

Digital twin na manufatura: Uma revisão sistemática da literatura**Digital twin in manufacture: A systematic review of literature**

DOI:10.34117/bjdv6n9-158

Recebimento dos originais: 08/08/2020

Aceitação para publicação: 08/09/2020

Luiz Felipe Simioni Ditzel

Mestrando em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Instituição: Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Endereço: Centro Politécnico, Setor de Tecnologia, Jardim das Américas, Curitiba - PR

CEP: 81.531-990, Caixa postal 19011

E-mail: felipesimioni@hotmail.com

Patrick Fonseca Alexandre

Mestrando em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Instituição: Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Endereço: Centro Politécnico, Setor de Tecnologia, Jardim das Américas, Curitiba - PR

CEP: 81.531-990, Caixa postal 19011

E-mail: patrickf.alexandre@gmail.com

Robson Seleme

Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Instituição: Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Endereço: Centro Politécnico, Setor de Tecnologia, Jardim das Américas, Curitiba - PR

CEP: 81.531-990, Caixa postal 19011

E-mail: robsonseleme@hotmail.com

Wiliam de Assis Silva

Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Instituição: Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Centro Politécnico, Setor de Tecnologia, Jardim das Américas, Curitiba - PR

CEP: 81.531-990, Caixa postal 19011

E-mail: wiliamdeassis@gmail.com

Izabel Cristina Zattar

Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Instituição: Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Endereço: Centro Politécnico, Setor de Tecnologia, Jardim das Américas, Curitiba - PR

CEP: 81.531-990, Caixa postal 19011

E-mail: izabel.zattar@gmail.com

RESUMO

O digital twin está sendo considerado uma grande ferramenta na Indústria 4.0. As tecnologias atuais de comunicação e informação, incluindo processamento de dados, armazenamento e transmissão sem fio, podem ser aproveitadas para refletir o ambiente físico num ambiente virtual. Para entender como o digital twin pode auxiliar a manufatura, este artigo tem como objetivo investigar como ele vem sendo utilizado, através da metodologia da revisão sistemática de literatura. Foi possível analisar o crescimento dos estudos a partir de 2016, em que a engenharia possui a parcela mais significativa dos documentos publicados. Sendo assim, apresentando as diversas aplicações possíveis para o tema, suas vantagens e a necessidade de ser utilizados em conjunto com as outras tecnologias da indústria 4.0. Dentre as principais vantagens estão a assertividade e previsibilidade, pois a cópia virtualizada simula condições reais de operação.

Palavras chave: Gêmeos Digitais, Manufacturing, Industry 4.0

ABSTRACT

The digital twin is considered a great tool in Industry 4.0. Current communication and information technologies, including data processing, storage and wireless transmission, can be leveraged to reflect the physical environment in a virtual environment. To understand how the digital twin can assist manufacturing, this article aims to investigate how it has been used, through the methodology of systematic literature review. It was possible to analyze the growth of studies from 2016, in which engineering has the most significant portion of the published documents. Thus, the various possible applications for the theme, its advantages and the need to be used in conjunction with other technologies in industry 4.0. Among the main advantages are assertiveness and predictability, since the virtualized copy simulates real operating conditions.

Keywords: Digital Twins, Manufacturing, Industry 4.0

1 INTRODUÇÃO

Em 1962, Hobsbawm afirmou que as revoluções industriais alteram os processos de fabricação de produtos, bem como a forma como os consumidores interagem com a produção, permitindo a sofisticação da demanda por diferentes bens de consumo. Corroborando a afirmação 56 anos depois, Sakurai (2018) indica que um dos marcos da evolução da história da humanidade foi o surgimento da indústria e através dos anos com base em constantes inovações tecnológicas, a indústria passou por significativas mudanças e evoluções, as quais serviram como auxílio no desenvolvimento da sociedade, a qual no início do século XXI atravessa uma transformação tecnológica sem precedentes e precisa adaptar-se a todo custo a essa realidade.

A partir de 2011, surge na literatura o termo “Indústria 4.0”, ou “Quarta Revolução Industrial”. Tal definição foi cunhada na feira comercial Hannover Messe, e um grupo de trabalho da Indústria 4.0 foi patrocinado pelo governo federal da Alemanha (LIN *et al.*, 2018). A quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, vem com a proposta de unir as vantagens da produção em larga escala com a individualização, ou seja, personalização dos produtos de acordo com a necessidade do cliente (FRONTONI *et al.*, 2018). De acordo com Rübmann *et al.* (2015), a Indústria 4.0 é alimentada por nove tecnologias fundamentais, sendo elas: internet das coisas, segurança da informação, realidade aumentada, *big data*, robôs autônomos, simulações, manufatura aditiva, sistemas integrados e computação em nuvem.

