

## Gêmeos Digitais: uma revisão sistemática com análise bibliométrica

Majed de Lacerda Charafeddine (UFPR) [majed.lacerda@ufpr.br](mailto:majed.lacerda@ufpr.br)  
Marcell Mariano Corrêa Maceno (UFPR) [marcell.maceno@ufpr.br](mailto:marcell.maceno@ufpr.br)

### Resumo:

A indústria 4.0 é considerada uma tecnologia disruptiva para o setor industrial, elevando questões como automação e big data a um nível diferente do pensado até hoje. Com diversas novas ferramentas à disposição, as organizações detêm nos gêmeos digitais (digital twins) uma das maiores possibilidades em termos de evolução de análise, projeto, fabricação e gestão de produtos e processos. Visando compreender academicamente esse fenômeno em termos de percepção acadêmica, este artigo busca entender a abordagem da literatura internacional ao assunto, valendo-se de uma análise bibliométrica acompanhada de uma revisão bibliográfica sobre a questão, apresentando os principais conceitos e interações entre o entendimento da tecnologia e seu impacto dentro da revolução digital.

**Palavras chave:** Gêmeos Digitais, Indústria 4.0

## Digital Twins: a systematic literature review with bibliometric analysis

### Abstract

Industry 4.0 is considered a disruptive technology for the industrial sector, raising questions about automation and big data to a level never imagined before. With new tools at disposal, organizations have in the digital twins one of the biggest possibilities in terms of analysis, projects, manufacturing and product and process management. Envisioning to comprehend this phenomenon in terms of academic perception, this article seeks to understand the international literature approach to the matter, using a bibliometric analysis with a systematic literature review about this issue, presenting the main concepts and interactions between the technology comprehension and its impact inside the digital revolution.

**Key-words:** Digital twins, Industry 4.0

### 1. Introdução

O avanço tecnológico ao longo dos últimos 15 anos desencadeou inúmeras mudanças, especialmente em indústrias. A IoT (internet of things) trouxe diversas possibilidades de aumento da eficiência produtiva nas organizações, como sensores que diminuem a quantidade de falhas de um processo industrial ou processos automatizados que aceleram a taxa de produção. Essa tendência está diretamente relacionada ao termo da Indústria 4.0, que visa a evolução das práticas corporativas e industriais de forma a integrar tecnologias desenvolvidas recentemente ao processo produtivo, trazendo diversos benefícios. (BITTENCOURT, 2017)

E a tecnologia chamada de gêmeos digitais, ou digital twins, trouxe melhorias significativas, de uma forma abrangente e ao mesmo tempo concentrada, para a linha produtiva em uma

abordagem macro gerencial da manufatura.

De acordo com a consultoria Gartner (2017), a tecnologia por trás dos Gêmeos Digitais é uma das 10 tendências tecnológicas para 2017, tendo destaque ao longo dos próximos 5 anos, dentro do período em que mais de 5 milhões de objetos se valerão da tecnologia para sua produção. (GARTNER, 2017)

O sucesso desta inovação na manufatura se deve pela sua eficiência em processos industriais, integração orgânica com dados – big data por exemplo – e previsão e ajustes rápidos do processo produtivo, dentre outros fatores.

Adicionalmente, permitem a previsão de efeitos no desenvolvimento de produto e processo sem os custos inerentes às formas físicas de prototipagem. (SCHLEICH, 2017)

Uma pesquisa realizada pelo Instituto de Manufatura Digital e Inovação em Design (Digital Manufacturing and Design Innovation Institute) demonstra que 81% das empresas pesquisadas acreditam que a digitalização do processo industrial é a chave para se manterem competitivas no futuro, e apenas 14% dos entrevistados assumem que estão adequadamente equipados hoje com as tecnologias e o conhecimento necessários.

## **2. Revisão de literatura**

### **2.1 Gêmeos digitais**

A tecnologia chamada de gêmeos digitais (GDs) consiste na digitalização de componentes, produtos e sistemas físicos com a decorrente geração de modelos computacionais, por meio de descrições físicas e funcionais, que visam replicar a realidade por meio de simulações das condições de uso e fabricação destes mesmos produtos, visando as áreas de desenvolvimento de produto e processos industriais. (SCHLEICH, 2017)

Pode-se considerar que os GDs são proxies, ou seja, aplicações intermediárias entre o conceito desenvolvido, o projetado, e o produto físico, o resultado. Vale-se de dados obtidos por meio da mensuração de objetos físicos existentes que operam no mundo real, interagindo com o ambiente em que estão inseridos, adicionalmente a sensores e demais fontes de informação, para analisar e simular a realidade, buscando melhorias, otimizações ou potenciais falhas e problemas. (BITTENCOURT, 2017)

Parrott (2017) define GDs como um perfil digital em evolução do comportamento histórico e atual de um objeto físico ou processo que ajuda a otimizar o desempenho de uma organização.

