

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**DANIELA SILVA FACCHINI**

**Modelo de referência do gêmeo digital no ciclo de vida do produto**

**SÃO PAULO  
2023**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 04 de Agosto de 2023

Assinatura da autora:



Assinatura do orientador: \_\_\_\_\_

#### Catálogo-na-publicação

Facchini, Daniela

Modelo de referência do gêmeo digital no ciclo de vida do produto / D.

Facchini -- São Paulo, 2023.

147 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.Digital twin 2.Lifecycle management 3.Digital twin lifecycle reference model I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t

**DANIELA SILVA FACCHINI**

**Modelo de referência do gêmeo digital no ciclo de vida do produto**

**Versão Revisada**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção do título  
de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Qualidade e Engenharia  
do Produto.

Orientador: Prof.º (Dr.) Eduardo de Senzi  
Zancul.

SÃO PAULO

2023

FACCHINI, D. S. **Modelo de referência do gêmeo digital no ciclo de vida do produto**. 2023. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de Produção, PPGEP, Faculdade de São Paulo (USP), São Paulo, 2023.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Profa. Dra. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

## AGRADECIMENTOS

Ao longo da trajetória deste trabalho recebi apoio e ajuda de muitas pessoas que formaram minha base. Portanto, seguem aqui algumas palavras de gratidão que simbolizam meu muito obrigada e minha gratidão por esta conquista.

Primeiramente, agradeço a Deus, pelo dom da vida e por sempre estar presente nas minhas conquistas.

Ao Professor Dr. Eduardo de Senzi Zancul, pela confiança, orientação, conselhos e por ser um mentor ao longo de todos esses anos.

Aos Professores Dr.-Ing. Klaus Schützer e Dr. André Leme Fleury, pelas colaborações em diferentes momentos durante minha trajetória acadêmica.

A Willian Kenji Gushiken, representante da empresa integral PLM, que disponibilizou seu produto para aplicação e estudo, além de nos apoiar com as dúvidas de como utilizar o *software*.

À minha família, amigos e ao grupo de pesquisa, por me apoiaram e acreditarem em mim. Agradeço, em especial, minha mãe, Maria Dorotilde, por sempre me apoiar profissionalmente e me encorajar a me tornar o que eu sonhava ser, independente de qual carreira eu escolhesse.

Ao meu marido, Humberto Facchini, aquele que sempre me apoiou, compreendeu e ajudou, durante os muitos anos dedicados a esta conquista.

*Com amor, admiração e gratidão, dedico este trabalho a Deus, à minha família e amigos, pela compreensão, carinho, presença e incansável apoio, ao longo do período de elaboração do trabalho.*

## RESUMO

FACCHINI, D. S. **Modelo de referência do gêmeo digital no ciclo de vida do produto**. 2023. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de Produção, PPGEP, Faculdade de São Paulo (USP), São Paulo, 2023.

O gêmeo digital é uma tecnologia emergente que busca integrar a representação digital ao seu respectivo artefato físico. Na academia, por ser uma tecnologia recente, ainda há uma lacuna em relação aos modelos mais adequados de integração para os gêmeos digitais. Atualmente, já existem modelos consolidados para o gerenciamento de ciclo de vida do produto. No entanto, faltam modelos de referência para integração entre ambos os aspectos – gerenciamento do ciclo de vida e gêmeo digital. Assim, visando suprir essa lacuna, a presente pesquisa tem como objetivo realizar a integração entre os conceitos de gêmeo digital e o gerenciamento do ciclo de vida do produto, por meio de um modelo de referência do gêmeo digital no ciclo de vida do produto. Com base no modelo gerado, a pesquisa também busca mapear as funcionalidades do gêmeo digital. Foi utilizada a estratégia de multimétodos composta pela revisão sistemática de literatura e por um estudo bibliométrico organizado em três revisões de literatura: o gerenciamento de vida do produto (*Product Lifecycle Management* - PLM), gêmeo digital (*Digital Twin* - DT) e a integração do gerenciamento do ciclo de vida do produto e o gêmeo digital. As três revisões foram feitas através das bases *Scopus* e *Web of Knowledge*. O resultado da pesquisa é uma contribuição para o processo de desenvolvimento de produtos gerada a partir da integração entre o gerenciamento do ciclo de vida e o gêmeo digital e o mapeamento das funcionalidades de gêmeos digitais.

Palavras-chaves: Gêmeo digital. Gerenciamento do ciclo de vida. Modelo de referência.

## ABSTRACT

FACCHINI, D. S. **Digital twin reference model in product lifecycle.** 2023. 147 f. Dissertation (Master) - Escola de Engenharia de Produção, PPGEP, Faculdade de São Paulo (USP), São Paulo, 2023.

The digital twin is an emergent technology that seeks to integrate digital representation with its respective physical artifact. In academia, because it is a recent technology, there is still a gap in relation to the most appropriate integration models for digital twin. Currently, there are already consolidated models for product lifecycle management. However, there is a dearth of reference model for integration between both aspects – lifecycle management and digital twin. Thus, aiming to fill this gap, this research aims to integrate the concepts of digital twin and management of the product lifecycle through a digital twin reference model in product lifecycle. Based on the generated model, the present study also seeks to map the functionalities of the digital twin. A multimethod strategy was used, composed of a systematic literature review and a bibliometric study that included three literature reviews – product lifecycle management (PLM), digital twin (DT) and the integration of product lifecycle management and digital twin. The three reviews were conducted through the Scopus and Web of Knowledge databases. The result of this research is a contribution to the product development process, generated from the integration between lifecycle management and the digital twin and the mapping of digital twin functionalities.

Keywords: Digital twin. Lifecycle management. Reference model.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Organização do texto em capítulos do trabalho .....   | 19 |
| Figura 2 – Estrutura metodológica .....  | 22 |
| Figura 3 – Processo sistemático da revisão de literatura do gêmeo digital .....  | 24 |
| Figura 4 – Processo sistemático da revisão de literatura do gerenciamento do ciclo de vida do produto .....  | 24 |
| Figura 5 – Processo sistemático da revisão de literatura da integração dos temas gêmeo digital e gerenciamento do ciclo de vida do produto .....                 | 25 |
| Figura 6 – Nuvem de palavras baseada nas definições de gêmeo digital.....  | 31 |
| Figura 7 – Gráfico das características mais citadas pelos artigos estudados que definem gêmeo digital .....  | 32 |
| Figura 8 – Gêmeo digital aplicado no processo de micropuncionamento.....   | 33 |
| Figura 9 – Gêmeo digital da Fábrica do Futuro da USP .....   | 35 |
| Figura 10 – Exemplo de medições realizadas pelo gêmeo digital da Fábrica do Futuro da USP .....  | 35 |
| Figura 11 – Parâmetros mais mensurados dentro dos artigos estudados e a relevância do mesmo para o tema.....   | 39 |
| Figura 12 – Conceitos e sistemas correlacionados ao gêmeo digital .....  | 42 |
| Figura 13 – Tipo de empresa x área aplicada.....   | 48 |
| Figura 14 – Percentual das áreas de aplicação da qual foram aplicado o gêmeo digital.....  | 49 |
| Figura 15 – Requerimentos do sistema PLM .....   | 52 |
| Figura 16 – Componentes do sistema gerenciamento do ciclo de vida do produto .....   | 53 |
| Figura 17 – Gráfico da área de aplicação X artigos publicados sobre o gerenciamento do ciclo de vida do produto .....  | 55 |
| Figura 18 – Conceitos citados junto ao gerenciamento do ciclo de vida do produto x artigos publicados .....  | 56 |
| Figura 19 - Oportunidades de melhoria do sistema PLM. ....   | 58 |
| Figura 20 - Etapas do processo por tipo de aplicação mais citadas.....   | 62 |
| Figura 21 - Estrutura do modelo de sistemas PLM.....   | 65 |
| Figura 22 - Grupo de funcionalidades do modelo de referência de sistemas gerenciamento do ciclo de vida do produto. ....   | 66 |
| Figura 23 - Estrutura de relacionamento entre os modelos de processos e de sistemas PLM e base de dados de capacitações de sistemas comerciais (conceitual)..... | 67 |
| Figura 24 - Modelo de referência integrado de processo e sistema PLM. ....   | 68 |
| Figura 25 - Conexão o modelo integrado de processo e sistemas PLM e os processos do ciclo de vida do gêmeo digital.....  | 69 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 26 - Conceito de Projeto de ciclo de vida. ....  | 71 |
| Figura 27 - 6 dimensões do gêmeo digital. ....  | 73 |
| Figura 28 - Representação das 8 Dimensões do gêmeo digital. ....  | 74 |
| Figura 29 - Relação entre as atividades do modelo de referência integrado de processos e sistemas<br>PLM e os processos do ciclo de vida do gêmeo digital.....  | 78 |
| Figura 30 - Elos entre as bases e o modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital. ....  | 80 |
| Figura 31 - Elos entre as bases, o modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital e as<br>funcionalidades do gêmeo digital.....   | 88 |
| Figura 32 - Relações entre os requerimentos, funcionalidades e dimensões já criadas (em verde) e as<br>atividades construídas, com base no processo do subitem 4.3.1 (em amarelo).....  | 89 |
| Figura 33 - Relação entre as atividades do modelo de referência do ciclo de vida de produtos, a<br>indicação das funcionalidades do gerenciamento do ciclo de vida de Zancul (2009) e as<br>atividades do modelo de referência do gêmeo digital. .... | 89 |
| Figura 34 - Exemplificação das atividades criadas para o modelo de referência do gêmeo digital,<br>relacionadas com as dimensões do gêmeo digital. ....   | 90 |
| Figura 35 - Estrutura do modelo de referência do ciclo de vida do produto. ....   | 91 |
| Figura 36 - Relação entre os processos, as etapas e as atividades do modelo de referência do ciclo de<br>vida do gêmeo digital. ....  | 92 |
| Figura 37 - Modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital.....   | 93 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Métricas sobre o funcionamento do gêmeo digital.....   | 34 |
| Tabela 2 – Definições do gerenciamento do ciclo de vida do produto .....  | 50 |
| Tabela 3 – 8 dimensões e níveis do gêmeo digital.....   | 75 |
| Tabela 4 - Requisitos do gêmeo digital.....   | 77 |
| Tabela 5 – Detalhamento da relação entre o processo do gerenciamento do ciclo de vida do produto e o processo do gêmeo digital..... | 79 |
| Tabela 6 – Estrutura do modelo conceitual.....  | 81 |
| Tabela 7 – Relacionamento entre os requerimentos e as dimensões do gêmeo digital.....   | 82 |
| Tabela 8 – Dimensões do gêmeo digital por processo do modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital.....                   | 84 |
| Tabela 9 – Relação das funcionalidades do gêmeo digital por requerimento e dimensão .....   | 85 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |  |
|--------|--|
| ACSP   | <i>Atelier Cooperatif de Suivi de Projet</i> (utilizado em francês)                                    |
| AGPS   | <i>Adaptive Generic Product Structure</i> (utilizado em inglês)  |
| ANP    | <i>Analytic Network Process</i> (utilizado em inglês)  |
| APQP   | <i>Advanced Product Quality Planning</i> (utilizado em inglês)   |
| BIM    | <i>Business Information Modeling</i> (utilizado em inglês)   |
| BOL    | Início da Vida (do inglês, <i>Beginning of Life</i> )  |
| BOM    | Lista de Materiais (do inglês, <i>Bill of Material</i> )   |
| BPM    | <i>Business Processes Model</i> (utilizado em inglês)  |
| BPs    | <i>Business Processes</i> (utilizado em inglês)  |
| C2M    | <i>Concept2Market</i> (utilizado em inglês)  |
| CAD    | <i>Computer Aided Design</i> (utilizado em inglês)   |
| CAE    | <i>Computer Aided Engineering</i> (utilizado em inglês)  |
| CAH    | <i>Customer Architecture Hierarchy</i> (utilizado em inglês)   |
| CAM    | <i>Computer Aided Manufacturing</i> (utilizado em inglês)  |
| CAPP   | <i>Computer Aided Process Planning</i> (utilizado em inglês)   |
| CAX    | <i>Computer Aided Technologies</i> (utilizado em inglês)   |
| CBR    | <i>Case Based Reasoning</i> (utilizado em inglês)  |
| CIM    | <i>Computation Independent Model</i> (utilizado em inglês)   |
| CMM    | <i>Capability Maturity Modeling</i> (utilizado em inglês)  |
| CPG    | <i>Consumer Packaged Goods</i> (utilizado em inglês)   |
| CPI    | <i>Collaborative Product Innovation</i> (utilizado em inglês)  |
| COM    | <i>Core Product Model</i> (utilizado em inglês)  |
| CPS    | <i>Cyber Physical Systems</i> (utilizado em inglês)  |
| CRM    | <i>Customer Relationship Management</i> (utilizado em inglês)  |
| DALTON | <i>Data Linked Through Occurrences Network</i> (utilizado em inglês)                                   |
| DCO    | <i>Design Change Orders</i> (utilizado em inglês)  |
| DDM    | <i>Design Data Management</i> (utilizado em inglês)  |
| DFA    | <i>Digital Factory Assistant</i> (utilizado em inglês)   |
| DFMA   | <i>Design for Manufacturing And Assembly</i> (utilizado em inglês)                                     |
| DfS    | <i>Design for Sustainability</i> (utilizado em inglês)   |
| DFX    | <i>Design for Excellence</i> (utilizado em inglês)   |
| DT     | <i>Digital twin</i> (utilizado em inglês)  |
| DTMP   | Gêmeo Digital do Processo de Fabricação (do inglês, <i>Digital Twin of the Manufacturing Process</i> ) |
| ECU    | <i>Electrical Control Unit</i> (utilizado em inglês)   |
| EOL    | Fim da Vida Útil (do inglês, <i>End-of-Life</i> )  |
| ERP    | <i>Enterprise Resource Planning</i> (utilizado em inglês)  |
| FAHP   | <i>Fuzzy Analytic Hierarchy Process</i> (utilizado em inglês)  |
| FEA    | <i>Finite Element Analysis</i> (utilizado em inglês)   |