Dentre as possibilidades de operacionalização dos conceitos da indústria 4.0 identificam-se os modelos de produtos virtuais ou Gêmeos Digitais. Schleich *et al.* (2017) definem que os modelos de produtos virtuais, que são frequentemente chamados de Gêmeos Digitais ou *Digital Twin*, são usados como combustível para encurtar o tempo de comercialização e criar benefícios adicionais ao longo de todo o ciclo de vida. *Digital Twin* (DT) é definido como um modelo muito realista do estado atual do processo e seu próprio comportamento em interação com seu ambiente no mundo real (ROSEN *et al.*, 2015). Ou seja, o *digital twin* coleta, recebe e avalia informações, permitindo que a partir dos resultados e sínteses obtidas, haja um planejamento, gerenciamento e ações com objetivos de reduzir custos, agilizar ciclos de produção, otimizar processos e prever futuras dificuldades, detectando situações ineficientes prevendo demandas.

A internet das coisas permite que o modelo do *digital twin* suporte novos serviços inteligentes para conectar e interagir com o objeto físico (WANG *et al.*, 2014). Tao et al. (2014) afirmam, que estes recursos permitem que as fábricas realizem e conduzam novos modelos de negócios, como simulação em tempo real e previsão de falhas, tomando decisões mais assertivas e diminuindo o risco de falhas.

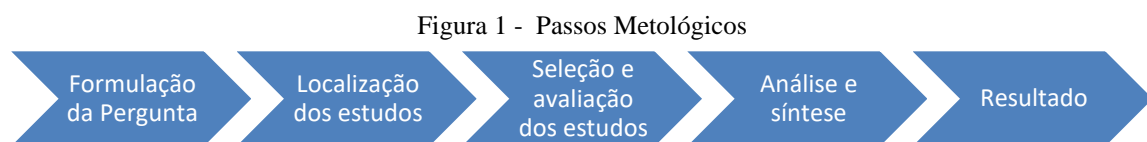
Sendo assim, este artigo tem como objetivo investigar como o *digital twin* pode auxiliar a manufatura. Portanto, esta pesquisa se justifica por considerar a Indústria 4.0 uma nova quebra de paradigma e de bastante relevância no que se refere à fábrica inteligente e integração de meios físicos a meios virtuais.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: O item 1 – Introdução, apresenta os conceitos da indústria 4.0, bem como os conceitos sobre *Digital Twin* que dão base para esta pesquisa. O item 2 – Metodologia, apresenta a metodologia empregada para a realização do estudo, onde foi utilizada a revisão sistemática da literatura. O item 3 – Resultados, apresenta os resultados graficamente e por fim, o item 4 – Síntese, apresenta um resumo dos artigos encontrados.

2 METODOLOGIA

Para se atingir o objetivo proposto, optou-se pela utilização da revisão sistemática da literatura a qual trata de uma investigação focada em uma questão bem definida, que tem como premissa identificar, selecionar, avaliar e sintetizar as evidências relevantes disponíveis.

Com a definição do tipo de análise, definiu-se os passos metodológicos da revisão sistemática propostos por Denyer e Tranfield (2009), para a execução do trabalho, como mostra a figura 1.