A principal diferença dos GDs em relação aos CADs – desenho assistido por computador, ou em inglês computer-aided design – ou das próprias ferramentas da IIoT, consiste que o primeiro é encapsulado pelo software, e embora já tenha se provado moderadamente útil e eficiente em sua proposta, não possui a interação com o ambiente; o segundo, por sua vez, é um sistema responsável por mensurar ou diagnosticar objetos reais, falhando em demonstrar interações entre componentes ou o ciclo de vida do produto. (PARROTT, 2017)

Logo, a força por trás da tecnologia é a interação entre o modelo real, objeto, processo ou sistema, e o modelo virtual por meio do qual foi projetado e construído, por mais que difiram em alguns aspectos, diferenças que deverão ser mensuradas e consideradas para a aplicação correta e funcional do conceito dos GDs. (SCHLEICH, 2017)

De acordo com Sony Shetty (2017), traduzido do inglês, “Um gêmeo digital é uma representação digital de um objeto físico. Inclui o modelo do objeto físico, os dados do objeto, uma correspondência única com o objeto e a habilidade de monitorar o objeto.”

Söderberg et al. (2017) define que a visão dos GDs corresponde a uma descrição física e funcional de um componente, produto ou sistema, que tenta incluir todas as informações disponíveis ao longo das fases de ciclo de vida de um produto. Os autores afirmam ainda que simulações e transferência de dados entre as fases do ciclo de vida são a ideia central por trás do conceito de um GD.

Na Figura 1, segue a conceitualização simplificada de um modelo GDs, demonstrando a relação entre os sensores, atuadores, os dados gerados e as métricas de análise geradas.

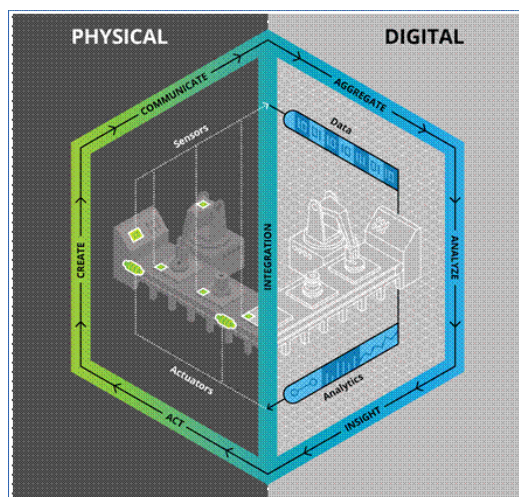


Figura 1 – Exemplo de gêmeo digital de um processo de manufatura

Fonte: Deloitte University Press (2017)

## 2.2 Aplicações atuais

As principais aplicações da tecnologia normalmente são em softwares de ciclo de vida de produtos, em inglês PLM (product life-cycle management), ou em automações industriais seguindo a tendência da Indústria 4.0 e a IIoT (Industrial Internet-of-things). (SCHLEICH, 2017)

De acordo com Söderberg et al. (2017), o conceito da tecnologia chamada de gêmeos digitais (GDs) foi adotado pela NASA, com o intuito de analisar o ciclo de vida de aeronaves para a Força Aérea dos Estados Unidos da América, buscando otimizar a segurança e a confiabilidade das aeronaves e dispositivos.

Söderberg et al. (2017) demonstra ainda outras aplicações para os GDs, relacionadas de acordo com cada etapa no desenvolvimento de produto. De acordo com os autores, na fase de design de produto, as funções práticas oferecidas pela tecnologia em termos de especificações de produto são otimização de localização geométrica dos produtos (desenho em termos de funcionalidades oferecidas pelo produto), simulação de variação estatística, tolerância dimensional de partes e requerimentos; para a fase de pré-produção, aplica-se para a preparação de inspeção e programação offline dos equipamentos, incluindo análise de estabilidade produtiva – salienta-se outra vantagem da tecnologia, consistindo na eficiência em termos de tempo para a geração de modelos de simulação; para a fase de produção, as funcionalidades são a simulação de operações que alteram a forma geométrica do produto, incluindo cortes e montagens, e também possibilitando uma análise RCA (root cause analysis), o que facilita a procura pela origem de potenciais problemas ao longo da linha de

produção em questão.