|         |   |
|---------|---|
| FLM     | <i>Fashion Lifecycle Management</i> (utilizado em inglês)   |
| FSI     | <i>Fluid System Interaction</i> (utilizado em inglês)   |
| GE      | <i>General Electric</i> (utilizado em inglês)   |
| GDP     | Gestão do Desenvolvimento de Produtos   |
| HACCP   | <i>Hazard Analysis and Critical Control Points</i> (utilizado em inglês)                                      |
| HPNGV   | <i>High Pressure Nozzle Guide Vane</i> (utilizado em inglês)  |
| HTTP    | <i>Hypertext Transfer Protocol</i> (utilizado em inglês)  |
| IA      | Inteligência Artificial   |
| ID2     | <i>Innovation Development and Diffusion</i> (utilizado em inglês)   |
| IMKS    | <i>Knowledge Systems</i> (utilizado em inglês)  |
| IoMT    | <i>Medical Things</i> (utilizado em inglês)   |
| IoT     | Internet das Coisas (do inglês, Internet of Things)   |
| IPM     | <i>Integrated Product Model</i> (utilizado em inglês)   |
| JCR     | <i>Journal Citation Report</i> (utilizado em inglês)  |
| JEHDO   | <i>Duty Cycle Optimization Based Algorithm</i> (utilizado em inglês)  |
|         | <i>Knowledge Based Environment to Support Product Design Validation</i> (utilizado em inglês)                 |
| KBE     |   |
| KBEnv   | <i>Knowledge Based Environment</i> (utilizado em inglês)  |
| KDTMC   | Célula de Fabricação de Gêmeos Digitais (do inglês, <i>Knowledge Driven Digital Twin Manufacturing Cell</i> ) |
| KM      | <i>Knowledge Management</i> (utilizado em inglês)   |
| LCM     | <i>Life Cycle Management</i> (utilizado em inglês)  |
| MBD     | <i>Model Based Definition</i> (utilizado em inglês)   |
| MDA     | <i>Model Driven Architecture</i> (utilizado em inglês)  |
| MES     | <i>Manufacturing Execution Software</i> (utilizado em inglês)   |
| MOL     | Meio de Vida Útil (do inglês, Middle-of-Life )  |
| MOS     | <i>Manufacturing Operations System</i> (utilizado em inglês)  |
| MPM     | <i>Multi-Project Management</i> (utilizado em inglês)   |
| MPS     | <i>Manufacturing Problem Solving</i> (utilizado em inglês)  |
| MRO     | <i>Aviation Maintenance, Repair and Overhaul</i> (utilizado em inglês)  |
| NPD     | <i>New Product Development</i> (utilizado em inglês)  |
| OAM     | <i>Open Assembly Model</i> (utilizado em inglês)  |
| OEMs    | <i>Original Equipment Manufacturers</i> (utilizado em inglês)   |
| OWL     | <i>Web Ontology Language</i> (utilizado em inglês)  |
| PDM     | <i>Product Data Management</i> (utilizado em inglês)  |
| PDMS    | <i>Product Data Management Systems</i> (utilizado em inglês)  |
| PDP     | Processo de Desenvolvimento do Produto  |
| PEGASUS | <i>Product Design Engineering Based on Generative Assembly Sequences Planning</i> (utilizado em inglês)       |
| PEIDs   | <i>Product Embedded Information Devices</i> (utilizado em inglês)   |
| PFMEA   | <i>Process Failure Mode and Effect Analysis</i> (utilizado em inglês)   |
| PHM     | Prognósticos e Gestão da Saúde (do inglês, Prognostics and Health Management)                                 |
| PIM     | <i>Product Information Model</i> (utilizado em inglês)  |

|           |   |
|-----------|---|
| PLM       | Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto (do inglês, <i>Product Lifecycle Management</i> )                               |
| PPM       | <i>Project Portfolio Management</i> (utilizado em inglês)   |
| PROMISE   | <i>Product Lifecycle Management and Information Tracking Using Smart Embedded Systems</i> (utilizado em inglês)           |
| PS        | Chão de Loja Físico (do inglês, <i>Physical Shop-floor</i> )  |
| PSL       | <i>Process Specification Language</i> (utilizado em inglês)   |
| PSM       | <i>Platform Specific Model</i> (utilizado em inglês)  |
| PSSs      | <i>Product Service Systems</i> (utilizado em inglês)  |
| QFD       | <i>Quality Function Deployment</i> (utilizado em inglês)  |
| QLM       | <i>Quantum Lifecycle Management</i> (utilizado em inglês)   |
| RBAC      | <i>Based Access Control Model</i> (utilizado em inglês)   |
| RFID      | <i>Radio Frequency Identification</i> (utilizado em inglês)   |
| RMS       | <i>Reliability, Maintainability and Supportability</i> (utilizado em inglês)  |
| SCM       | Gestão da Cadeia de Suprimentos (do inglês, <i>Supply Chain Management</i> )  |
| SDTD      | Dados dos Gêmeos Digitais do Chão de Fábrica (do inglês, <i>shop-floor gêmeo digital data</i> )                           |
| SDTMP     | Gêmeo Digital Inteligente no Processo de Fabricação (do inglês, <i>Smart Gêmeo digital of the Manufacturing Process</i> ) |
| SEASALT   | <i>Shared Experience Using An Agent Based System Architecture Layout</i> (utilizado em inglês)                            |
| SciMAT    | <i>Science Mapping Analysis Tool</i> (utilizado em inglês)  |
| SKLACD    | <i>Skeleton Geometry Based Assembly Context Definition</i> (utilizado em inglês)  |
| SME       | <i>Small and Medium Enterprises</i> (utilizado em inglês)   |
| SOA       | <i>Server Oriented Architecture</i> (utilizado em inglês)   |
| SSS       | Sistema de Serviço de Chão de Loja (do inglês, <i>shop-floor service system</i> )   |
| STEP      | <i>Standard for the Exchange of Product Data Model</i> (utilizado em inglês)  |
| SWRL      | <i>Semantic Web Rule Language</i> (utilizado em inglês)   |
| SysML     | <i>Mechatronic System and System Modelling Language</i> (utilizado em inglês)   |
| TC        | <i>Teamcenter</i> (utilizado em inglês)   |
| TcSE      | <i>Siemens Teamcenter Software</i> (utilizado em inglês)  |
| TIFO      | <i>Technoware, Inforware, Functionware, and Orgaware</i> (utilizado em inglês)  |
| TRIZ      | <i>Teoriya Resheniya Izobreatatelskikh Zadatch</i> (utilizado em russo)   |
| UML       | <i>Unified Modeling Language</i> (utilizado em inglês)  |
| USP       | Universidade de São Paulo   |
| UTW       | <i>Ural Turbine Works</i> (utilizado em inglês)   |
| VOSviewer | <i>Visualizing Scientific Landscapes</i> (utilizado em inglês)  |
| VR        | Virtual Reality (utilizado em inglês)   |
| VS        | Chão de Loja Virtual (do inglês, <i>virtual shop-floor</i> )  |
| VSM       | <i>Value Stream Mapping</i> (utilizado em inglês)   |
| W3C       | <i>World Wide Web Consortium</i> (utilizado em inglês)  |
| WoS       | <i>Web of Science</i> (utilizado em inglês)   |
| XML       | <i>Extensible Markup Language</i> (utilizado em inglês)   |

## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>17</b> |
| <b>2</b>     | <b>METODOLOGIA, MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                           | <b>21</b> |
| 2.1          | MÉTODO APLICADO .....  | 21        |
| 2.2          | DETALHAMENTO DOS PROCEDIMENTOS.....                                    | 22        |
| <b>3</b>     | <b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>                                      | <b>27</b> |
| 3.1          | INDÚSTRIA 4.0.....   | 27        |
| 3.2          | GÊMEO DIGITAL.....   | 29        |
| <b>3.2.1</b> | <b>Definição e funções .....</b>                                       | <b>29</b> |
| <b>3.2.2</b> | <b>Estruturação.....</b>   | <b>36</b> |
| <b>3.2.3</b> | <b>Simulações .....</b>  | <b>36</b> |
| <b>3.2.4</b> | <b>A aplicação .....</b>   | <b>38</b> |
| <b>3.2.5</b> | <b>Áreas de aplicação .....</b>  | <b>43</b> |
| 3.2.5.1      | Aeroespacial .....   | 43        |
| 3.2.5.2      | Gerenciamento do ciclo de vida do produto .....                        | 43        |
| 3.2.5.3      | Impressão 3D.....  | 44        |
| 3.2.5.4      | Automobilística.....   | 44        |
| 3.2.5.5      | Biológica.....   | 44        |
| 3.2.5.6      | Manufatureira .....  | 45        |
| 3.2.5.7      | Armazenagem .....  | 46        |
| 3.2.5.8      | Saúde.....   | 46        |
| 3.2.5.9      | Outras áreas .....   | 47        |
| 3.3          | Gerenciamento do ciclo de vida do produto .....                        | 49        |
| <b>3.3.1</b> | <b>Fases do gerenciamento de ciclo de vida do produto.....</b>         | <b>52</b> |
| <b>3.3.2</b> | <b>Aplicações do gerenciamento do ciclo de vida do produto.....</b>    | <b>54</b> |
| <b>3.3.3</b> | <b>Implementação do gerenciamento do ciclo de vida do produto.....</b> | <b>57</b> |
| 3.4          | A INTEGRAÇÃO DO GÊMEO DIGITAL NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO.....         | 59        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.5      | MODELO DE REFERÊNCIA .....  | 62         |
| <b>4</b> | <b>MODELOS DO GERENCIAMENTO DO CICLO DE VIDA DO PRODUTO E GÊMEO DIGITAL .....</b>   | <b>64</b>  |
| 4.1      | MODELO DO GERENCIAMENTO DO CICLO DE VIDA DO PRODUTO.....  | 64         |
| 4.2      | MODELO DO GÊMEO DIGITAL .....   | 70         |
| 4.2.1    | Desenvolvimento de um gêmeo digital.....  | 70         |
| 4.2.2    | Desenvolvimento e operação do gêmeo digital para sistemas técnicos e serviços .....                                       | 72         |
| 4.2.3    | Requisitos dos gêmeos digitais na Indústria 4.0.....  | 75         |
| 4.3      | RELAÇÕES ENTRE OS MODELOS .....   | 77         |
| 4.3.1    | O modelo de referência do gerenciamento do ciclo de vida do produto e os processos do ciclo de vida do gêmeo digital..... | 77         |
| 4.3.2    | Os requerimentos e as dimensões.....  | 82         |
| 4.4      | MAPEAMENTO DAS FUNCIONALIDADES DO GÊMEO DIGITAL .....   | 83         |
| <b>5</b> | <b>MODELO DE REFERÊNCIA DO CICLO DE VIDA DO GÊMEO DIGITAL .....</b>   | <b>87</b>  |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÕES.....</b>  | <b>94</b>  |
| 6.1      | CONTRIBUIÇÕES PARA A LITERATURA.....  | 94         |
| 6.1.1    | Integração entre o gerenciamento do ciclo de vida e o gêmeo digital .....   | 94         |
| 6.1.2    | Modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital.....   | 95         |
| 6.1.3    | Mapeamento das funcionalidades do gêmeo digital .....   | 96         |
| 6.2      | LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....  | 96         |
| 6.3      | OPORTUNIDADES DE ESTUDOS FUTUROS .....  | 96         |
|          | <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>99</b>  |
|          | <b>APÊNDICE A - LISTA DE AUTORES VS ÁREA DE APLICAÇÃO DO GERENCIAMENTO DO CICLO DE VIDA.....</b>                          | <b>117</b> |
|          | <b>APÊNDICE B - LISTA DE AUTORES VS PALAVRA-CHAVE DO GERENCIAMENTO DO CICLO DE VIDA.....</b>                              | <b>119</b> |
|          | <b>APÊNDICE C - LISTA DE AUTORES VS FUNCIONALIDADE DO GÊMEO DIGITAL ....</b>  | <b>123</b> |
|          | <b>APÊNDICE D - DIMENSÕES DO GÊMEO DIGITAL POR ATIVIDADE .....</b>  | <b>126</b> |
|          | <b>APÊNDICE E - MODELO DE REFERÊNCIA DO CICLO DE VIDA DO GÊMEO DIGITAL .....</b>  | <b>130</b> |



## 1 INTRODUÇÃO

O gêmeo digital, também conhecido como *digital twin* (DT), é uma das tecnologias mais promissoras para a realização da fabricação inteligente na Indústria 4.0 (TAO *et al.*, 2019a) e tem sido reconhecido, internacionalmente, como uma das possíveis respostas estratégicas das empresas manufatureiras em relação à atualização de novas técnicas (LIU, J. *et al.*, 2019a).

Essa tecnologia também pretende alcançar a próxima geração da fabricação inteligente, por meio da combinação simultânea de artefatos físicos com sua representação digital (WEYER *et al.*, 2016). Com isso, ela pode ser considerada emergente e de rápido crescimento, uma vez que vem atraindo atenção no mundo todo, por possibilitar a conexão entre o mundo físico e virtual (TAO *et al.*, 2019b; LIU, J. *et al.*, 2019b). Isso é evidenciado pelo aumento das publicações e patentes sobre gêmeo digital nos últimos anos (TAO *et al.*, 2019a).

Um dos objetivos do gêmeo digital é fornecer às empresas uma nova maneira de realizar a produção inteligente (LIU, J. *et al.*, 2019b), prometendo, assim, revolucionar a experiência do cliente ao proporcionar uma visão holística (BOLTON *et al.*, 2018). O gêmeo digital é, certamente, um objetivo audacioso que exige desenvolvimentos significativos, sejam eles científicos ou técnicos (TUEGEL *et al.*, 2011).

Os gêmeos digitais (cópias virtuais) impulsionados pelos dados coletados de sensores em tempo real, são sofisticados modelos de computador que espelham quase todas as facetas de um produto, processo ou serviço e estão revolucionando a indústria e se tornando um dos principais facilitadores da fabricação inteligente (DING *et al.*, 2019 & TAO; QI, 2019). Embora a pesquisa e a aplicação do gêmeo digital cresça continuamente, muitas questões ainda devem ser exploradas (ZHENG; YANG; CHENG, 2019).