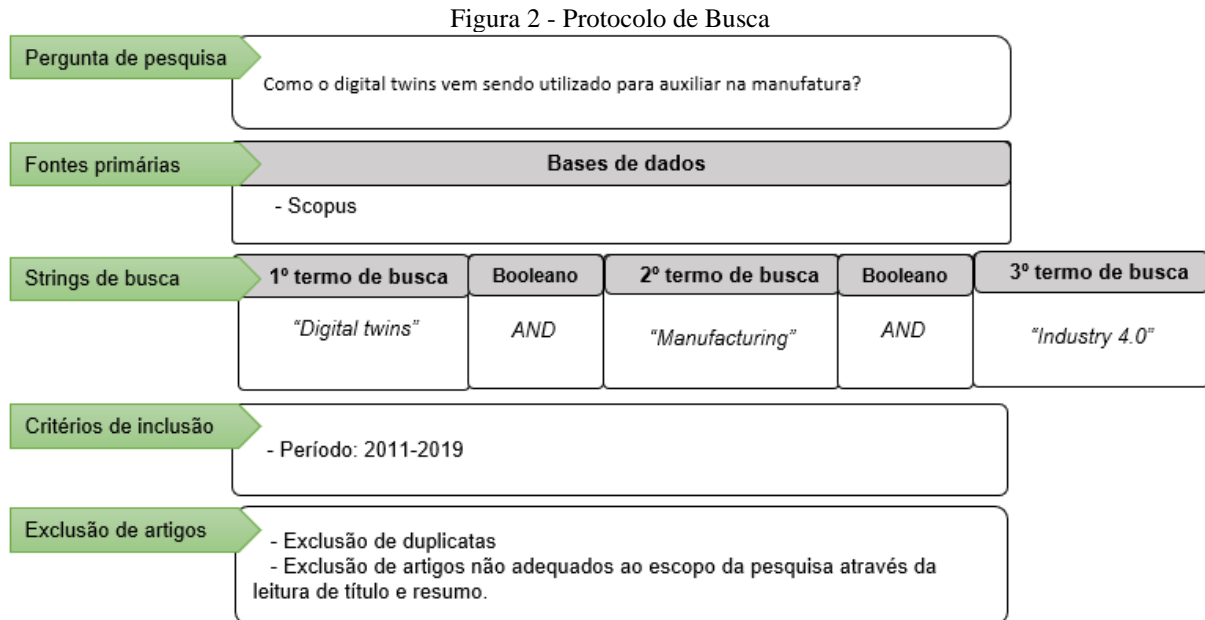


Fonte: Adaptado de Denyer e Tranfield (2009)

A figura 1, apresenta a sequência de passos a serem executados para análise do material, inicialmente se formula a pergunta de pesquisa, em seguida se define as bases de dados onde será realizada a pesquisa, após as duas primeiras fases se define os parâmetros de busca e seleção do material, com o material selecionado é realizada a análise e síntese do dados e por fim se apresenta os resultados que a pesquisa obteve.

Partindo dos passos descritos, a figura 2 demonstra os critérios utilizados no protocolo de busca para a realização do trabalho. Como apresentado no primeiro ponto da figura a pergunta a ser respondida pela revisão é “Como o *digital twin* pode auxiliar a manufatura?”. Para isso, foi realizada uma busca por materiais e estudos na base de dados *Scopus*, esta base foi escolhida por apresentar um grande volume de informações relevantes sobre o tema. Posteriormente, foram definidos os critérios para a busca do material relacionado com o tema, os pontos definidos foram as *strings* de

busca ou palavras chaves e seus conectores booleanos, os critérios de inclusão e os critérios de exclusão de artigos. O período temporal escolhido foi de 2011 a 2019 para utilizar apenas estudos e materiais atuais.



Fonte: Os autores

Com estes critérios, foram encontrados documentos que foram utilizados como fonte de dados para elaboração desta pesquisa, os resultados da busca serão apresentados na próxima seção.

3 RESULTADOS

A partir dos resultados da busca foram encontrados os seguintes números de documentos, apresentados a tabela 1:

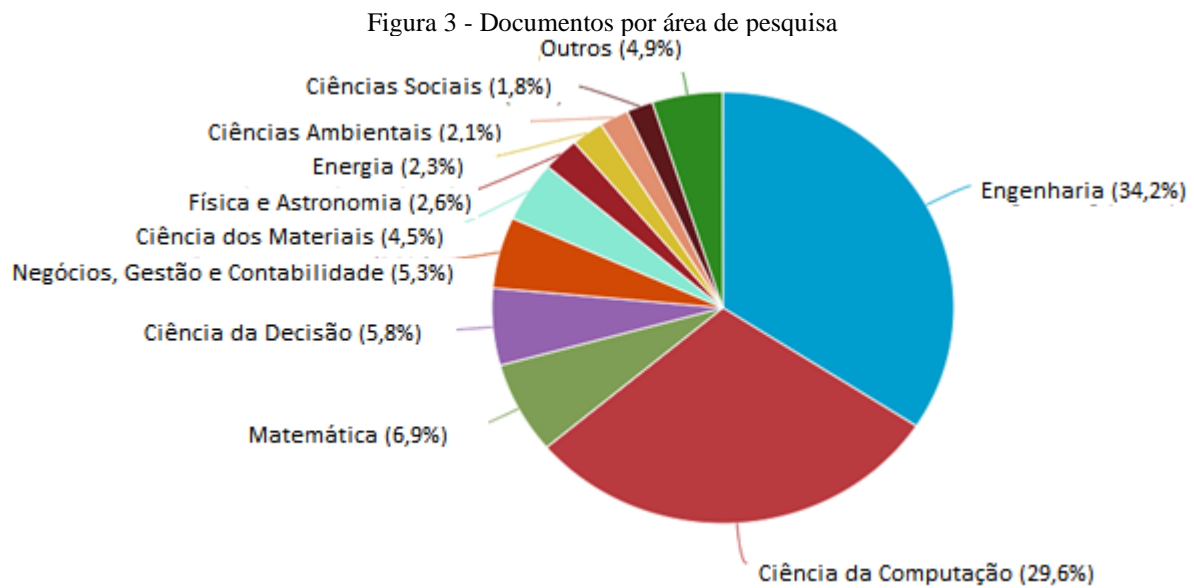
Tabela 1 - Número de artigos encontrados