Indústrias como Siemens, General Electric (GE), Tesla, e Dassault Systèmes aplicam os conceitos de GDs aos seus produtos ou plantas fabris. A Siemens e a Dassault são fabricantes de softwares com o conceito, embora a primeira vise melhora a eficiência e qualidade da manufatura e a segunda o desempenho do produto em termos de projeto. A GE busca com a tecnologia a manutenção e desempenho dos produtos ao longo de sua vida útil, e a Tesla objetiva a criação de um modelo digital para cada carro fabricado, sincronizando informações entre seus servidores e produtos ao longo de sua vida útil. (SCHLEICH, 2017)

Designers, ao tentar desenvolver um produto com o objetivo de peças e componentes que sejam otimizados para suas respectivas aplicações, normalmente começam do zero, buscando qual seria o desenho no ‘mundo ideal’. E com o auxílio de softwares de PLM, por exemplo os GDs, descobre-se que formas orgânicas como as encontradas na natureza normalmente são melhores, em termos de funcionalidade em durabilidade, e mais fáceis de se produzir que os desenhos industriais tradicionais não otimizados, ou ‘inorgânicos’. (WAURZYNIAK, 2017)

### 3. Metodologia

O artigo é composto por duas prerrogativas, que são a Revisão Sistemática da Literatura e uma análise bibliométrica dos resultados, considerando a pesquisa sistemática realizada.

#### 3.1 Revisão sistemática da literatura

O método de pesquisa empregado neste artigo foi o de Revisão Sistemática da Literatura (RSL), ou *Systematic Literature Review* (SLR), que consiste em um sumário de estudos prévios direcionado à uma questão específica, valendo-se de métodos sistemáticos e explícitos para coletar e analisar dados provenientes dessas fontes, agregando de maneira crítica o conteúdo gerado anteriormente.

De acordo com Armstrong e Waters (2007), o processo estruturado da Revisão Sistemática possui os passos descritos abaixo.

- a) Formulação da questão-chave;
- b) Planejamento da revisão;
- c) Pesquisa abrangente;
- d) Seleção imparcial e abstrata de conteúdo;
- e) Avaliação crítica dos dados;
- f) Síntese dos dados, opcionalmente incluindo a meta-análise;
- g) Interpretação dos resultados.

No caso do artigo, a questão chave foi considerada como a compreensão da tecnologia dos gêmeos digitais e seu impacto no meio acadêmico e industrial.

#### 3.2 Pesquisa sistemática

A pesquisa sistemática de artigos para este trabalho foi realizada na base de periódicos Web of Science, no dia 11 de setembro de 2017, conforme os critérios explicitados na Tabela 1, que demonstra a relação entre os critérios considerados e a quantidade de trabalhos retornada.

| <b>Campos</b>       | <b>Crítérios</b>                                                                                                                      | <b>Artigos</b> |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Tópico              | Digital twins                                                                                                                         | 928            |
| Áreas de pesquisa   | Engineering; Computer science; Automation control systems; Operations research management science; Business; Economics or mathematics | 369            |
| Tipos de documentos | Artigos                                                                                                                               | 204            |
| Idioma              | Inglês                                                                                                                                | 202            |
| Anos de publicação  | 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017                                                                                                         | 107            |

Fonte: os autores (2017)

Tabela 1 – Resultados quantitativos da pesquisa sistemática

Em relação aos resultados obtidos no momento da pesquisa em que as áreas de pesquisa foram definidas, a Figura 2 ilustra os resultados obtidos ao longo dos últimos 17 anos (do ano 2000 ao ano 2017), em número de artigos.

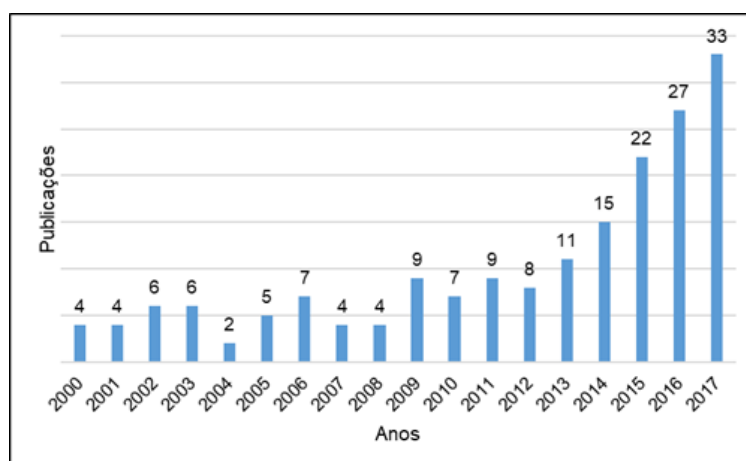


Figura 2 – Resultados quantitativos da pesquisa sistemática ao longo de 17 anos.