O gêmeo digital também é uma abordagem promissora para superar os obstáculos existentes e reduzir os esforços em engenharia reversa (WEYER *et al.*, 2016). Seu conceito nasceu para ser incorporado a sistemas em conjunto com outras tecnologias e áreas de conhecimento. Entre elas, está o *big data*, quando incorporado a esse ambiente, o gêmeo digital possibilita a realização de ainda mais análises e o gerenciamento de quantidades significativas de informações para diagnosticar e dar prognósticos melhorados, perante a fabricação inteligente (MOYNE; ISKANDAR, 2017).

Dentre as inúmeras vantagens do gêmeo digital, está a redução de tempo gasto e custos, pois quando, adequadamente, validado com dados experimentais, pode substituir ou reduzir experimentos físicos, caros e demorados, por "experimentos numéricos", rápidos e baratos (KNAPP *et al.*, 2017).

Sua aplicação torna a simulação de computador, relativamente, rápida e barata de implantar e o custo do fracasso pode ser menor, estimulando o incentivo à experimentação e o pensamento criativo (GABOR *et al.*, 2016). Além disso, os modelos computacionalmente eficientes e de alta fidelidade podem simular os fatores mais importantes que afetam as propriedades, comportamentos e questões relacionadas a processos, produtos e serviços (DEBROY *et al.*, 2017; TUEGEL *et al.*, 2011).

Existem muitas vantagens de construir um gêmeo digital, como: minimizar a otimização de tentativa e erro, encurtar o caminho para a qualificação do produto e reduzir defeitos, o número total de experimentos necessários para a qualificação de peças e inspeções manuais nos processos e, por consequência, o trabalho manual (DEBROY *et al.*, 2017; SÖDERBERG *et al.*, 2017).

O conceito do gêmeo digital também surgiu como elemento-chave nas estratégias da Indústria 4.0 (BRUYNSEELS; DE SIO; VAN DEN HOVEN, 2018), podendo ser utilizado no desenvolvimento de veículos aeroespaciais que duram mais tempo e suportam condições mais extremas, como, por exemplo, o realizado pela NASA (BRUYNSEELS; DE SIO; VAN DEN HOVEN, 2018). Ele também visa fornecer previsões de vida útil e auxiliar os engenheiros, com mais informações que permitirem com que melhores decisões de manutenção sejam tomadas em tempo hábil (TUEGEL *et al.*, 2011).

Outra categoria de aplicação do gêmeo digital é a manutenção preditiva, em que é utilizado para identificar anomalias, muito antes das peças quebrarem. Porém, segundo Gabor *et al.* (2016), ainda faltam pesquisas para compreender como o gêmeo digital pode ser integrado ao processo de desenvolvimento e ao ciclo de vida geral do sistema. Segundo Anderl *et al.* (2018), um modelo do gêmeo digital precisa ser desenvolvido com um, produto em todas as fases do seu processo de desenvolvimento.

Atualmente, os estudos sobre o gêmeo digital são, majoritariamente, realizados por pesquisadores oriundos da área de gerenciamento do ciclo de vida do produto (PLM), conforme

definição do item 3.3 deste trabalho, pois a integração entre os dois conceitos (gerenciamento do ciclo de vida do produto e gêmeo digital) apoiam o processo de desenvolvimento de produto.

O gerenciamento do ciclo de vida do produto tem como foco providenciar uma representação de um ciclo de vida completo do produto, incluindo todas as informações e processos necessários para planejar, desenvolver, fabricar e apoiar o produto, desde sua concepção até o final de seu ciclo de vida, integrando pessoas, processos, sistemas de negócios e informações (LEE *et al.*, 2008).

Quando integrado ao gerenciamento do ciclo de vida do produto, o gêmeo digital apoia o ciclo de informações necessárias para a construção de um processo mais eficaz e acurado. Dessa forma, encontrou-se a lacuna de pesquisa em relação ao gêmeo digital ser desenvolvido para cada instância do produto durante o ciclo de vida, definiu-se, como objetivo de pesquisa, a criação de um modelo de referência, por meio da integração entre o gêmeo digital e o gerenciamento do ciclo de vida do produto, na tentativa de responder a seguinte pergunta: “como o gêmeo digital contribui para o gerenciamento do ciclo de vida do produto (PLM)?”. Para alcançar esse objetivo, também há os seguintes objetivos específicos:

- a) mapear as funcionalidades do gêmeo digital;
- b) mapear os processos, etapas, atividades e procedimentos necessários para o gêmeo digital e a relação desses tópicos com o gerenciamento do ciclo de vida do produto;
- c) relacionar as funcionalidades e os requerimentos do gêmeo digital.

A estrutura e a ordem dos capítulos podem ser visualizadas na Figura 1.

Figura 1 – Organização do texto em capítulos do trabalho



Fonte: Elaboração própria.

No presente capítulo (capítulo 1 – Introdução), há a introdução do tema, relatando a importância do gêmeo digital, a pergunta de pesquisa, os objetivos e a organização do texto. A partir do capítulo 2, será possível compreender a metodologia, materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho, além de seu delineamento.

A revisão bibliográfica, composta pelo detalhamento das três revisões bibliométricas (na qual foi possível encontrar a lacuna e a pergunta de pesquisa), pode ser encontrada no capítulo 3 – Revisão da Literatura. Nesse capítulo, serão abordados os conceitos acadêmicos sobre os temas, individualmente: Indústria 4.0 (3.1), o gêmeo digital (3.2) e gerenciamento do ciclo de vida do produto (3.3). Após, foi feita uma explanação sobre a integração dos temas: gêmeo digital e o gerenciamento do ciclo de vida do produto (3.4), além da definição utilizada nesta pesquisa para o modelo de referência (3.5).

Em seguida, o modelo de integração dos temas é apresentado, com base na metodologia previamente definida. Temos, assim, no capítulo 4 – O modelo do gerenciamento do ciclo de vida do produto e do gêmeo digital e o relacionamento entre os modelos dos dois temas. O mapeamento das funcionalidades do gêmeo digital pode ser visto na seção 4.4 e o modelo de referência, resultado desta pesquisa, no capítulo 5.

O estudo é, então, finalizado pela descrição da limitação da pesquisa, oportunidades de pesquisas futuras, conclusões e contribuições para a literatura que este trabalho agrega, presentes no capítulo 6 – Conclusões.

A justificativa deste trabalho é agregar de forma relevante os estudos acadêmicos sobre o gêmeo digital para contribuir com sociedade através da inovação tecnológica durante o gerenciamento do ciclo de vida do produto e, também, complementar a implementação da fábrica do futuro da universidade de São Paulo (USP).

## 2 METODOLOGIA, MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo visa apresentar o método aplicado para a pesquisa e explorar os detalhes dos procedimentos aplicados, o delineamento e as etapas aplicadas no trabalho.

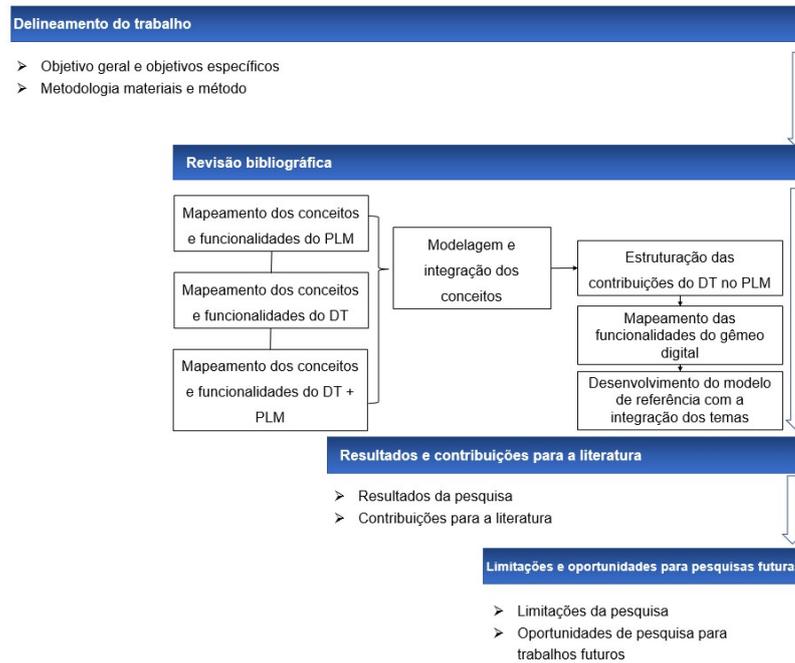
### 2.1 MÉTODO APLICADO

Com o intuito de responder à questão de estudo proposta, adotou-se a estratégia de multimétodos, composta pela revisão sistemática de literatura com três revisões bibliométricas: Indústria 4.0, o gêmeo digital e gerenciamento do ciclo de vida do produto. As revisões bibliométricas do gêmeo digital e do gerenciamento do ciclo de vida do produto foram tomadas como base para o entendimento da lacuna da pesquisa presente na integração dos temas. Devido a isso, uma terceira revisão bibliométrica foi realizada sobre a relação entre os dois temas: gêmeo digital e o gerenciamento do ciclo de vida do produto. Além disso, o estudo também é composto pela pesquisa científica com abordagem exploratória, cuja aplicação tem por finalidade a elaboração de instrumento de pesquisa adequado à realidade de forma qualitativa.

A aplicação dos métodos visa obter um modelo de referência integrado entre o ciclo de vida do produto e o gêmeo digital, tendo, como destaque, as contribuições do gêmeo digital no ciclo de vida do produto. Essa aplicação também busca investigar e identificar os potenciais da integração dos sistemas, possibilitando a geração de uma base de possíveis extrapolações para o contexto real de aplicação em indústrias manufatureiras, por meio da aplicação do modelo de referência.

O método aqui utilizado é composto por quatro etapas: 1) delineamento do trabalho; 2) revisão bibliográfica; 3) resultados e contribuições para a literatura e, por fim, 4) limitações e oportunidades para pesquisas futuras, estruturadas conforme a figura 2.

Figura 2 – Estrutura metodológica



Fonte: Elaboração própria.

Como observado, o presente trabalho foi delineado conforme o objetivo geral e específicos e metodologia, materiais e método. Já a revisão bibliográfica é composta por três revisões, seguida da modelagem e integração dos conceitos (capítulo 3). A partir dessa modelagem, é possível compreender a estruturação das contribuições do gêmeo digital para o gerenciamento do ciclo de vida do produto, o mapeamento das funcionalidades do gêmeo digital (capítulo 4) e o desenvolvimento do modelo de referência (capítulo 5), seguido dos resultados, contribuições para a literatura, limitações da pesquisa e oportunidades de pesquisa para trabalhos futuros (o capítulo 6).

## 2.2 DETALHAMENTO DOS PROCEDIMENTOS

A revisão sistemática da literatura é uma metodologia utilizada para levantamento do estado da arte de modo a detectar os avanços e as limitações das pesquisas já publicadas (PALMARINI *et al.*, 2018), o que permite identificar futuras oportunidades e lacunas de pesquisa e evidenciar a estrutura, causas, efeitos e processos do sujeito (DIKICI *et al.*, 2018; MAIER; MEYER; STEINBEREITHNER, 2016).

Para o tema do gerenciamento do ciclo de vida do produto, em um primeiro momento, foram encontrados 962 documentos, selecionados após aplicação de diferentes filtros. Desse número, 469 artigos são sobre o tema de interesse, utilizados para a análise bibliométrica e de redes. Após, foram selecionados 56 artigos mais relevantes, formando, assim, a base de dados para a análise de conteúdo.

Já para o tema “gêmeo digital”, o estudo foi, inicialmente, realizado por meio de duas bases de dados: *Scopus* e *Web of Science (WoS)*. A palavra-chave, utilizada para a primeira revisão de literatura, foi: \*gêmeo digital\*, resultando em um total de 1739 documentos da base de dados *Scopus* e 1730 da base de dados *WoS*, em que, após a realização da análise por título e por resumo, retirou-se os documentos duplicados e filtrou-se com base no objetivo da pesquisa, resultando em 56 artigos, amostra da qual foi objeto de interesse para o estudo bibliométrico.

Os dois estudos bibliométricos tiveram como princípio os seguintes fatores: codificação dos artigos que apresentaram semelhanças ou pontos de relevância para o tema; análise de *network* (por meio dos sistemas *VOSviewer* e *SciMAT*); análise dos países dos coautores, autores mais relevantes para o tema e o cálculo do fator de impacto, que é composto pela seguinte equação:

<sup>1</sup>

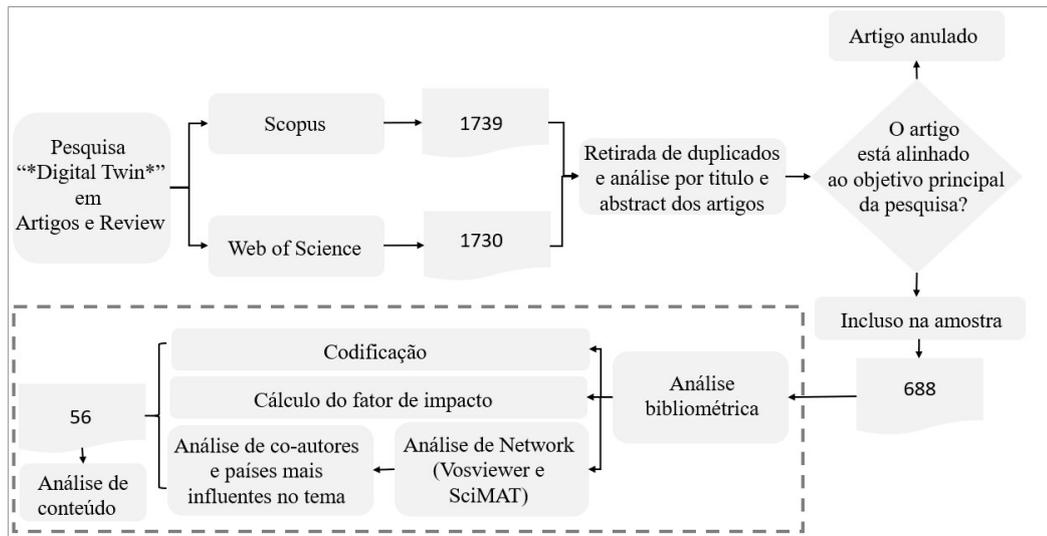
$$IF = C * (JCR + 1)$$

Seguindo essa perspectiva, esses documentos foram aplicados na análise da amostra para geração dos resultados apresentados. Ademais, a partir dessa análise, foram lidos e analisados 112 documentos (no total para os dois temas analisados de forma individual). O processo trilhado no estudo bibliométrico pode ser visualizado nas figuras 3 e 4.