Ação	Publicações
Base de dados Scopus	476
Aplicação dos filtros	77
Exclusão de Duplicatas	2
Exclusão de artigos fora do escopo	24
Total	51

Fonte: Os autores

Como pode ser observado, através das palavras chave foram obtidos 476 documentos, com a aplicação dos filtros a quantidade foi reduzida para 77 unidades, com os fatores de exclusão de duplicata e artigos fora do escopo o número final foi de 51 documentos.

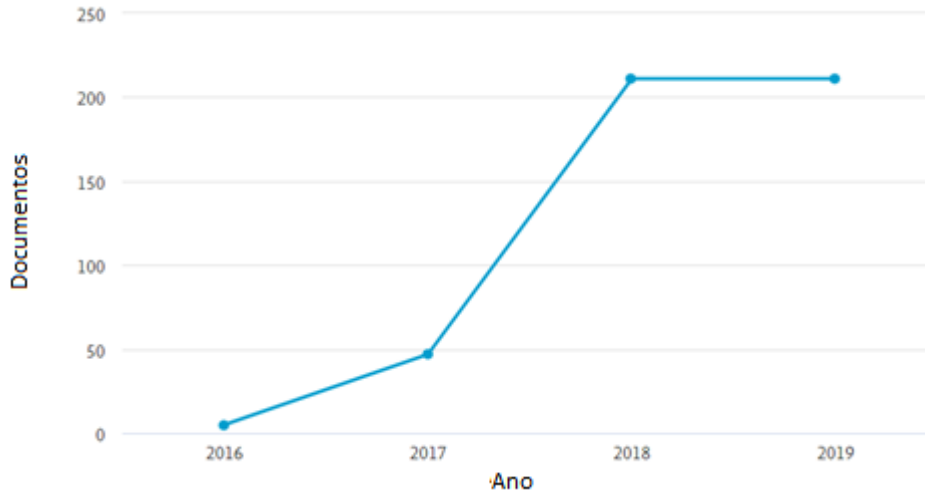
Os resultados encontrados na base dados foram analisados e primeiramente optou-se por verificar as áreas de pesquisa predominantes, em que foi possível observar que o tema de pesquisa tem sido relevante na área de engenharia com um percentual de 34,2% do total de documentos, conforme figura 3.



Fonte: Base de dados Scopus

Uma análise com relação ao ano de publicação também foi feita e constatou-se que somente ocorreram publicações sobre o tema a partir do ano de 2016, desde então houve um crescimento, entretanto, esta pesquisa não contempla o segundo semestre de 2019. A figura 4 demonstra esta análise.

Figura 4 - Documentos por ano

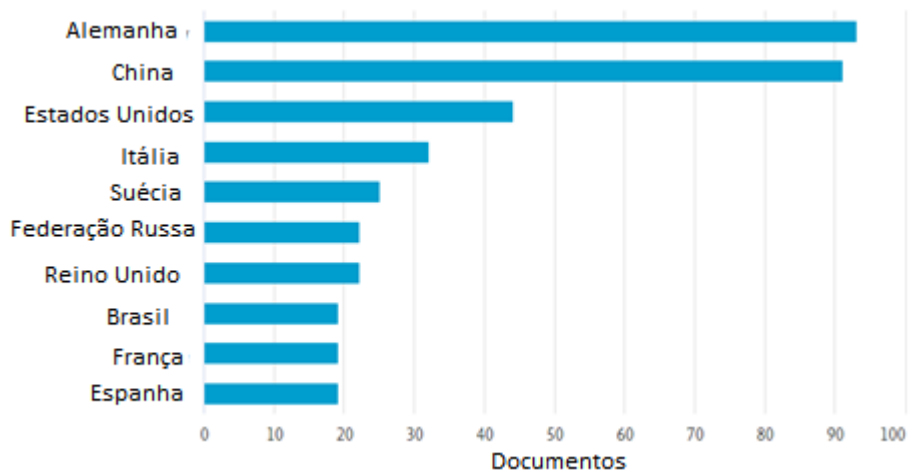


Fonte: Base de dados Scopus

Analisando-se o número de publicações por país, observa-se que a Alemanha tem um total de 93 publicações, seguida por China e Estados Unidos, com 91 e 44 publicações, respectivamente. O Brasil está em oitavo lugar no ranking, com um total de 19 publicações.