Fonte: os autores (2017)

Por se objetivar o entendimento atual do termo digital twins, determinou-se que seriam considerados artigos publicados ao longo dos últimos 5 anos, considerando-se 2017. Logo, artigos anteriores a 2013 seriam descartados da pesquisa, resultando em 107 trabalhos.

A próxima etapa consistiu em uma análise manual artigos encontrados na fase anterior, por meio da leitura dos resumos de cada um deles, associando ao escopo previamente proposto para este trabalho. Desta maneira, chegou-se ao resultado de 7 artigos alinhados com o escopo determinado para este trabalho, que seguem relacionados no Quadro 1.

| <b>Título</b>                                                                                | <b>País</b>    | <b>Ano</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------|
| Building digital twins of 3D printing machines                                               | Estados Unidos | 2017       |
| C2PS: A Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-Based Cyber-Physical Systems | Canadá         | 2017       |
| On the Effects of Modeling As-Manufactured Geometry: Toward Digital Twin                     | Estados Unidos | 2014       |

| <b>Título</b>                                                                                             | <b>País</b>      | <b>Ano</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------|
| PLM's Digital Twins Offer Virtual View of Manufacturing                                                   | Estados Unidos   | 2017       |
| Semantic data management for the development and continuous reconfiguration of smart products and systems | Alemanha         | 2016       |
| Shaping the digital twin for design and production engineering                                            | Alemanha; França | 2017       |
| Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production                       | Suécia           | 2017       |
| Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision                   | França           | 2017       |

Fonte: os autores (2017)

Quadro 1 – Relação dos artigos considerados no estudo

Adicionalmente aos artigos citados no Quadro 1, foram adicionados ao referencial teórico e ao conteúdo considerado para este trabalho algumas referências da X a este trabalho, por serem pertinentes ao tema tratado. No entanto, a análise bibliométrica foi realizada apenas com os resultados obtidos da pesquisa original, pelos resultados não fazerem parte da coleção principal da base de periódicos Web of Science.

#### 4. Apresentação dos resultados

Os resultados foram separados em duas partes, uma das quais é a análise bibliométrica do tema, em relação à base de dados pesquisada, e a outra é a revisão bibliográfica do assunto considerando o resultado da sessão anterior.

##### 4.1 Análise bibliométrica

A análise de dispersão dos artigos mostrando não só os autores como também os países de origem e os periódicos em que foram publicados. Dentre os autores, o que mais se destaca é SEHITOGLU com doze publicações, seguido por ABUZOID e MAIER com seis e cinco publicações respectivamente. Outros sete autores completam o quadro com quatro (LEE, LU, MARTONE e PATRIARCA) e três publicações (MARTIN, SINCLAIR e SUN) cada um.

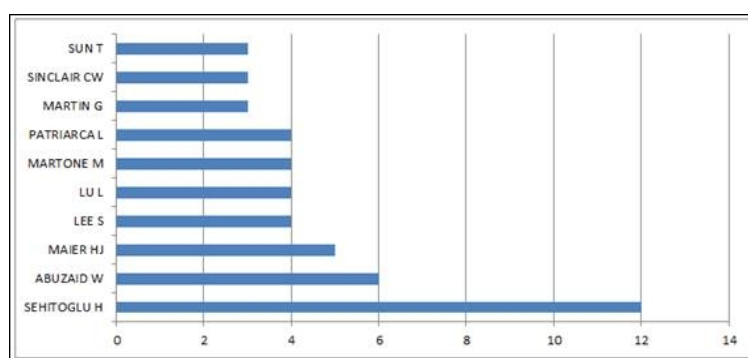


Figura 3 – Autores com maior número de publicações da amostra

Fonte: os autores (2017)

Em relação aos países de origem, os Estados Unidos têm dominado o volume de pesquisas/publicações na área com um total de 37 artigos seguido pela China com 23 publicações e Alemanha com 20 pesquisas na área. Vale salientar que o Brasil não possui publicação dentro da amostra selecionada. A estratificação da amostra conta com todos os países cujo número de publicações é igual ou superior a três artigos.