---

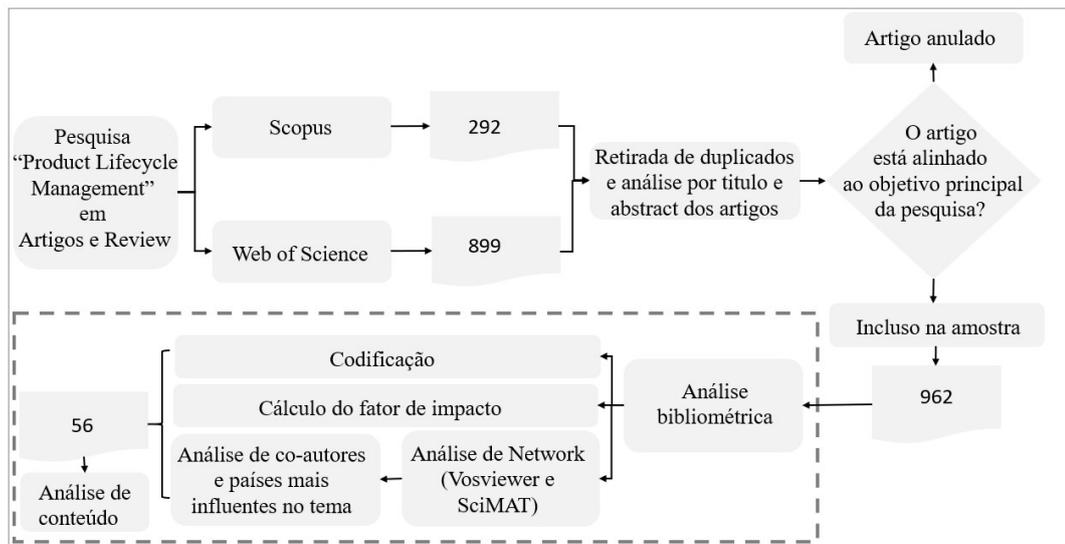
<sup>1</sup> *C* – Representa o número de citações e *JCR* – o fator de impacto do jornal da qual o documento foi publicado, baseado no índice *Journal Citation Report*.  
Fonte: Carvalho; Fleury; Lopes. (2013).

Figura 3 – Processo sistemático da revisão de literatura do gêmeo digital



Fonte: Elaboração própria.

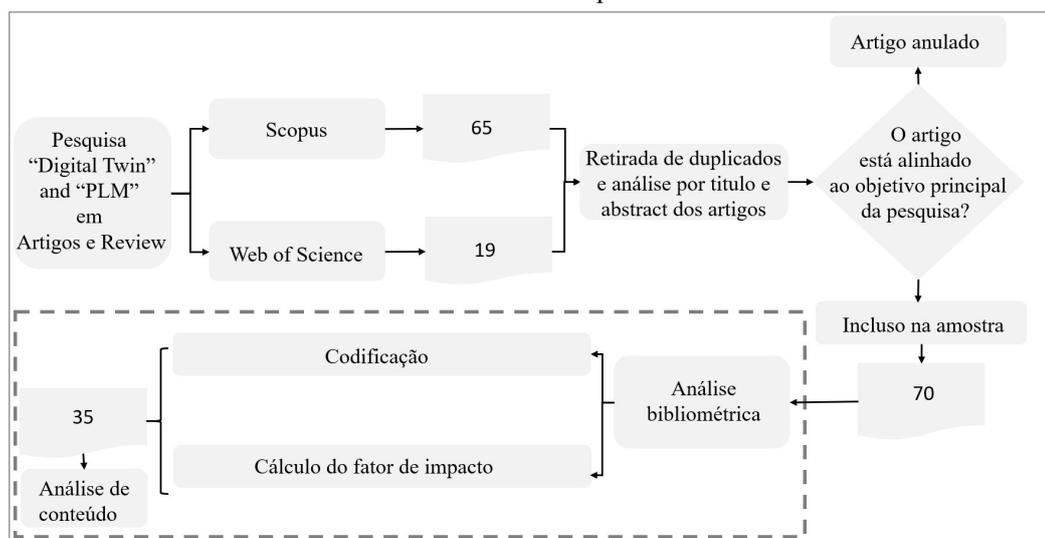
Figura 4 – Processo sistemático da revisão de literatura do gerenciamento do ciclo de vida do produto



Fonte: Elaboração própria.

Como mencionado anteriormente, após a realização das duas revisões bibliométricas com os temas, encontrou-se a lacuna entre as interseções entre os dois temas que está na interseção dos temas. Por isso, uma terceira revisão bibliométrica foi realizada sobre a interseção entre os dois temas (o gêmeo digital e o gerenciamento do ciclo de vida do produto), para entender como a aplicação entre eles, está sendo abordada pela literatura. Na figura 5, é possível visualizar o processo sistemático realizado para a terceira revisão de literatura.

Figura 5 – Processo sistemático da revisão de literatura da integração dos temas gêmeo digital e gerenciamento do ciclo de vida do produto



Fonte: Elaboração própria.

Após os processos sistemáticos da revisão de literatura, foram definidos o objetivo geral e os objetivos específicos, conforme descrito no capítulo 1. Com fundamento na discussão detalhada, baseada na literatura e na aplicação do tema, pode-se avaliar os resultados em busca de uma resposta à pergunta da pesquisa: “como o gêmeo digital contribui no gerenciamento do ciclo de vida do produto (PLM)?”

Nas etapas de mapeamento dos conceitos e funcionalidades do gerenciamento do ciclo de vida do produto e do gêmeo digital, foram levantados os principais fundamentos, definições e funcionalidades de cada um dos conceitos, visando extrair as características principais, as questões inexploradas sobre o tema e as áreas que mais vem sendo afetadas ou exploradas por eles.

Na etapa de modelagem e integração dos conceitos, foi criado um modelo (capítulo 4) que inicia a integração entre os conceitos. Na continuidade do trabalho, serão detalhadas as funcionalidades do gêmeo digital e quais as atividades podem ser integradas nas etapas do ciclo de vida do produto, gerando, assim, as interrelações entre os tópicos.

As relações serão sintetizadas e priorizadas conforme a sinergia (definida para o trabalho como a junção de dois ou mais conceitos na realização de uma função) para assim construir a estruturação e as contribuições do gêmeo digital para o gerenciamento do ciclo de vida do produto.

Com o mapeamento das funcionalidades, o próximo passo foi realizar o modelo de referência com a integração dos conceitos, tendo como principal objetivo responder à questão

de pesquisa do trabalho. O modelo é composto pelo descritivo e pelas especificações de cada possível integração entre os temas. Ele também identifica os procedimentos e atividades de aplicação mais adequadas a um processo mais otimizado para cada etapa do ciclo de vida do gêmeo digital.

Por último, foi realizada a análise das contribuições da pesquisa para o campo acadêmico e a apresentação de oportunidades para trabalhos futuros.

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

Como mencionado, este capítulo engloba a explanação da revisão sistemática da literatura detalhada, introduzindo a Indústria 4.0, em que está situada o tema do gêmeo digital, seguido da explanação do gêmeo digital e do gerenciamento do ciclo de vida do produto e, por fim, a integração dos dois temas, por meio do modelo de referência.

#### 3.1 INDÚSTRIA 4.0

No atual contexto competitivo de negócios, as empresas vêm, cada vez mais, enfrentando desafios referentes a questões que influenciam a tomada de decisão para melhorar sua produtividade. O crescimento surpreendente no avanço e adoção da tecnologia da informação e das redes sociais tem influenciado, progressivamente, a percepção dos consumidores sobre inovação, qualidade, variedade e velocidade de entrega dos produtos (LIAO *et al.*, 2017), o que requer estabelecer a capacidade de autoconsciência, auto previsão, auto comparação, auto reconfiguração e automanutenção (LEE; KAO; YANG, 2014). Tudo isso vai ao encontro dessas necessidades, acarretando o surgimento da Indústria 4.0.

A Indústria 4.0 é um dos assuntos mais prevalentes na engenharia de produção (UHLEMANN; LEHMANN; STEINHILPER, 2017), uma vez que traz tecnologias de informação emergentes, como *IoT*, *big data* e computação em nuvem, juntamente com outras tecnologias, como a de inteligência artificial (WANG *et al.*, 2016), para solucionar muitos dos desafios enfrentados pela indústria moderna. A “Indústria 4.0”, símbolo da 4ª geração de fabricação iniciada pela Alemanha, impulsiona a transformação do futuro da manufatura e pode ser considerada como uma das várias iniciativas, em todo o mundo, que enfatiza a importância da manufatura industrial para a economia e para a sociedade (ROSEN *et al.*, 2015). Como consequência, a manufatura inteligente tornou-se um tópico de pesquisa predominante no ambiente da Indústria 4.0 (DING *et al.*, 2019).

Com sua inserção, novas estratégias avançadas de fabricação foram criadas com o objetivo de ajudar os fabricantes a alcançarem transições sistêmicas e processuais bem-sucedidas, o que resultou no aumento do número de células de fabricação inteligente, importantes para atender às demandas individualizadas dos clientes (LENG *et al.*, 2019b). No entanto, para que a aplicação da Indústria 4.0 seja completa, há, ainda, a necessidade da

aplicação de técnicas de automatização nos processos, principalmente durante o processo de aquisição de dados, técnica ainda não comumente praticada.

Além disso, existem déficits que devem ser observados no decorrer de sua aplicação para processos em que a aquisição de dados não está totalmente automatizada, resultando em ineficiências no processo. A automação é um elemento-chave da Indústria 4.0, bem como a avaliação, quantificação e análise dos dados coletados (UHLEMANN; LEHMANN; STEINHILPER, 2017).

Um paradigma transformador é tornar a fabricação um serviço de nuvem sob demanda, para alcançar a flexibilidade de negócios necessária na Indústria 4.0, permitindo, dessa forma, a rápida configuração de dispositivos de fabricação, conectados livremente, para o desenvolvimento de produtos altamente personalizados (LU; XU, 2019). No entanto, para que a Indústria 4.0 seja uma realidade, é essencial implementar a integração horizontal da rede de valor corporativo, a integração de ponta a ponta da cadeia de valor da engenharia e a integração vertical das fábricas (WANG *et al.*, 2016).

Dado o contexto da Indústria 4.0 que conceitualiza e possibilita uma realidade promissora com o uso de tecnologias inteligentes (como *IoT*, *big data*, sistemas físicos cibernéticos, inteligência artificial e realidade aumentada), surge, também, os gêmeos digitais, uma das tecnologias de habilitação mais promissoras para a realização da fabricação inteligente e da Indústria 4.0 (TAO *et al.*, 2019b).

O termo "gêmeo digital" foi inspirado nos desenvolvimentos conhecidos em termos como "Indústria 4.0" ou "internet industrial", assim como na composição das definições: "mundos" físico e virtual. Dessa maneira, os sistemas físicos cibernéticos percebem que os sistemas inteligentes estão conectados por meio da internet das coisas e serviços.

Em geral, um gêmeo digital é uma réplica virtual de um "ativo físico" (por exemplo, máquina, componente e parte do ambiente) que contém modelos de dados (geometria, estrutura, ...), funcionalidades (processamento de dados, comportamento, ...), e interfaces de comunicação. Tudo isso integra o conhecimento resultante das atividades de modelagem em engenharia (modelo digital) e de dados de trabalhos capturados durante a operação real (SCHLUSE *et al.*, 2018).

O gêmeo digital é considerado, portanto, como a contrapartida virtual e informatizada de um sistema físico que pode ser usado para simular diferentes contextos para diversos

propósitos, explorando, assim, uma sincronização em tempo real dos dados. Essa sincronização somente é possível devido às tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Portanto, o gêmeo digital é um dos principais conceitos associados à Indústria 4.0 (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017).

## 3.2 GÊMEO DIGITAL

A origem do gêmeo digital é compreendida de diferentes formas por vários autores: Negri, Fumagalli e Macchi (2017) explicitam que o gêmeo digital nasceu no campo aeroespacial e só depois foi adotado em contextos fabris. Gabor *et al.* (2016) afirmam que o desenvolvimento do gêmeo digital está, originalmente, voltado a auxiliar o projeto, estabelecendo mais exatidão na operação de máquinas, no que diz respeito à maiores exigências de funcionalidade e flexibilidade. Já Shafto *et al.* (2010), por outro lado, mostram que o termo “gêmeo digital” foi trazido a público, pela primeira vez, no roteiro de tecnologia integrada da NASA, para obter modelagem, simulação, tecnologia da informação e processamento no ambiente aeroespacial.

### 3.2.1 Definição e funções

Os gêmeos digitais representam objetos reais que possuem dados, funções e capacidades de comunicação no espaço virtual (SCHLUSE *et al.*, 2018), coletando e avaliando as informações continuamente, permitindo, assim, encurtar e agilizar o ciclo de produção, reduzir o tempo de introdução de novos produtos, entre outras vantagens. O conceito de gêmeo digital, portanto, é construído sobre o princípio conhecido, atualmente, como Indústria 4.0 (VACHALEK *et al.*, 2017).

O gêmeo digital é uma ideia inovadora que apresenta uma representação digital dinâmica, o que permite às empresas entender, prever e otimizar o desempenho de suas máquinas e seus negócios, (LUO *et al.*, 2019), de modo a prever e organizar a manutenção e o gerenciamento do ciclo de vida, de forma eficiente (ZOBEL-ROOS *et al.*, 2019). Essa tecnologia refere-se ao processo de descrever e modelar as características, comportamento e desempenho da entidade física, por meio da tecnologia digital (LIU, J. *et al.*, 2019a).

Como mencionado, há várias definições sobre o gêmeo digital que variam conforme os autores, considerado por eles como: um protótipo virtual completo de um sistema inteiro que pode refletir, em tempo real, todo o ciclo de vida do dispositivo ou do produto físico (LUO *et al.*, 2019); no campo da engenharia, consiste em um artefato particular e um modelo de computador que reflete, com precisão, o estado do artefato (BRUYNSEELS; DE SIO; VAN DEN HOVEN, 2018); um mapeamento real de todos os componentes do ciclo de vida do produto, utilizando dados físicos, virtuais e de interação entre eles (TAO *et al.*, 2019a).