Um dos fatos que justifica a Alemanha ter o maior número de publicações se dá ao fato do termo indústria 4.0 ter surgido na Feira de Hannover em 2011, onde se tratava de um projeto de estratégias elaborado pelo governo alemão com foco em soluções tecnológicas. A figura 5 demonstra estes resultados graficamente.

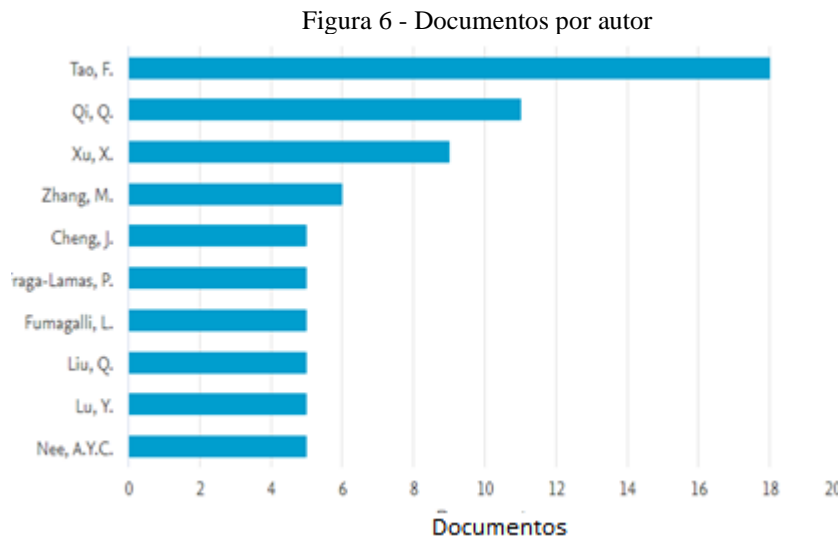
Figura 5 - Documentos por país



Fonte: Base de dados Scopus

Os três primeiros autores que mais publicaram sobre o tema são de origem chinesa, isto demonstra um grande interesse pela China sobre o assunto, em primeiro lugar temos o autor Tao, F.

com um total de 18 publicações, seguido pelos autores Qi, Q. e Xu, X. com um total de 11 e 9 publicações, respectivamente. A figura 6 explicita graficamente o resultado encontrado.



Fonte: Base de dados Scopus

4 SÍNTESE

Para atingir o objetivo proposto, foi realizada uma análise e leitura dos 51 dos artigos obtidos previamente pela metodologia da revisão sistemática de literatura, dentre estes, apenas 15 artigos apresentaram relevância para a pesquisa. Sendo assim, foi elaborado uma tabela com os autores, ano de publicação, título e as principais contribuições e/ou resultados de cada artigo/estudo sobre o referido tema, conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2 - Contribuição dos artigos selecionados

Artigo	Autores	Ano	Título	Resultados/Contribuição
1	A. Gurjanov, D. Zakoldaev, A. Shukalov et al.	2019	Formation principles of digital twins of CyberPhysical Systems in the smart factories of Industry 4.0.	Para criar a fábrica inteligente da Indústria 4.0, é aconselhável usar novas áreas de produção, avançado cyber-físico equipamentos integrados em linhas de produção, e pessoal qualificado que tenha sido pré-treinado em tecnologias de produção digital.
2	K. Samir, A. Maffein, M. Onori.	2019	Real-Time asset tracking; a starting point for digital twin implementation in manufacturing.	O artigo enfoca na rastreabilidade e a visibilidade dos ativos desempenham um papel fundamental no processo de melhorar o desempenho do chão de fábrica, contribuindo para um melhor controle, planejamento e agendamento de decisões.
3	F. Jaensch, A. Csiszar, C. Scheifele et al.	2019	Digital Twins of Manufacturing Systems as a Base for Machine Learning	Este artigo propõe um conceito combinado baseado em modelo e baseado em dados de um gêmeo digital. Ele mostra como usar o aprendizado de máquina em conexão com esses modelos, a fim de arquivar tempos de desenvolvimento mais rápidos dos sistemas de manufatura.
4	A. Redelinghuys, A. Basson, K. Kruger.	2019	A six-layer digital twin architecture for a manufacturing cell.	Apresenta uma arquitetura para um gêmeo digital que permite a troca de dados e informações entre uma emulação ou simulação remota e o gêmeo físico. A arquitetura compreende camadas diferentes, incluindo uma camada de dados local, uma camada IoT Gateway, bancos de dados baseados em nuvem e uma camada contendo emulações e simulações.
5	Y. Lu, X. Xu.	2019	Cloud-based manufacturing equipment and big data analytics to enable on-demand manufacturing services.	Uma arquitetura de sistema genérica para equipamentos de fabricação baseados em nuvem baseada em sistemas de produção ciberfísicos e análise de big data é proposta, permitindo que equipamentos de fabricação sejam conectados à