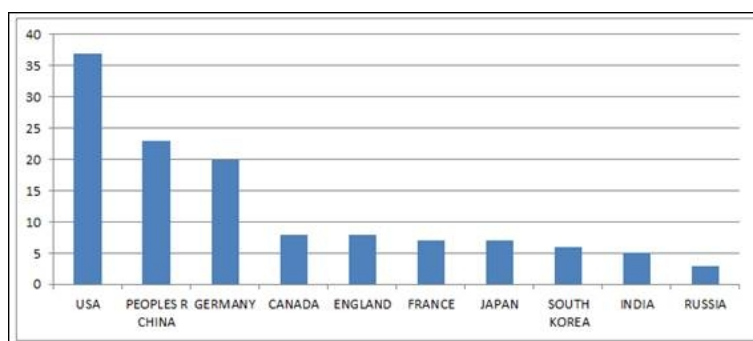


Figura 4 – Distribuição das publicações da amostra por país de origem  
Fonte: os autores (2017)

Já com relação à distribuição dos artigos por periódico de publicação, observou-se na Figura 5 que o periódico com maior destaque é o Materials Science and Engineering a Structural Materials Properties Microstructure and Processing, seguido por Acta Materialia e Scripta Materialia. Os principais periódicos citados na Figura 6, são responsáveis por 55 publicações sobre o tema representando aproximadamente 51% do total da amostra.

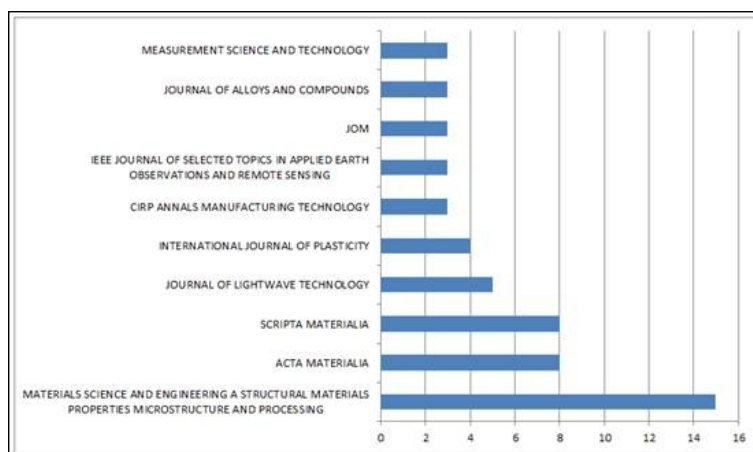


Figura 5 – Comparativo da distribuição das publicações da amostra pelas principais revistas  
Fonte: os autores (2017)

Os artigos com os maiores números de citações da amostra são apresentados no Quadro 2.

| Autores                           | Título da fonte                  | Publicação | Citações | Média /ano |
|-----------------------------------|----------------------------------|------------|----------|------------|
| Carroll, Jay D.; Abuzaid, Wael;   | International Journal of Fatigue | 2013       | 38       | 7,6        |
| Lambros, John; Sehitoglu, Huseyin | Journal of Lightwave Technology  | 2014       | 32       | 8          |
| Liu, Xiang; Chandrasekhar, S.;    |                                  |            |          |            |
| Winzer, P. J.; Tkach, R. W.;      |                                  |            |          |            |
| Chraplyvy, A. R.                  |                                  |            |          |            |
| Hazeli, K.; Cuadra, J.;           | Scripta Materialia               | 2013       | 29       | 5,8        |