Porém, o conceito mais consolidado é o de um modelo virtual (ZHUANG; LIU; XIONG, 2018; NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017; TAO *et al.*, 2019a; SCHLUSE *et al.*, 2018; LUO *et al.*, 2019; ZOBEL-ROOS *et al.*, 2019; TAO *et al.*, 2018a), réplica de um modelo físico (SCHLUSE *et al.*, 2018; HE; GUO; ZHENG, 2018; ZHAO *et al.*, 2019; ZOBEL-ROOS *et al.*, 2019) correspondente no mundo real.

Para a presente pesquisa, a definição utilizada como base é a do Stark e Damerau (2019, p.1).

Um gêmeo digital é uma representação digital de um produto único ativo (dispositivo real, objeto, máquina, serviço ou ativo intangível) ou sistema exclusivo de serviço de produto (um sistema que consiste em um produto e um serviço relacionado) que compreende suas características, propriedades, condições selecionadas, e comportamentos por meio de modelos, informações e dados dentro de um único ou mesmo em várias fases do ciclo de vida.

Na figura 6, é possível observar uma nuvem de palavras com as diversas definições de um gêmeo digital, encontradas na base da pesquisa. A nuvem de palavras mostra, visualmente, as palavras-chave sobre o tema, sendo as palavras de maior destaque: modelo, dados e físico.



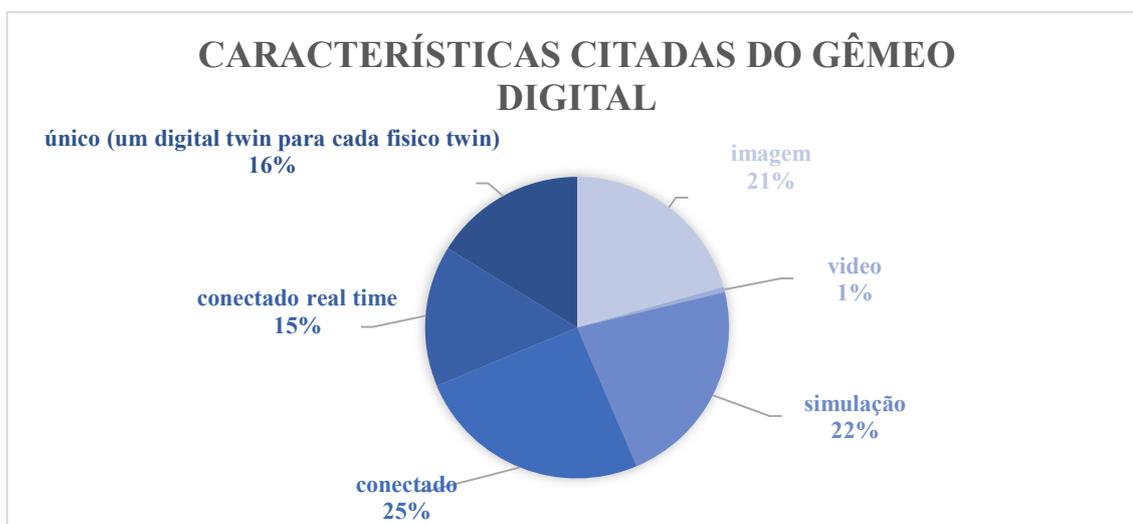
são integrados e a auto decisão pode ser feita com base em seus dados de mapeamento, em tempo real, em todo o ciclo de vida (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017; SÖDERBERG *et al.*, 2017; ZHAO *et al.*, 2019; LUO *et al.*, 2019; LU; XU, 2019; TAO *et al.*, 2018a; EL SADDIK, 2018; ZHUANG; LIU; XIONG, 2018; TUEGEL *et al.*, 2011; SCHLUSE *et al.*, 2018; ALAM; EL SADDIK, 2017).

Em comparação com os sistemas tradicionais de simulação (como CAD 2D ou CAD 3D), o gêmeo digital fornece modalidades mais sensoriais e mais rigorosas, assim como integra uma análise de dados mais inteligente e de visualização do produto, além de interações mais amigáveis. O gêmeo digital pode, assim, não apenas entender e prever o desempenho de máquinas e sistemas de forma mais precisa, mas também otimizar as operações de negócios para fornecedores de equipamentos e consumidores (HE; GUO; ZHENG, 2018).

Dessa forma, as características do gêmeo digital podem ser resumidas nos seguintes tópicos: (1) resposta em tempo real, (2) interação e convergência (integração completa do fluxo total e do serviço completo conectados entre si) e (3) auto evolução, uma vez que eles podem atualizar dados em tempo real, de modo a melhorar, continuamente, os modelos, por meio da comparação do espaço virtual com o espaço físico (TAO *et al.*, 2018b).

A figura 7, a seguir, representa um gráfico com as características mais citadas na amostra dos artigos estudados que definem um gêmeo digital .

Figura 7 – Gráfico das características mais citadas pelos artigos estudados que definem gêmeo digital

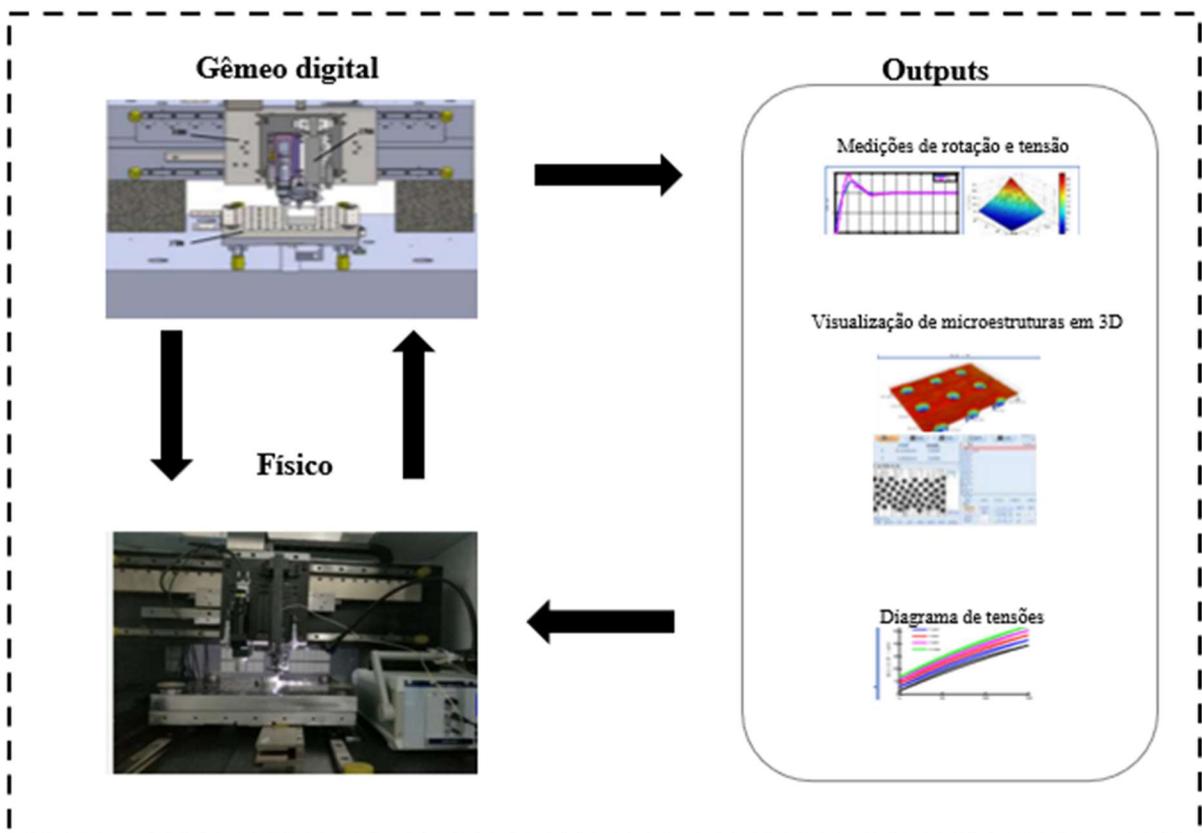


Fonte: Elaboração própria.

Faz-se ainda necessário comentar sobre a questão da convergência do mundo físico com sua contrapartida digital, em que o mundo digital deve espelhar com precisão o mundo físico, o que gera um volume, sem precedentes, de dados a serem tratados pela representação digital (WEYER et al., 2016) de forma a gerar exatidão nos resultados obtidos. A parte virtual não somente registra os desempenhos históricos do físico, mas também realiza otimizações e previsões, enquanto a parte física fornece suas propriedades, comportamentos e regras para tornar o espelho virtual calibrado e evoluído, continuamente (TAO; ZHANG, 2017).

Para melhor compreender o gêmeo digital, pode-se citar aqui dois exemplos de sua aplicação: 1) aplicação do gêmeo digital em um sistema de micropuncionamento (figura 8) que utiliza cerâmicas piezoelétricas e que visa detectar e controlar, de forma online, o sistema, com alta exatidão e velocidade, além da otimização do processo com base na análise de erros (ZHAO et al., 2019).

Figura 8 – Gêmeo digital aplicado no processo de micropuncionamento



Fonte: Adaptado de Zhao et al. (2019).

Conforme visto na figura 8, o gêmeo digital é composto pela conexão online entre a máquina física e a digital, na qual cada operação gera a leitura da rotação, tensão, microestrutura em 3D e a medição, em milésimos de milímetros. Nessa aplicação, pode-se perceber que o gêmeo digital melhorou velocidade da operação e a exatidão das medidas da peça na operação de punçionamento, conforme apresentado, em números, na tabela 1.

Tabela 1 – Métricas sobre o funcionamento do gêmeo digital

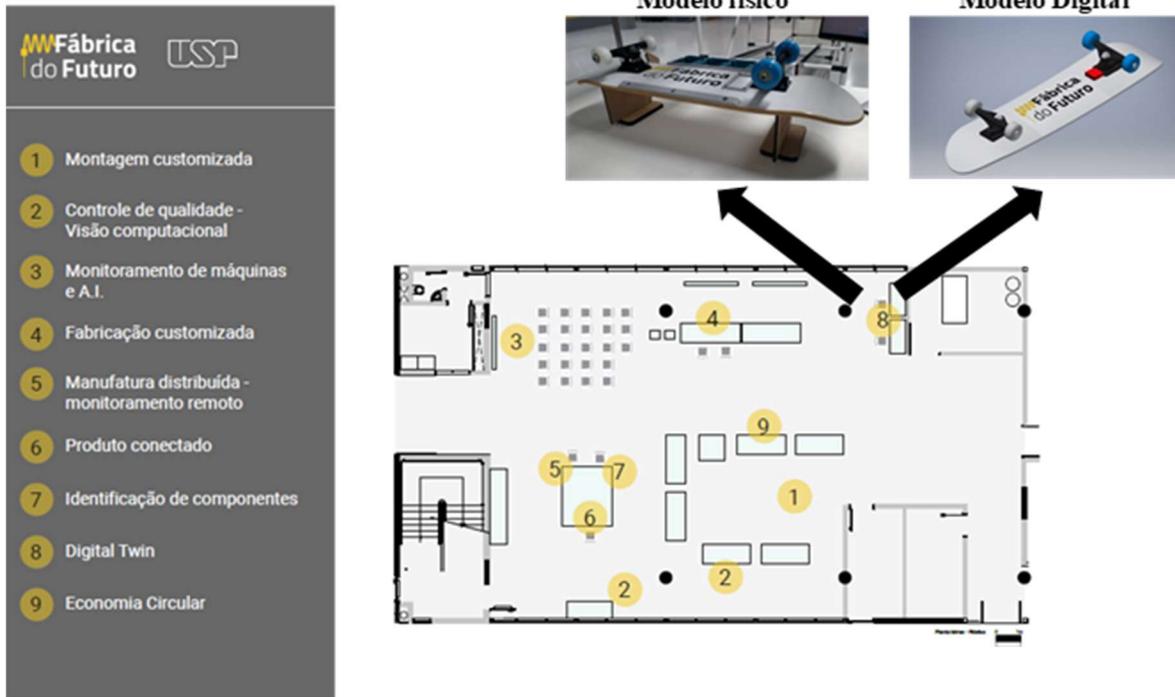
| Métricas   | Processo Convencional           | Processo com o gêmeo digital    |
|--|---------------------------------|---------------------------------|
| <b>Medida do eixo Z (mm)</b>                                 | 8                               | 8                               |
| <b>Acuracidade do eixo Z (<math>\mu\text{m}</math>)</b>      | $\pm 0,5$                       | $\pm 0,4$                       |
| <b>Tolerância XYZ</b>  | $\pm 5\mu\text{m}/200\text{mm}$ | $\pm 2\mu\text{m}/200\text{mm}$ |
| <b>Velocidade da punção (pontos/segundo)</b>                 | 20~40                           | 20~65                           |
| <b>Exatidão da posição (<math>\mu\text{m}</math>)</b>        | $\pm 1$                         | $\pm 1$                         |
| <b>Profundidade da perfuração (<math>\mu\text{m}</math>)</b> | 2~9                             | 2~8                             |

Fonte: Adaptado de Zhao *et al.* (2019).

Na tabela 1 pode-se observar que as métricas com o gêmeo digital no processo melhoraram em relação ao processo convencional, destacando-se o aumento da velocidade em pontos por segundo e a melhora da tolerância XYZ e na acuracidade do eixo Z. A melhora é resultante do mapeamento e comparação da velocidade e das medidas da peça real durante o processo de usinagem, sendo que o gêmeo digital direciona o processo através das medidas iniciais e as tolerâncias para a usinagem e, após a usinagem, as medidas são atualizadas no gêmeo digital conforme o resultado e real do processo de usinagem na peça.

Outro exemplo é a aplicação do gêmeo digital na fábrica de aprendizagem (*Learning Factory*), da Universidade de São Paulo (USP), em conjunto com a aplicação do sistema PLM. O sistema é voltado ao aprimoramento do produto exemplificado por um skate conforme a figura 9 e 10.