				nuvem e disponibilizados para o fornecimento de serviços de fabricação sob demanda.
6	Xi Vincent Wang & Lihui Wang	2018	Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of Industry 4.0.	Um novo sistema digital baseado em gêmeos para a recuperação de WEEE para suportar as operações de manufatura / remanufatura durante todo o ciclo de vida do produto, desde o projeto até a recuperação.
7	Yuqian Lu, Xun Xu	2018	Resource virtualization: A core technology for developing cyber-physical production systems.	Uma estrutura de virtualização de recursos orientada a testes é proposta como a recomendação para a indústria adotar a criação de gêmeos digitais para uma fábrica inteligente.
8	A. Mayr, M. Weigelt, J. Von Lindenfels et al.	2018	Electric Motor Production 4.0 - Application Potentials of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing of Electric Motors.	Os resultados indicam que, especialmente abordagens baseadas em dados, ou seja, análise de dados e aprendizado de máquina, oferecem grande potencial na produção de motores elétricos.
9	Lin, W. D., Low, Y. H. Chong, Y. T. et al.	2018	Integrated Cyber Physical Simulation Modelling Environment for Manufacturing 4.0.	Os conceitos de gêmeo digital, inteligência artificial distribuída, aprendizado de máquina e controle autônomo distribuído são implantados na estrutura com a intenção de explorar as futuras aplicações potenciais de modelagem e simulação de sistemas para sistemas de fabricação da Indústria 4.0
10	D. Ivanov, A. Dolgui, A. Das et al.	2018	Digital Supply Chain Twins: Managing the Ripple Effect, Resilience, and Disruption Risks by Data-Driven, Optimization, Simulation, and Visibility.	Demonstra uma visão de como as tecnologias e operações inteligentes digitais podem ajudar a integrar a resiliência e pensamento enxuto na cadeia de suprimentos.
11	M. Ayani, M. Ganebäck, A. H. C. Ng.	2018	Digital Twin: Applying emulation for machine reconditioning.	Apresenta um estudo de aplicação industrial em que um modelo de emulação é usado para apoiar um projeto de recondicionamento.

12	L. Durão, S. Haag, R. Anderl et al.	2018	Digital twin requirements in the context of industry 4.0.	Os resultados mostram que os requisitos do DT estão relacionados a dados, integração e fidelidade em tempo real. Além disso, mostra que os requisitos da indústria estão próximos da literatura e a implementação real da DT é o futuro da pesquisa nesta área de pesquisa.
13	W. Ellgas, J. Richmond, N. Holt et al.	2018	A digital twin concept for manufacturing systems.	Os tipos de dados e tecnologia necessários para construir o DT para um sistema de manufatura são apresentados neste trabalho, tentando desenvolver um framework de sistema de manufatura baseado em DT, que é suportado pela realidade virtual para virtualização de recursos físicos.
14	E. Frontoni, J. Loncarski, R. Pierdicca et al.	2018	Cyber Physical Systems for Industry 4.0: Towards Real Time Virtual Reality in Smart Manufacturing.	Apresenta-se a conceptualização, representação e implementação do modelo digital, no caso de uso real da indústria transformadora e no ambiente físico cibernético. Os resultados de um ambiente industrial real mostram bons desempenhos em termos de comportamento em tempo real, realidade virtual e recursos de visualização do WebGL CPS, usabilidade e legibilidade.
15	T. Uhlemann, C. Lehmann, R. Steinhilper.	2017	The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0	Apresenta um conceito para a composição de um banco de dados e propõe diretrizes para a implementação do Digita Twin em sistemas de produção em pequenas e médias empresas.

Fonte: Os autores

Como apresentado na tabela 2 de síntese dos artigos selecionados, o *digital twin* pode ser utilizado de várias formas e pode contribuir de diferentes maneiras para a indústria manufatureira, tanto para o gerenciamento da produção como para criação de um diferencial competitivo. De maneira geral a maior vantagem observada, é a possibilidade da criação de uma cópia virtual que tem o objetivo de simular eventuais cenários (condições e operações) a partir de dados coletados em

tempo real, possibilitando uma tomada de decisão em tempo real e de maneira mais precisa e acertiva.