| <b>Autores</b>                                                              | <b>Título da fonte</b>                                                    | <b>Publicação</b> | <b>Citações</b> | <b>Média /ano</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| Vanniamparambil, P. A.; Kontsos, A.<br>Stinville, J. C.; Vanderesse, N.;    | Acta Materialia                                                           | 2015              | 25              | 8,33              |
| Bridier, F.; Bocher, P.; Pollock, T. M.<br>Rossini, M.; Spena, P. Russo;    |                                                                           | 2015              | 25              | 8,33              |
| Cortese, L.; Matteis, P.; Firrao, D.<br>Martin, Guilhem; Sinclair, Chad W.; | Materials Science and<br>Engineering A-Structural<br>Materials Properties | 2014              | 23              | 5,75              |
| Lebensohn, Ricardo A.                                                       |                                                                           | 2013              | 20              | 4                 |
| Abuzaid, Wael; Sehitoglu, Huseyin;<br>Lambros, John                         | Microstructure and Processing                                             | 2013              | 20              | 4                 |
| Min, Junying; Hector, Louis G., Jr.;                                        | International Journal of Plasticity                                       | 2014              | 22              | 5,5               |
| Lin, Jianping; Carter, Jon T.;                                              |                                                                           | 2014              | 22              | 5,5               |
| Sachdev, Anil K.<br>Martin, Guilhem; Sinclair, Chad W.;                     | Scripta Materialia                                                        | 2013              | 22              | 4,4               |
| Schmitt, Jean-Hubert                                                        |                                                                           | 2013              | 22              | 4,4               |
| Chowdhury, P.; Sehitoglu, H.;                                               | International Journal of Plasticity                                       | 2015              | 15              | 5                 |
| Abuzaid, W.; Maier, H. J.                                                   |                                                                           | 2015              | 15              | 5                 |

Fonte: os autores (2017)

Quadro 2 – Publicações mais citadas da amostra.

O artigo com maior número de citações é o de Carroll et al. (2013) com 38 citações. Já os artigos de Stinville et al. (2015) e Rossini et al. (2015) possuem um indicador de média de citações por ano de 8,33 sendo em média os mais citados da amostra. Vale destacar também o trabalho publicado por Liu et al. (2014) que vem sendo bastante citado nos trabalhos da área desde que foi publicado e possui uma média de 8 citações por ano.

Com relação aos artigos de maior relevância, observa-se na Figura 6, que nos dois primeiros anos da amostra três artigos se sobressaíram no volume de citações, sendo eles os artigos de Carroll et al. (2013), Liu et al. (2014) e Hazeli et al. (2013). A partir de 2015 há uma heterogeneidade maior nas citações, sendo em 2017 destaque maior para os trabalhos de Carroll et al. (2013) e Stinville et al. (2015).

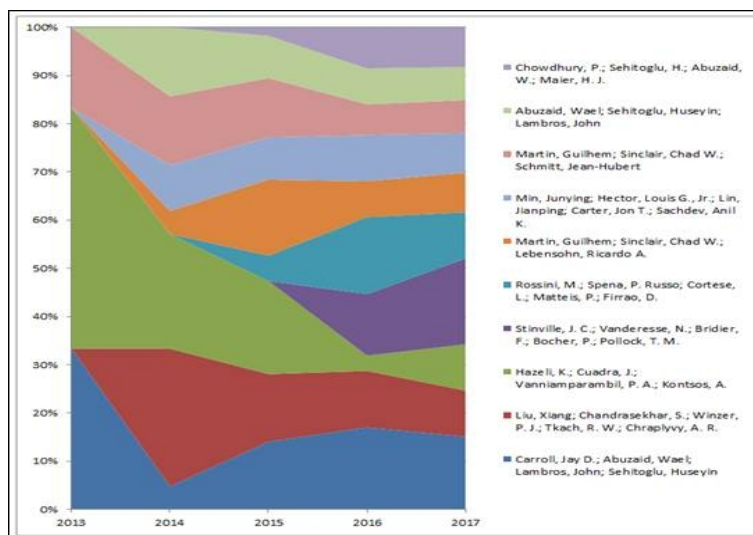


Figura 6 – Publicações mais citadas da amostra  
Fonte: os autores (2017)

[illegible]

Cerrone et al., por meio do artigo *On the Effects of Modeling As-Manufactured Geometry: Toward Digital Twin* busca trazer o conceito de GD para a análise de fraturas nos materiais de produtos em questão, uma das aplicações da tecnologia. Considerando outros parâmetros, demonstraram que o maior problema da tecnologia é a falta da parametrização correta do modelo original, e de todas as variáveis que o circundam; uma vez que essas limitações sejam corretamente superadas, o modelo pode ser sim válido para o estudo e simulação de situações de estresse em produtos.

Waurzyniak busca, por meio do artigo *PLM's Digital Twins Offer Virtual View of Manufacturing*, visou demonstrar seguindo um panorama jornalístico como os GDs existem hoje, dentro da compreensão corporativa do tema, e quais são os impactos para a visão de negócios hoje existente na manufatura, dentro do contexto de PLM – ou ciclo de vida do produto. O objetivo geral, a ideia por trás do artigo, é de que os gêmeos digitais aceleram o desenvolvimento de produtos idealmente concebidos para a ótima performance no mercado, gerando maiores receitas e possibilitando maiores lucros para a indústria.