Figura 9 – Gêmeo digital da Fábrica do Futuro da USP



Fonte: Adaptado de USP (2020).

Figura 10 – Exemplo de medições realizadas pelo gêmeo digital da Fábrica do Futuro da USP



Fonte: Durão *et al.* (2020).

Nessa aplicação, o skate físico e o digital estão conectados por sensores em tempo real, com o objetivo de obter as informações de velocidade, distância e vibração de diferentes fases do ciclo de vida. Essa medição também pode ser realizada, durante a utilização do produto, pelo

usuário que busca gerar um banco de dados com informações de base, para otimizações futuras do processo e do produto (DURÃO *et al.*, 2020).

### **3.2.2 Estruturação**

O gêmeo digital é composto por conexões entre os modelos físico e virtual que realizam a integração dos modelos e enfatizam a convergência, comunicação e colaboração entre esses modelos. Essa conexão também é conhecida como camada de processamento de informações que realiza o mapeamento bidirecional e interoperação do espaço físico e espaço virtual. Para tanto, existem três módulos de funções principais dessa camada: armazenamento, processamento e mapeamento de dados (ZHENG; YANG; CHENG, 2019).

Devido às tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, a sincronização entre as partes do modelo vem melhorando progressivamente (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017; TAO *et al.*, 2019; LUO *et al.*, 2019). O uso da infraestrutura em nuvem está se tornando, cada vez mais, comum em nosso dia a dia e a integração dos gêmeos digitais com essa infraestrutura representa uma ligação entre a camada física e a camada de aplicação de sistemas físicos cibernéticos. Como consequência, o design, a reconfiguração e o conhecimento da aplicação de sistema físico cibernético (CPS) tornam-se, inerentemente, escaláveis (ALAM; EL SADDIK, 2017). Outro contribuinte é o grande volume de dados que podem ser analisados por um sistema escalável de análise *big data* para um eficiente relatório, em tempo real (LU; XU, 2019).

Ademais, tanto o módulo de simulação integrado com o gêmeo digital, quanto o módulo de tomada de decisão responsivo são dependentes do módulo de processamento de dados em tempo real (DING *et al.*, 2019). Por isso, a conexão e a sincronização são as pontes para a obtenção de um resultado eficaz e exato do gêmeo digital.

### **3.2.3 Simulações**

Como apontado anteriormente, gêmeos digitais são caracterizados por sua capacidade de simular eventos com exatidão em diferentes escalas de espaço e tempo. Para isso, eles não se baseiam apenas no conhecimento de especialistas (e.g. uma simulação física avançada), mas também podem coletar dados de todos os sistemas implantados de seu tipo e, assim, agregar a experiência adquirida no campo (GABOR *et al.*, 2016).

Assim, o gêmeo digital consiste em uma representação virtual de um sistema de produção que é capaz de executar diferentes disciplinas de simulação, caracterizada pela sincronização entre o sistema virtual e real, devido a dados coletados, dispositivos inteligentes conectados, modelos matemáticos e a elaboração de dados em tempo real (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017), o que justifica o fato de a simulação no sistema ser um tópico de extrema relevância.

A combinação dos dados da vida real com os modelos de simulação do *design* permite, do outro lado, boas previsões, com base em dados realistas. Isso implica em oportunidades de uso de simulação para sistemas de assistência, ou seja, pode apoiar operadores e planejadores, durante a operação normal, bem como a manutenção e serviço, por previsão. O conceito de gêmeo digital, portanto, permite tal procedimento, pois todos os dados estão disponíveis em um único ambiente consistente e bem alinhado (ROSEN *et al.*, 2015).

Diferente da arquitetura tradicional de simulação, o gêmeo digital é usado como uma ferramenta de validação para a solução da otimização geral do ciclo de vida, em vez de apenas exibir a visualização da simulação, eventos aleatórios ou apenas documentar os resultados (LENG *et al.*, 2019a). Com isso, ele possibilita a aplicação de algoritmos de otimização e de modelos matemáticos ágeis, garantindo uma maior quantidade de dados disponíveis para controle e otimização de produtos e sistemas (SÖDERBERG *et al.*, 2017). Além disso, os programas de otimização podem ser gerados de forma eficiente e a análise inteligente de fabricação cibernética pode dar orientações valiosas sobre pontos de melhoria (LENG *et al.*, 2019a).

Geralmente, o gêmeo digital é habilitado por computação altamente desenvolvida, simulação de alta exatidão e tecnologia de inteligência artificial em rápido desenvolvimento. Assim, impulsionado por modelo alta fidelidade (que integra diferentes assuntos como temas mecânicos, elétricos, hidráulicos e de controle), o gêmeo digital pode conectar várias atividades de produtos, resultando em um modelo consistente que suporta o projeto, produção, operação, manutenção e estágio de ciclo de vida da reciclagem.

O gêmeo digital também traz aprendizado de máquina baseado em dados exatos, na experiência e no conhecimento de domínio que podem ser expressos pelo modelo de algoritmo. Além de atuar como um mapeamento virtual de produtos físicos, ele se conecta com a entidade e obtém dados do mundo físico. Podendo, assim, manter-se consistente com o mundo físico,

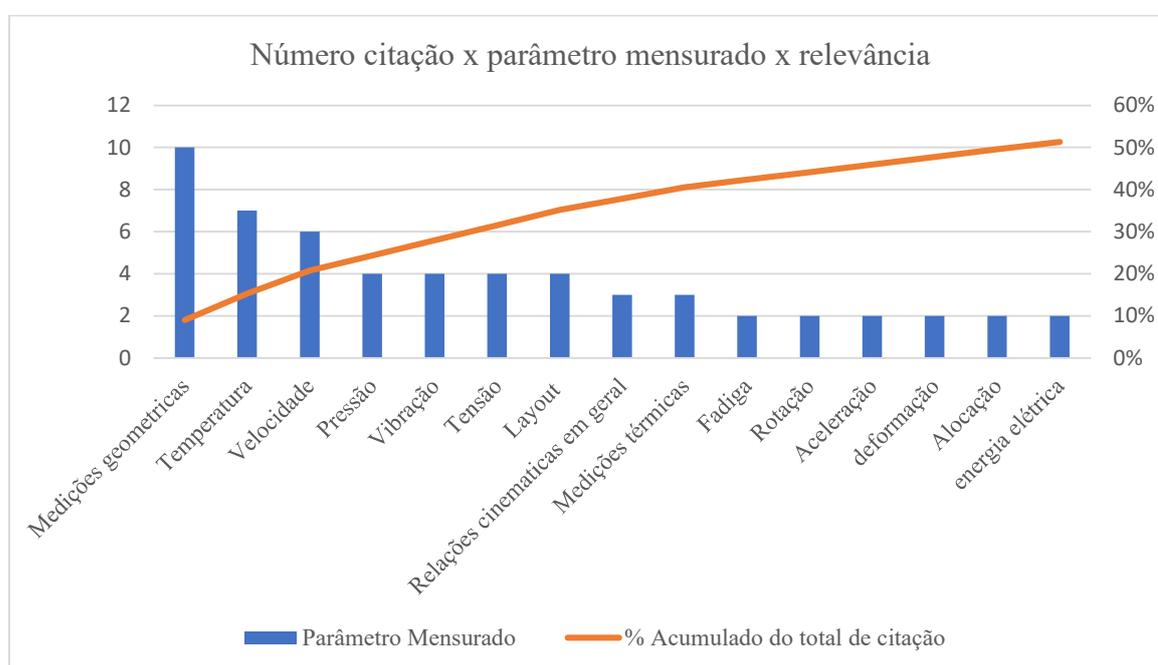
por meio da atualização dinâmica que pode realizar previsões, assim como tomar decisões, de acordo com a análise dos dados históricos e atuais (LUO *et al.*, 2019).

Por fim, o gêmeo digital pode ser construído considerando os seguintes três níveis: elemento, comportamento e regra (ZHUANG; LIU; XIONG, 2018). Para se obter a regra, é necessário a definição de métodos para conectar e fundir todos os modelos, ou seja, uma premissa de construção de um gêmeo digital, uma vez que métodos como rede complexa e multiagente podem ser aplicados para resolver o problema, porém também devem ser aplicados para validar e testar a exatidão dos modelos (ZHUANG; LIU; XIONG, 2018).

#### **3.2.4 A aplicação**

O primeiro passo da implementação do gêmeo digital é decidir qual será a aplicação do gêmeo digital (para um produto ou para um serviço) e quais tipos de dados serão coletados (TAO; QI, 2019). Na figura 11, são apresentados quais foram os parâmetros mais mensurados e o valor acumulado da porcentagem relativa ao número de artigos estudados que citam aquele parâmetro para visualizar a relevância do parâmetro perante o total dos artigos estudados, sendo que na figura 11 somente os cinquenta por cento mais relevantes foram considerados.

Figura 11 – Parâmetros mais mensurados dentro dos artigos estudados e a relevância do mesmo para o tema



Fonte: Elaboração própria.

Um gêmeo digital de alta fidelidade para o equipamento deve ser construído em diferentes níveis de características (geométricas, físicas, comportamentais ou até mesmo regras que influenciam ao gêmeo ou ao ambiente ao seu redor). Um dos aspectos mais desafiadores para a construção do *design* individualizado digital, baseado em gêmeos, é a sincronização, em tempo real, e a resolução de problemas de otimização multiobjetivo (ZHANG *et al.*, 2017a). Para a geração desse *design* digital do sistema em fase de pré-produção, o gêmeo digital mescla uma modelagem de sistema física e simulação distribuída, com o intuito de fornecer recursos de análise de soluções de engenharia (LIU, Q. *et al.*, 2019). O processo pode ser estruturado em *design* conceitual, detalhado e verificação virtual (TAO *et al.*, 2018b), etapas essenciais para a constituição de um gêmeo digital fidedigno. Para esta pesquisa, a definição de *design* utilizada é a de concretização de uma ideia, em forma de concepção de um produto, modelo ou projeto.

Há vários pontos a serem analisados, na coleta de dados, antes da implementação de um gêmeo digital:

- a) taxa de coleta de dados (TAO; QI, 2019), já que a medição é um dos pontos essenciais para o desempenho do sistema, pois dados sobressalentes não devem ser coletados sem

necessidade. Além disso, dados ausentes ou errôneos podem distorcer resultados e ocultar falhas;

- b) Definir os métodos de planejamento, simulações e otimização que ocorrerão nos sistemas, uma vez que simulações para otimizar, continuamente, o comportamento do sistema são produzidas, por meio de uma estrutura de arquitetura de *software* baseada no fluxo de informações entre o sistema cibernético, seu ambiente físico e o modelo gêmeo digital (GABOR *et al.*, 2016);
- c) estudar a melhor estrutura sistemática para a coleta e conexão dos dados em tempo real, pois é por meio do *feedback* que se pode visualizar os *outputs* do gêmeo digital, para, assim, se obter um monitoramento transparente, além de servir como suporte de dados para futuras otimizações (ZHANG *et al.*, 2017a);
- d) verificar os resultados otimizados do modelo, traduzi-lo em instruções e, em seguida, distribuí-las a todos os controladores do sistema, possibilitando a retroalimentação dos resultados, o acúmulo de conhecimento e o registro de estatísticas do efeito de implementação, assim como o equilíbrio da operação e dos processos. Tudo isso irá melhorar, continuamente, o desempenho geral do sistema (LENG *et al.*, 2019a);
- e) caso a estrutura desenvolvida seja no chão de fábrica, ela precisa representar, explicitamente, todas as informações essenciais de todos os recursos de fabricação em uma fábrica para que os gêmeos digitais desenvolvidos possam ser, facilmente, inferidos por sistemas de linguagens de programação de alto nível que apoiarão na tomada de decisões auto-organizadas em um estágio posterior (LU; XU, 2018).

Outro importante item a ser analisado na implementação é o fato de que o modelo de algoritmo consiste, principalmente, em banco de dados, base de conhecimento, mecanismo de controle e serviços inteligentes que podem ser impulsionados por *machine learning*. Dessa forma o gêmeo digital pode se tornar um equipamento inteligente, atuando em habilidades precisas de simulação com auto: percepção, ajuste, previsão e avaliação, acarretando em uma produção inteligente de resultados (LUO *et al.*, 2019; TAO; ZHANG, 2017).

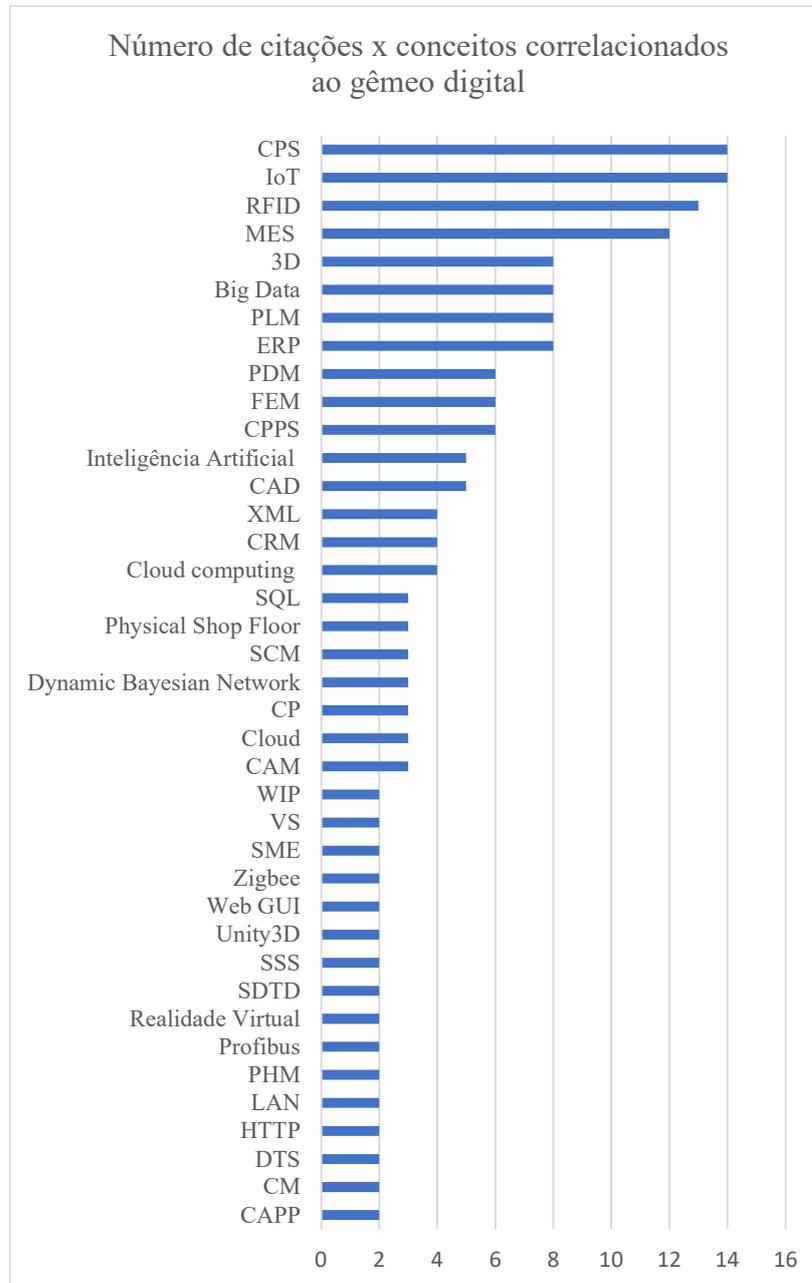
Para fundir os dados, de forma eficaz e precisa, existem algumas regras a serem estudadas e seguidas: (1) regras de associação entre os modelos físicos e os modelos geométricos; (2) de evolução das peças de trabalho – que refletem com exatidão todas as informações da rota de processamento e (3) de operação do modelo físico. Essas regras garantem que o mecanismo operacional do modelo de processo digital, baseado em gêmeos,

corresponda às situações reais e simule, precisamente, o comportamento do *status* de fabricação física (LIU, J. *et al.*, 2019a).

