de autores na plataforma VOSViewer com a base de dados *Web of Science*

Na segunda visualização podemos ver os principais autores acerca do tema, tendo destaque Monostori, L – professor e doutor da Academia de Ciência da Hungria; Henning Kagermann – empresário, professor e doutor em física da Universidade de Tecnologia de Braunschweig; Edward Ashford Lee – cientista da computação, engenheiro eletrícista, autor e professor de engenharia elétrica e ciência da computação na UC Berkeley e Jay Lee – professor da Universidade de Cincinnati. Os principais autores podem ser vistos na figura 6, acima.

Já o *coupling*, visualizado na figura abaixo, projeta as principais frentes de pesquisa do tema.



Fonte: Web of Science

 Figura 7 – *Coupling* de autores na plataforma VOSViewer com a base de dados *Web of Science*

A partir das manchas avermelhadas é possível elucidar os seguintes trabalhos, que são as novas frentes de pesquisa do tema.

Título	Autor	Ano de publicação
<i>Cyber-physical systems in manufacturing</i>	MONOSTORI, L.; et al	2016
<i>Industry 4.0: a survey on technologies, applications and open research issues</i>	LU, Y.;	2017
<i>A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises</i>	SCHUMACHER	2016

No artigo de Monostori (2016) et. al, publicado na revista *CIRP Annals - Manufacturing Technology* - o autor aprofunda o conceito de CPS e também comenta sobre os sistemas de produção ciber-físicos (CPPS), realiza uma revisão de literatura sobre o crescimento das pesquisas relacionados ao tema, menciona sobre a arquitetura de 5 níveis que foi aperfeiçoada por Jay Lee em 2015, mostra alguns estudos de caso e enfatiza a necessidade de pesquisa e desenvolvimento acerca do tema.

Por fim, a partir da plataforma Scopus foi possível destacar alguns estudos de revisão sistemática sobre o tema, como mostra a figura a seguir.

Título	Autor	Nº de Citações	Ano de publicação
<i>Game-theoretic methods for the smart grid: An overview of microgrid systems, demand-side management, and smart grid communications</i>	SAAD, W., HAN, Z., POOR, H.V., BASAR, T.	424	2012
<i>Industrie 4.0: Hit or hype?</i>	DRATH, R., HORCH, A.	284	2014
<i>Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues</i>	LU, Y.	252	2017
<i>The past, present and future of cyber-physical systems: A focus on models</i>	LEE, E.A.	174	2015

Saad (2012) menciona em sua revisão sobre como a *SmartGrid* será vista como um sistema ciber-físico em larga escala que abrange tecnologias avançadas de energia, comunicação, controle e computação. Já Lee (2015), comenta sobre a engenharia dos sistemas ciber-físicos por meio de melhores modelos determinísticos e apresenta dois projetos que utilizaram tais modelos: o PRET e o PTides.

4. Considerações Finais

Ao decorrer do texto, os autores buscaram expor e relacionar as publicações, autores, temas de maior magnitude relacionados ao tema CPS (Sistemas Ciber-Físico) através de uma pesquisa bibliométrica entre os anos de 2008 e 2019, utilizando as plataformas *Web Of Science* e *Scopus*, seguindo o método TEMAC (Teoria do enfoque meta-analítico consolidado).

A partir das análises, possibilitou inferir a relação de novas tecnologias com os CPS buscando maior performance dos sistemas de produção e da inter-relação do meio físico com o meio

cibernético no contexto do advento da Indústria 4.0. As publicações iniciaram em 2011 relacionando principalmente o CSP com *SmartGrids* e IoT.

Os artigos mais citados são os de László Monostori e Lee Jay que demonstram uma necessidade latente de pesquisa e desenvolvimento em temas como: sistemas autônomos, sistemas de produção cooperativos, fusão entre sistemas físicos e virtuais, interação entre humanos, máquinas e robôs e a arquitetura de 5 níveis dos CPS. Além disso, o tema possui relevância mundial, pois existem revisões - como a de Edward Lee na plataforma *Scopus* - que validam e aplicam sistemas ciberfísicos por meio de modelos determinísticos em projetos.

Assim, o problema da pesquisa foi solucionado apontando os principais autores e fronts de pesquisa e o objetivo geral foi alcançado.

Para pesquisas futuras, sugere-se um estudo com intuito de observar a aplicação e relação do CPS no mundo atual, considerando a criação de um modelo aplicável às indústrias atuais e realizando pesquisas para elucidar melhor a relação entre CPS e temas como *Internet of Things*, *Big Data*, *cyber-physical production systems* e *industry 4.0*.

Referências

ACATECH. Cyber-Physical Systems: Driving Force for Innovations in Mobility, Health, Energy and Production. Springer Berlin Heidelberg, 2012.

LEE, J.; DAGHERI, D.; KAO, HA.. Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0 - based manufacturing system. *Manufacturing Letters* 3, p. 18-23, 2015.

LEITÃO, P.; LEE, J.. Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems.

LIU, C.; XU, X.. Cyber-Physical machine tool – the era of machine tool 4.0. 2017.

MONOSTORI, L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP* 17, p. 9-13, 2014.

MONOSTORI, L. Cyber-physical production systems: Roots from manufacturing science and technology. 2015.

MONOSTORI, L.; KÁDAR, B.; BAUERNHANSL, T; et al. Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 65, p. 621-641, 2016.

MARIANO, A. M.; ROCHA, M. S.. Revisão de Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora. In: *Anais XXVI Congresso Internacional AEDEM|2017 AEDEM International Conference – Economy, Business and Uncertainty: ideas for a European Mediterranean Industrial Policy*. ISBN: 978-84-697-5592-1. Reggio Calabria-Italia. 2017.

STARK, R.; et al. Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. 2017.

UHLEMANN, T.; LEHMANN, C.; STEINHILPER, R.. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP* 61, p.335-340, 2017.

VOGEL-HEUSER, B.; HESS, D.R.. Guest Editorial Industry 4.0-Prerequisites and Visions. 2015.

VOGEL-HEUSER, B.; LEE, J.; LEITÃO, P.. Agents enabling cyber-physical production systems. 2015.

ZUPIC, I; CATER, T.. Bibliometric Methods in Management and Organization. *Organizational Research Methods*, p. 1-44, 2014.