O artigo *Semantic data management for the development and continuous reconfiguration of smart products and systems*, de Abramovici et al., descreve o conceito de SPs, ou smart products, produtos ou sistemas que auxiliam as organizações durante sua fabricação – por exemplo, utilizando sensores embarcados para a coleta de dados com o intuito de otimizar a produção da organização – possibilitando a análise e interpretação posteriores de forma a aumentar a eficiência da indústria, identificando gargalos e falhas, aumentando a precisão de simulações virtuais. É uma das tecnologias envolvidas na Indústria 4.0 e na crescente automação industrial; sendo uma ferramenta paralela aos GDs, com o potencial de agregar valor à implementação da tecnologia em questão nesse trabalho, o escopo não está diretamente alinhado com o proposto. No entanto, os autores concluem que a tecnologia apresentada, SDM (semantic data management), em português Modelo Semântico de Dados, que o seu uso combinado com os GDs ajuda e beneficia a organização no desenvolvimento e na configuração de produtos inteligentes, ou smart products no termo original em inglês.

Schleich et al., em seu artigo *Shaping the digital twin for design and production engineering*, apresentou os conceitos dos GDs visando a compreensão acadêmica do tema, alinhado com o escopo deste trabalho. Apresentou os conceitos básicos, demonstrando como a tecnologia auxilia o desenvolvimento das indústrias no desenvolvimento de produtos, otimizando linhas de produção e elaborando processos cada vez mais eficientes. Adicionalmente, a visão dos autores coincide com todos os outros artigos e acadêmicos citados neste trabalho, e portanto, consiste em um ótimo referencial teórico. Por esses motivos o artigo foi considerado em boa parte do embasamento bibliográfico desta pesquisa.

Söderberg et al., no artigo *Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production* traz a problemática de conformidade geométrica quanto aos produtos, sendo a causa de atrasos e futuras alterações de projeto, resultando em uma parte significativa dos custos relativos a uma qualidade baixa. O trabalho foca nas aplicações práticas e no desenvolvimento de GDs, explicando as etapas relacionadas, e exemplifica o modelo com um caso real. Pontos de destaque são descritos, por meio de explicações didáticas e por isso foi citado no referencial teórico desta pesquisa.

O artigo *Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision* detalha a digitalização de uma máquina de perfuração de chapas de metal, consistindo em uma das aplicações práticas da tecnologia. Explica com detalhes a parte operacional do desenvolvimento de um gêmeo digital, de forma compreensiva e didática. De forma

conclusiva determina que a tecnologia consegue simular a operação da máquina em questão, embora exista necessidade de melhorias, por exemplo, parâmetros físicos de processo ainda não variáveis disponíveis para consideração, ocasionando um distanciamento operacional da máquina e do processo.

Uma das partes relacionadas deste artigo que, no entanto, é a listagem das etapas necessárias para se gerar um gêmeo digital:

- a) Modelo em 3D de todas as partes individuais da máquina;
- b) Extrair o comportamento da máquina e criar uma representação do seu funcionamento;
- c) Estabelecer o relacionamento entre os componentes e integrar à representação do funcionamento completo;
- d) Modelar a operação da máquina e os efeitos dela nos produtos que manipulará;
- e) Desenhar e desenvolver uma simulação funcional interativa na qual todas as peças cooperam para criar uma experiência virtual.

## **5. Considerações finais**

Conforme pode-se perceber pelos resultados apresentados, o tema é recente e necessita de futuras pesquisas para que se estabeleça uma base de conhecimentos sólida a ponto de se poder determinar, com certa precisão acadêmica, conceitos que não estejam no estado-da-arte da tecnologia dos Gêmeos Digitais.

Assim, sugere-se uma pesquisa futura com base em artigos e análises realizadas ao longo dos próximos anos, pelo desenvolvimento orgânico da tecnologia e pela implementação nas indústrias, com a compreensão natural que virá pelo maior conhecimento da tecnologia.

Sugere-se também uma análise interna nas principais organizações desenvolvedoras de software, especificamente para as tecnologias abrangidas pela Indústria 4.0, com o intuito de compreender, in loco, a implementação das tecnologias e a forma como as indústrias otimizam sua produção por meio dos gêmeos digitais.