Em suma, para uma implementação do sistema gêmeo digital, este deve ser composto por um modelo de entidade física, de equipamento virtual, de serviços (para garantir a alta fidelidade do modelo virtual, por meio da calibração dos parâmetros), de dados e de conexão.

Alguns sistemas e conceitos estão sendo utilizados, atualmente, em conjunto com o gêmeo digital. Os mais utilizados dentre a amostra de artigos selecionados foram representados e detalhados na figura 12, em que foi citado o conceito relacionado ao gêmeo digital.

Figura 12 – Conceitos e sistemas correlacionados ao gêmeo digital



Fonte: Elaboração própria.

Após a implementação do gêmeo digital, é importante focar na melhoria contínua do sistema. Para tanto, é necessária a contínua compreensão dos problemas-chave e a realimentação do mapeamento da modelagem matemática para aumentar a exatidão dos resultados. É necessário também recordar que a aplicação do gêmeo digital não só traz uma vantagem quantitativa na exatidão de teste ou detecção de falhas, mas também apresenta uma vantagem qualitativa única, no que diz respeito à otimização e algoritmos de planejamento (GABOR *et al.*, 2016).

### **3.2.5 Áreas de aplicação**

Existem especificidades de aplicação para cada área aplicada. Será abordado, a seguir, algumas delas:

#### **3.2.5.1 Aeroespacial**

Considerando o setor aeroespacial ser de origem do tema, foram identificadas várias vantagens na aplicação do gêmeo digital como: encurtamento dos tempos de desenvolvimento, redução de custos e melhoria da segurança, confiabilidade e usabilidade (PATTERSON; WHELAN, 2017).

A Força Aérea dos Estados Unidos da América na base aérea de *Wright-Patterson*, em Ohio, vem investigando o conceito de gêmeo digital, de modo a fundir múltiplas fontes heterogêneas de informações de modelos e dados, para apoiar decisões proativas de sustentação da frota, possibilitando, assim, avaliar a variação do histórico de carga e outras fontes de incerteza, como a epistêmica referente aos verdadeiros valores das propriedades geométricas ou materiais (LI *et al.*, 2017).

Outros pontos de atuação do gêmeo digital nessa área são: no monitoramento do *status* de espaçonave, conforme utilizado pela NASA (TAO; QI, 2019) e na prevenção da vida útil da estrutura da aeronave, para garantir sua integridade estrutural (TUEGEL *et al.*, 2011). O gêmeo digital também pode ser utilizado, virtualmente, nos voos, uma vez que ele prevê as necessidades de manutenção e reduz custos de reparo da aeronave conforme o passar do tempo. Em outras palavras, o gêmeo digital é útil, não somente para prever reparos e substituir peças, mas também para o controle de configuração de aeronaves individuais (TUEGEL *et al.*, 2011).

#### **3.2.5.2 Gerenciamento do ciclo de vida do produto**

Com as características incluídas de gêmeo digital, especialmente quanto à ligação síncrona e a alta fidelidade, seja no produto físico interpolado ou no produto virtual correspondente, o gêmeo digital tem alto potencial para resolver problemas existentes no

gerenciamento do ciclo de vida do produto (TAO *et al.*, 2018b). Assim, a integração da entidade física e virtual permitem decisões específicas de contexto, durante o ciclo de vida da entidade (DING *et al.*, 2019).

### **3.2.5.3 Impressão 3D**

Mukherjee e Debroy (2019) relatam que uma réplica digital da máquina de impressão em 3D tem a capacidade de reduzir o número de testes, defeitos e erros na trajetória de obtenção dos atributos desejados do produto, assim como o tempo necessário entre o projeto e a produção, tornando os componentes impressos mais econômicos. Outro ponto ressaltado pelos autores foi fato de que um gêmeo digital abrangente da máquina de impressão 3D é composto por modelos mecanicistas, de controle e estatísticos de impressão 3D; *machine learning* e *big data*, podendo, assim, reduzir o volume de testes de tentativa e erro e defeitos, encurtando o tempo entre o projeto e a produção.

### **3.2.5.4 Automobilística**

Um dos casos relatados sobre a aplicação na área automobilística foi o construído pela empresa TESLA conforme ZHANG *et al.* (2017a). Esse projeto visa desenvolver um gêmeo digital para cada carro construído e, assim, permitir a transmissão síncrona de dados entre o carro e a fábrica. Para tanto, a empresa Dassault se tornou uma parceira de desenvolvimento, voltada para o desempenho do *design* do produto (ZHANG *et al.*, 2017a).

### **3.2.5.5 Biológica**

A projeção de uso do gêmeo digital é almejada na área biológica, pois os modelos validados combinados com seus conjuntos de dados do mundo real poderiam evoluir para se tornarem gêmeos digitais de sistemas biológicos particulares a subpopulações específicas ou mesmo indivíduos (PATTERSON; WHELAN, 2017). Possibilitando assim, uma expansão nas áreas de aplicação atuais e trazendo mais inovação aos estudos biológicos.

### 3.2.5.6 Manufatureira

No ramo da manufatura, há diversos tipos de indústrias como a metalurgia, conforme figura 13. Na metalurgia, por exemplo, a proposta é utilizar o gêmeo digital para obter dados importantes, como de temperatura transitória, geometria de piscina derretida, variações temporais e espaciais das taxas de resfriamento e parâmetros de solidificação. Assim, o gêmeo digital torna-se um recurso para construir e validar, rigorosamente, o processo de fabricação aditiva e fornecer previsões precisas das variações espaciais e temporais dos parâmetros metalúrgicos que afetam a estrutura e as propriedades dos componentes (KNAPP *et al.*, 2017).

Há também a aplicação do modelo digital, voltado para as informações geométricas e o *status* do equipamento de processo, em tempo real, na indústria mecânica, especificamente para o processo de usinagem (LIU, J. *et al.*, 2019b). A expectativa do ramo de atividades é a de que as máquinas-ferramentas virtuais serão úteis para simular os recursos das máquinas-ferramentas físicas, de forma segura e econômica. Ademais, caso houver uma quebra ou falha de ferramenta, os engenheiros conseguirão retornar e verificar os traços digitais da máquina virtual e prover, assim, o diagnóstico e prognóstico. Um grande desafio nessa área é emular, com exatidão, o comportamento das ferramentas físicas (CAI *et al.*, 2017). Desafio este que pode ser contornado pela correta aplicação do gêmeo digital.

Outro ramo da aplicação do gêmeo digital, dentro da manufatura, é no chão de fábrica, pois a aplicação fornece, ao sistema de fabricação virtual, um meio útil para que os produtos sejam fabricados “logo na primeira vez” e reduza, paralelamente, a necessidade de inúmeros testes físicos no chão de fábrica (CAI *et al.*, 2017). Isso não é somente uma demanda imperativa da fabricação inteligente, mas também uma tendência em evolução de si mesma (TAO; ZHANG, 2017).

Assim, além de realizar alocações de recursos de fabricação e sequenciamento de máquinas (DING *et al.*, 2019); simular, compreender e visualizar o processo de fabricação, com base nos dados de fabricação percebidos, o gêmeo digital também tem a capacidade de controlar, prever e otimizar o desempenho do processo de fabricação, por meio do processo inteligente de análise e tomada de decisão, habilitado por bases de conhecimento dinâmicas e habilidades inteligentes, baseadas no conhecimento aplicado pela tecnologia (ZHOU *et al.*, 2020; TAO *et al.*, 2018b). As aplicações em tempo real formam uma estratégia vital para melhorar a flexibilidade de produção e a eficiência do chão de fábrica (DING *et al.*, 2019).

Segundo Tao *et al.* (2018b), existe um conceito, ainda dentro da aplicação no chão de fábrica, sobre a Célula de Fabricação de Gêmeos Digitais (KDTMC), voltado às capacidades de tomada de decisão, execução e aperfeiçoamento automatizados do processo. Para sua aplicação, é importante o uso das bases dos sistemas embarcados no nível da fábrica até as operações, uma vez que formam a base de *input* de dados para o gêmeo digital das fábricas (UHLEMANN *et al.*, 2017). A partir disso, a base atuará para compor os Dados dos Gêmeos Digitais do Chão de Fábrica (SDTD) que, conceitualmente, já atuam junto com o Chão de Loja Físico (PS), Chão de Loja Virtual (VS), Sistema de Serviço de Chão de Loja (SSS) (TAO *et al.*, 2018b), com o objetivo de aumentar a transparência na produção de sistemas e facilitar o controle de produção em tempo real (DING *et al.*, 2019).

### **3.2.5.7 Armazenagem**

Na área de armazenagem, o gêmeo digital pode agregar dados em tempo real do sistema de serviço de produto de armazém físico e, em seguida, mapeá-los para o modelo cibernético e otimizar, oportunamente, a atribuição da embalagem e a escolha do lugar a ser utilizado para o empilhamento do produto. Os dados podem ser acessados pelo sistema de serviço de armazém integrado, em conjunto com o gêmeo digital (LENG *et al.*, 2019a).

### **3.2.5.8 Saúde**

Novas abordagens de engenharia com a atenção à saúde se baseiam em modelos digitais dinâmicos e de alta resolução de aspectos genéticos, bioquímicos, fisiológicos e comportamentais de pessoas individuais. Essas abordagens podem ser aplicadas a conceitos centrais dos debates atuais sobre cuidados de saúde, como doença, cuidados preventivos e aprimoramento.

Em vez de esperar por respostas de intervenções médicas, os modelos digitais prometem se adequar às respostas antecipadas de cada paciente (BRUYNSEELS; DE SIO; VAN DEN HOVEN, 2018). Para ampliar a aplicação de prognósticos e gestão da saúde (PHM), os desafios incluem, principalmente: (1) construir espelhos digitais de alta fidelidade para equipamentos complexos, com diferentes propriedades e comportamentos; (2) processar grande quantidade de dados gêmeo digital e (3) equilibrar os custos e benefícios do gêmeo digital (TAO *et al.*,

2018a). Porém, a medicina baseada em gêmeos digitais está longe de ser uma realidade ainda (BRUYNSEELS; DE SIO; VAN DEN HOVEN, 2018), uma vez que o conceito ainda está se consolidando no meio acadêmico.

### 3.2.5.9 Outras áreas

A fabricante britânica Rolls-Royce assinou um memorando de entendimento com universidades e outros institutos, com o objetivo de criar uma plataforma digital de código aberto para desenvolver novos navios. Já no Reino Unido, a Comissão Nacional de Infraestrutura sugeriu a construção de um gêmeo digital que unificaria, em todo o país, as informações de energia elétrica, água, ferrovia, comunicação, dados meteorológicos, demográficos e de transporte e, com os mapeamentos gerados pelo gêmeo digital, estabeleceria o conhecimento suficiente para responder as seguintes questões, de acordo *National Infrastructure Commission* (2017, p.61):

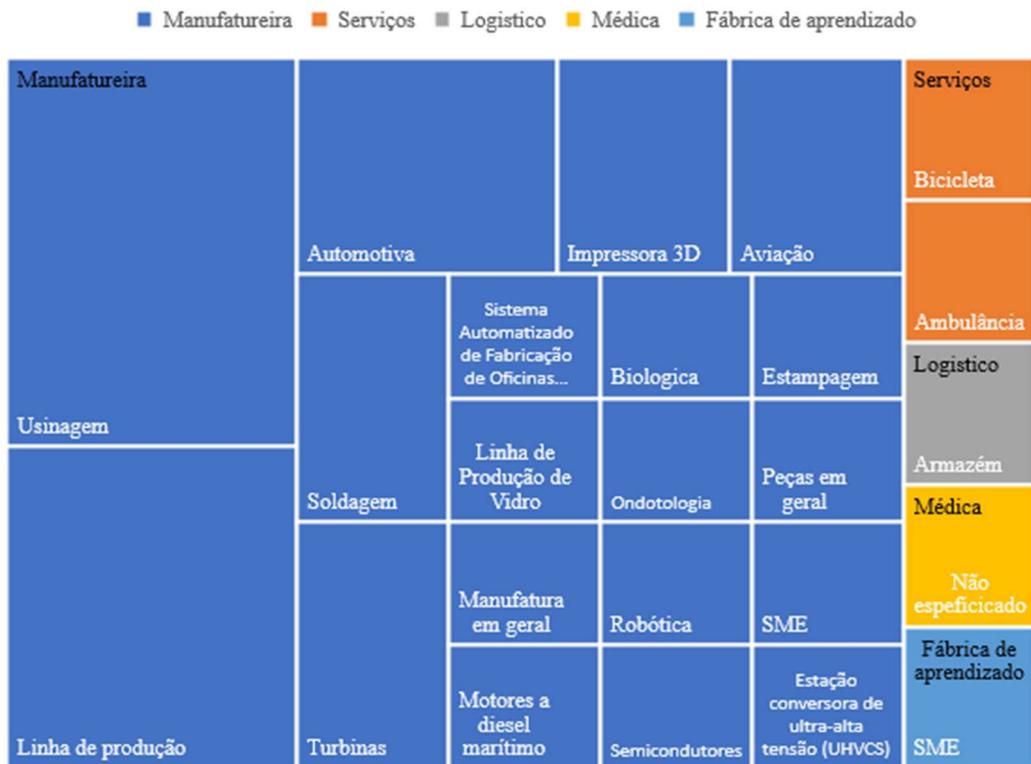
É possível evitar a construção de um novo estacionamento hospitalar gerenciando horários de consulta e fluxos de tráfego? Como o consumo de energia pode ser reduzido em 10% por pessoa ao longo de seis meses? Qual é o impacto de fechar uma estrada específica em caso de vazamento de água?