Gurjanov (2019), afirma que para criar a fábrica inteligente da Indústria 4.0, é aconselhável usar novas áreas de produção, equipamentos cyber-físicos avançados e integrados em linhas de produção, além pessoal qualificado que tenha sido pré-treinado em tecnologias de produção digital. Existem diferentes maneiras que o *digital twin* pode ser empregado, afim de simular sua produção, integrando o ambiente físico ao virtual, e seus resultados na criação de cópias virtualizadas e simulações têm sido satisfatórios ao que se refere a obtenção de dados em tempo real ou até mesmo previsão ocorrências e situações que pode vir a ocorrer na indústria, pois este é um dos objetivos da modelagem e simulação de dados, um dos pilares da indústria 4.0. A análise dos artigos demonstrou que esta forma de simulação trabalha em conjunto com outras, dentre elas podem ser citadas inteligência artificial, internet das coisas e nuvem, por serem as tecnologias que auxiliam na utilização, comunicação e armazenagem dos dados utilizados e gerados pelos gêmeos digitais.

Mesmo com os artigos citados abordando temas e aplicações bem diversificadas, em sua maioria pode-se dividir as análises com dois objetivos, o primeiro a visualização das aplicações, como abordado por Samir (2019), Redelinghuys (2019), Lu (2018) e Ayani (2018), por exemplo, são arquiteturas, virtualizações e criação de modelos para o entendimento e verificação do comportamento das situações simuladas. Já o outro objetivo é a obtenção e criação de dados, ou seja, como alguns autores como, Uhlemann(2017), Durão(2018), Mayr(2019), Redelinghuys (2019) abordam, que os resultados gerados auxiliarão na tomada de decisões, na criação de prospecções, de banco de dados com seus diversos resultados de suas possibilidades, sendo utilizados para construir o *digital twin*, treinar pessoal e a integração dos sistemas da indústria 4.0.

Com base nas informações verificou-se que o *digital twin* serve também como base para a digitalização de máquinas, produtos e até de todo processo produtivo, no qual pode ser criada a fábrica como um todo e assim uma análise do rendimento das operações e de como é possível aperfeiçoá-las, manipular parâmetros e processos para verificar suas respostas e se adaptar aos requisitos esperados. Todos esses parâmetros têm como base os conceitos da indústria 4.0, o que mostra a importância de todas as tecnologias trabalharem em conjunto e conectadas. Sendo assim, o *digital twin* se torna fundamental na utilização de outras tecnologias, como o conjunto de realidade virtual e aumentada, internet das coisas, big data, robôs colaborativos e agvs (*automatic guided vehicles*).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como analisado o *digital twin* (gêmeo digital) é uma tecnologia que tem como objetivo criar uma réplica virtual, totalmente fiel a realidade, para que esse modelo seja capaz de fornecer todas as informações, perspectivas e situações sobre sua utilização e operação em tempo real.

Dos artigos que foram obtidos comprovou-se a relevância do tema onde 34,2% foram estudados pela área de engenharia e ainda o crescimento brusco do estudo do tema a partir de 2016, o que mostra a importância e crescimento na utilização da tecnologia.

Com a síntese dos artigos selecionados após a aplicação do filtro, foi constatada a grande diversidade de aplicações do *digital twin* pela indústria, a fim de simular a produção, integrando os ambientes virtual e físico. Por fim o principal ponto que foi abordado nos artigos é a importância da utilização do *digital twin* em conjunto com as outras tecnologias da indústria 4.0, em que todas possuem o mesmo objetivo de obter o maior número de informações possíveis sobre o produto para gerenciá-lo da maneira mais adequada, reduzindo custos e diminuindo desperdícios.

Dentre as principais dificuldades encontradas na pesquisa, era esperado estudos onde apresentassem a aplicação da *digital twin* em conjunto com outras ferramentas da indústria 4.0 com seus respectivos resultados, dificuldades e vantagens das aplicações em conjunto, para que com isso se pudesse obter além das vantagens da utilização da *digital twin*, mas também os diferenciais de sua aplicação em conjunto.