## **6. Referências**

- ABRAMOVICI, M.; GÖBEL, J. C.; & DANG, H. B.** *Semantic data management for the development and continuous reconfiguration of smart products and systems*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2016.
- ABUZAID, W.; SEHITOGLU, H.; LAMBROS, J.** *Plastic strain localization and fatigue micro-crack formation in Hastelloy X*. Materials Science And Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure And Processing, 2013.
- ALAM, K.M. AND EL SADDIK, A.** *C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems*. IEEE Access, 5, pp.2050-2062, 2017.
- BARNYCH, G.** *The Digital Manufacturing and Design Innovation Institute (DMDII)*. Manufacturing in America Symposium. UI LABS, 2015.
- BITTENCOURT, L.** *Gêmeos Digitais: Propulsores da Indústria 4.0*. 27 de Junho de 2017. <http://bridgeconsulting.com.br/academy/gemeos-digitais-propulsores-da-industria-4-0/>.
- CARROLL, J. D.; ABUZAID, W.; LAMBROS, J, et al.** *High resolution digital image correlation measurements of strain accumulation in fatigue crack growth*. International Journal of Fatigue, 2013.
- CERRONE, A., HOCHHALTER, J., HEBER, G. AND INGRAFFEA, A.** *On the effects of modeling as-manufactured geometry: toward digital twin*. International Journal of Aerospace Engineering, 2014.
- CHOWDHURY, P.; SEHITOGLU, H.; ABUZAID, W.; et al.** *Mechanical response of low stacking fault energy Co-Ni alloys - Continuum, mesoscopic and atomic level treatments*. International Journal of Plasticity,

2015.

**DEBROY, T., ZHANG, W., TURNER, J. AND BABU, S.S.** *Building digital twins of 3D printing machines.* Scripta Materialia, 135, pp.119-124, 2017.

**HAZELI, K.; CUADRA, J.; VANNIAMPARAMBIL, P. A.; et al.** *In situ identification of twin-related bands near yielding in a magnesium alloy.* Scripta Materialia, 2013.

**LIU, X.; CHANDRASEKHAR, S.; WINZER, P. J.; et al.** *Fiber-Nonlinearity-Tolerant Superchannel Transmission via Nonlinear Noise Squeezing and Generalized Phase-Conjugated Twin Waves.* Journal of Lightwave Technology, 2014.

**MARTIN, G.; SINCLAIR, C. W.; LEBENSOHN, R. A.** *Microscale plastic strain heterogeneity in slip dominated deformation of magnesium alloy containing rare earth.* Materials Science And Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure And Processing, 2014.

**MARTIN, G.; SINCLAIR, C. W.; SCHMITT, J.** *Plastic strain heterogeneities in an Mg-1Zn-0.5Nd alloy.* Scripta Materialia, 2013.

**MIN, J.; HECTOR, L. G. Jr.; LIN, J; et al.** *Spatio-temporal characteristics of propagative plastic instabilities in a rare earth containing magnesium alloy.* International Journal of Plasticity, 2014.

**MORENO, A.; VELEZ, G.; ARDANZA, A.; BARANDIARAN, I.; DE INFANTE, Á. R.; & CHOPITEA, R.** *Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision.* International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2017.

**PARROTT, A.; WARSHAW, L.** *Industry 4.0 and the digital twin.* Deloitte University Press, 2017.

**ROSSINI, M.; SPENA, P. R.; CORTESE, L; et al.** *Investigation on dissimilar laser welding of advanced high strength steel sheets for the automotive industry.* Materials Science And Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure And Processing, 2015.

**SCHLEICH, B.; ANWER, N.; MATHIEU, L.; & WARTZACK, S.** *Shaping the digital twin for design and production engineering.* CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017.

**SHETTY, S.** *How to Use Digital Twins in Your IoT Strategy.* 2017. <http://www.gartner.com/smarterwithgartner/how-to-use-digital-twins-in-your-iot-strategy/>.

**SÖDERBERG, R., WÄRMEFJORD, K., CARLSON, J.S. AND LINDKVIST, L.** *Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production.* CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017.

**STINVILLE, J. C.; VANDERESSE, N.; BRIDIER, F.; et al.** *High resolution mapping of strain localization near twin boundaries in a nickel-based superalloy.* Acta Materialia, 2015.

**WAURZYNIAK, P.** *PLM's Digital Twins Offer Virtual View of Manufacturing.* Manufacturing Engineering, 158(4), 67-73, 2017.