Para pesquisas futuras, sugere-se que esta tecnologia seja aplicada de maneira individual e em conjunto com outras tecnologias da indústria 4.0 para que seus resultados de vantagens e dificuldades sejam analisados. Ainda, sugere-se a aplicação em um equipamento específico, em determinada indústria, como por exemplo indústria de linha branca, uma vez que nenhum dos artigos buscados relata a utilização desta tecnologia neste âmbito. Sendo assim, uma boa oportunidade para a execução de uma pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AYANI, M.; GANEBÄCK, M.; NG, A. H. C. Digital Twin: Applying emulation for machine reconditioning. *Procedia CIRP*. Anais...2018Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85049565560&doi=10.1016%2Fj.procir.2018.03.139&partnerID=40&md5=3e5d6834ed4f0f2e4bd5cede4e5b2234>>
- DENYER, D.; TRANFIELD, D. Producing a Systematic Review. In: *The Sage Handbook of Organizational Research Methods*. London: [s.n.].
- DURÃO, L. F. C. S. et al. Digital twin requirements in the context of industry 4.0. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, v. 540, p. 204–214, 2018.
- ELLGASS, W. et al. A digital twin concept for manufacturing systems. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*. Anais...2018Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85060365312&doi=10.1115%2FIMECE2018-87737&partnerID=40&md5=3afaa2ea54c09df4fde9afaf99321966>>
- FRONTONI, E. et al. Cyber Physical Systems for Industry 4.0: Towards Real Time Virtual Reality in Smart Manufacturing. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, v. 10851 LNCS, p. 422–434, 2018.
- GURJANOV, A. V et al. Formation principles of digital twins of Cyber-Physical Systems in the smart factories of Industry 4.0. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Anais...2019Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85063942809&doi=10.1088%2F1757-899X%2F483%2F1%2F012070&partnerID=40&md5=6ddc9b1edcf085fb0e363253829eee47>>
- HOBSBAWM, E. *Age of Revolution 1789-1848*. (1962).
- IVANOV, D. et al. Digital Supply Chain Twins: Managing the Ripple Effect, Resilience, and Disruption Risks by Data-Driven Optimization, Simulation, and Visibility. *International Series in Operations Research and Management Science*, v. 276, p. 309–332, 2019.
- JAENSCH, F. et al. Digital Twins of Manufacturing Systems as a Base for Machine Learning. *Proceedings of the 2018 25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, M2VIP 2018*. Anais...2019 Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85061833149&doi=10.1109%2FM2VIP.2018.8600844&partnerID=40&md5=512742eb128b459906d3679f13fdbb0a>>
- LIN, W. D. et al. Integrated Cyber Physical Simulation Modelling Environment for Manufacturing 4.0. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, v. 2019- Decem, p. 1861–1865, 2018.
- LU, Y.; XU, X. Resource virtualization: A core technology for developing cyber-physical production systems. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 47, p. 128–140, 2018.

LU, Y.; XU, X. Cloud-based manufacturing equipment and big data analytics to enable on-demand manufacturing services. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 57, p. 92–102, 2019.

MAYR, A. et al. Electric Motor Production 4.0 - Application Potentials of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing of Electric Motors. 2018 8th International Electric Drives Production Conference, EDPC 2018 - Proceedings. Anais...2018Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85063458551&doi=10.1109%2FEDPC.2018.8658294&partnerID=40&md5=37010ef946a30b6b6b1708c2e1af25a1>>

REDELINGHUYS, A.; BASSON, A.; KRUGER, K. A six-layer digital twin architecture for a manufacturing cell. *Studies in Computational Intelligence*, v. 803, p. 412–423, 2019.

ROSEN, R. et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, v. 28, n. 3, p. 567–572, 2015.

RÜBMANN, M. ET AL. Future of Productivity and Growth in Manufacturing. Boston Consulting, n. April, 2015.

SAKURAI, R.; ZUCHI, J. D. AS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS ATÉ A INDÚSTRIA 4.0. *Revista Interface Tecnológica*, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 480-491, 2018. DOI: 10.31510/infa.v15i2.386. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/index.php/interfacetecnologica/article/view/386>. Acesso em: 28 ago. 2020.

SAMIR, KR.-T. ASSET TRACKING; A STARTING POINT FOR DIGITAL TWIN IMPLEMENTATION IN MANUFACTURING; MAFFEI, A.; ONORI, M. A. Real-Time asset tracking; a starting point for digital twin implementation in manufacturing. *Procedia CIRP*. Anais...2019Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85068482863&doi=10.1016%2Fj.procir.2019.03.182&partnerID=40&md5=7594bcd8a111b60feb1f99285c86451>>

TAO, F. et al. CCIoT-CMfg: Cloud computing and internet of things-based cloud manufacturing service system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 10, n. 2, p. 1435–1442, 2014.

UHLEMANN, T. H.-J.; LEHMANN, C.; STEINHILPER, R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP*. Anais...2017Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019987476&doi=10.1016%2Fj.procir.2016.11.152&partnerID=40&md5=c5731a8c442c5dd06d70f59e9dc90f1f>>

WANG, S. et al. Towards an accurate evaluation of quality of cloud service in service-oriented cloud computing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 25, n. 2, p. 283–291, 2014.

WANG, X. V; WANG, L. Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, v. 57, n. 12, p. 3892–3902, 2019.