Uma das respostas é prever desastres naturais e aumentar a resiliência face a ataques terroristas. Em Cingapura, por exemplo, há o desenvolvimento de uma cópia digital de toda a cidade para monitorar e melhorar os serviços públicos (NATIONAL INFRASTRUCTURE COMMISSION, 2017).

No campo da aeronáutica e astronáutica, a aplicação tem o objetivo de prever falhas e está voltada, principalmente, à fase de serviço e manutenção do produto (TAO *et al.*, 2018b). No ramo de turbina, as empresas de energia General Electric (GE) e Chevron utilizam o gêmeo digital para acompanhar as operações das turbinas eólicas (TAO; QI, 2019).

O mapeamento da figura 13 demonstra as áreas aplicadas em relação ao tipo de empresa na qual o gêmeo digital vem sendo aplicado. As áreas de aplicações que se destacaram foram as áreas manufatureiras, serviços, médica e de fábrica de aprendizado.

Figura 13 – Tipo de empresa x área aplicada



Fonte: Elaboração própria.

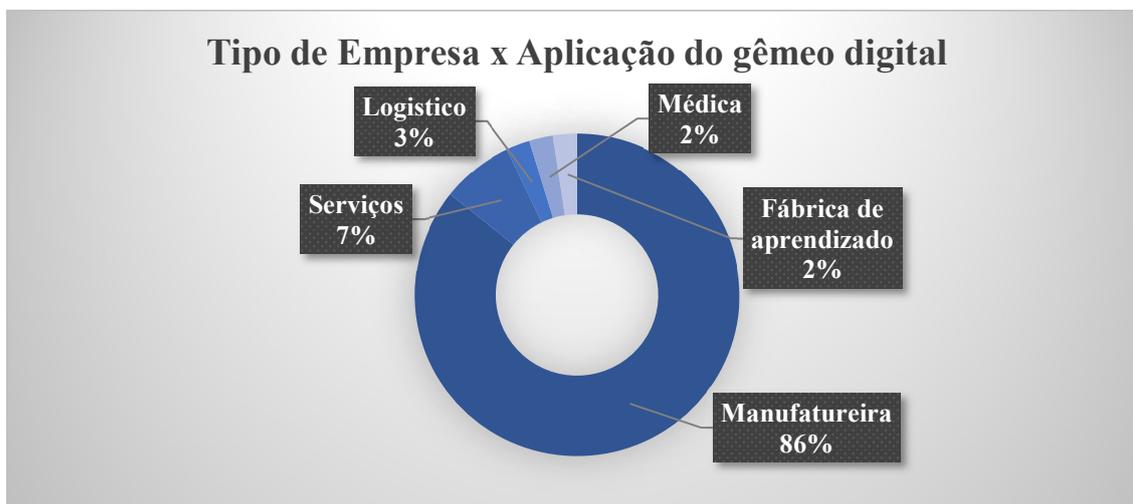
Na área manufatureira (azul escuro na figura 13), a subárea mais aplicada, nos artigos do escopo do trabalho, foi a usinagem, definida pela utilização de uma ou mais máquina-ferramenta, dentro de um processo fabril. Em segundo lugar, há a linha de produção, em que o gêmeo digital foi aplicado durante todo o processo de fabricação de um determinado produto.

Entre as outras subáreas, ressalta-se as áreas de manufatura e peças em geral, da qual os artigos não definiram se a aplicação é específica ou em toda a linha de produção, diferentemente das áreas de robótica e biológica, em que se foi especificado que a aplicação está voltada para a fabricação de produtos.

Dentre as aplicações das outras áreas, a área de serviços (em laranja na figura 13, representando 7% das aplicações, conforme a figura 14) é composta pela aplicação dos serviços de ambulância e bicicleta. Outras áreas, em que já existem estudos sobre a aplicação do gêmeo digital é a área médica (em amarelo na figura 13, representando 2% das aplicações, conforme a figura 14) e a área de fábrica de aprendizado (em azul claro na figura 13, representa 2% das

aplicações, conforme a figura) que aparece como suporte de estudo sobre o tema nas universidades. O percentual das áreas de aplicação do gêmeo digital é apresentado na figura 14.

Figura 14 – Percentual das áreas de aplicação da qual foram aplicado o gêmeo digital



Fonte: Elaboração própria.

A área de manufatura é a que mais aplica o gêmeo digital, representando 86% do total das áreas mapeadas pelos artigos estudados, seguida das áreas de serviço e logística (7% e 3%, respectivamente) como exemplificado na figura 14.

### 3.3 GERENCIAMENTO DO CICLO DE VIDA DO PRODUTO

O conceito de Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto (do inglês *Product Lifecycle Management* – PLM) surgiu, na década de 90, como uma extensão do Gerenciamento de Dados de Produtos (PDM) (STARK, 2011), desenvolvido para melhorar a gestão de dados e o conhecimento documentado para projetos de novos produtos, permitindo focar nas fases de projeto e produção de produtos (KIRITSIS, 2011).

Já o gerenciamento do ciclo de vida do produto tem como foco representar o ciclo de vida completo do produto, incluindo todas as informações e processos necessários para planejar, desenvolver, fabricar e apoiar o produto, desde sua concepção até o final de seu ciclo de vida, integrando pessoas, processos, sistemas de negócios e informações (LEE *et al.*, 2008).

O conceito do gerenciamento do ciclo de vida do produto evidencia a importância de um modelo de fabricação que não apenas fornece uma fonte de informação comum para apoiar

decisões de projeto, mas que se concentra nas competências principais do negócio, proporcionando, dessa forma, uma nova compreensão do produto pelo fabricante, com um modelo que pode ser atualizado para benefícios futuros (YOUNG *et al.*, 2007). Diferentes definições do gerenciamento do ciclo de vida do produto são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2 – Definições do gerenciamento do ciclo de vida do produto

(Continua)

| Autor                                 | Definição   |
|---------------------------------------|---|
| Sharma (2005)                         | Um conceito que visa integrar os diversos processos e fases envolvidos durante o ciclo de vida do produto, com base em processos de negócios horizontais, sem que haja uma única ferramenta ou pacote que possa descrever todo o gerenciamento do ciclo de vida do produto .  |
| Jun; Kiritsis; Xirouchakis. (2007)    | Uma nova abordagem estratégica para gerenciar as informações do ciclo de vida do produto, de forma eficiente, permitindo analisá-las para tomar decisões sobre várias questões.   |
| Chen <i>et al.</i> (2008)             | Uma abordagem estratégica de negócios que gerencia todas as etapas do ciclo de vida do produto.   |
| Lee <i>et al.</i> (2008)              | Um conceito que evidencia o gerenciamento de informações, ao longo de todas as etapas do ciclo de vida de um produto.   |
| Ming <i>et al.</i> (2008)             | Novo modelo estratégico de negócios construído para apoiar a criação colaborativa, gestão, divulgação e uso de ativos de produtos, incluindo dados, informações, conhecimento etc. e auxiliando na conceituação do fim da vida, integrando pessoas, processos e tecnologia.   |
| Rachuri <i>et al.</i> (2008)          | Uma abordagem estratégica para criar e gerenciar o capital intelectual da organização, desde a concepção inicial de um produto até sua descontinuidade de produção. Suporta o ciclo de vida do produto, modelando, capturando, manipulando e trocando informações.  |
| Alemanni <i>et al.</i> (2010)         | Uma extensão do PDM ( <i>Product Data Management</i> , gerenciamento de dados de produtos), representando o elo perdido entre o <i>Design Auxiliado por Computador (CAD)</i> , fabricação digital e simulação, e representando também o mundo virtual e interfaces com o sistema <i>Enterprise Resource Planning (ERP)</i> , apoiando o lado físico da fabricação moderna, ao longo da cadeia de suprimentos. |
| Kiritsis (2011)                       | Abordagem estratégica com três dimensões fundamentais: (i) acesso universal, seguro, gerenciado e uso de informações de definição de produto, (ii) mantém a integridade da definição do produto e (iii) mantém processos de negócios utilizados para criar, gerenciar, disseminar, compartilhar e usar informações.   |
| Marchetta; Mayer; Forradellas. (2011) | Conceito-chave para a indústria manufatureira, com o intuito de melhorar a qualidade do produto, o tempo de comercialização e os custos.  |

| Autor                            | Definição  |
|----------------------------------|--|
| Al-ashaab <i>et al.</i> (2012)   | Estratégia e técnica que auxilia as organizações a terem sucesso na indústria manufatureira, auxiliando a manter a pontualidade de dados do produto, validade, exatidão e rastreabilidade.   |
| Kubler <i>et al.</i> (2015a)     | Conceito abrangente que visa integrar o ciclo de vida do produto, incluindo pessoas, dados, produtos, processos, métricas etc.   |
| Zhao <i>et al.</i> (2015)        | Gerenciamento integrado de informações relevantes, ao longo do ciclo de vida do produto, desde a captura das necessidades do cliente, passando pelo projeto e engenharia do produto, fabricação, manutenção e serviço, até o mercado.                          |
| Bonou; Skelton; Olsen. (2016)    | Processo abrangente para todas as atividades de desenvolvimento de produtos, incluindo o planejamento estratégico, <i>design</i> e desenvolvimento orientados ao cliente, monitorando toda a atividade do ciclo de vida do produto.                            |
| Soto-Acosta <i>et al.</i> (2016) | Nova abordagem para informações de gerenciamento, ao longo do ciclo de vida do produto, permitindo que as organizações reduzam o tempo de comercialização dos produtos, bem como respondam a uma crescente demanda por qualidade e personalização de produtos. |

Fonte: Adaptado de Santos, Reis e Fleury (2020).

A necessidade e importância do gerenciamento de informações de produtos, durante todo seu ciclo de vida, aumentou, devido à sofisticação dos produtos, bem como regulamentações governamentais mais rigorosas para o gerenciamento desse ciclo de vida (FRÄMLING *et al.*, 2006). Como alternativa, o PLM é um sistema estratégico de negócios que permite uma comunicação eficaz entre diferentes grupos, em locais dispersos, possibilitando, assim, o compartilhamento de ideias e o acesso às informações e, logo, o desenvolvimento de novos produtos e processos (LEE *et al.*, 2008).

Em outras palavras, o sistema PLM não só fornece o gerenciamento de processos, mas também permite uma colaboração eficaz entre os participantes em rede na cadeia de valor do produto, o que o distingue de outros sistemas de aplicativos corporativos, como o Planejamento de Recursos Corporativos (ERP), Gestão da Cadeia de Suprimentos (SCM), Gestão de Relacionamento com o Cliente (CRM) etc. (MING *et al.*, 2008), com o objetivo de reduzir o tempo de comercialização do produto, melhorando, portanto, a funcionalidade do produto e aumentando a capacidade de personalização (SCHUH *et al.*, 2008). Nessas circunstâncias, novas tecnologias de desenvolvimento de sistemas PLM estão, cada vez mais, sendo empregadas para desenvolver sistemas PLM atraentes que proporcionarão mais satisfação aos clientes (SCHUH *et al.*, 2008).

### 3.3.1 Fases do gerenciamento de ciclo de vida do produto

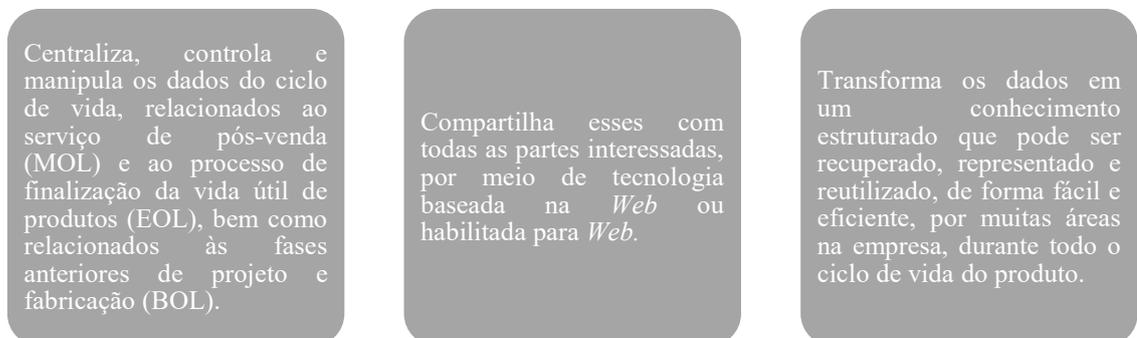
O ciclo de vida do produto consiste em três fases principais:

- a) Início da Vida (BOL) – *design* e fabricação;
- b) Meio de Vida (MOL) – uso, serviço, manutenção e distribuição (logística);
- c) Fim da Vida (EOL) – os produtos são recolhidos, desmontados, remanufaturados, reciclados, reutilizados ou descartados.

Durante a fase BOL, o fluxo de informações é bastante completo e suportado por sistemas de informação, tais como CAD, CAM, PDM, e sistemas de Gestão do Conhecimento (JUN *et al.*, 2009; CAO; FOLAN, 2011; KIRITSIS, 2011; CAO *et al.*, 2009). No entanto, o fluxo de informações torna-se vago ou não reconhecido após o BOL, exigindo *feedbacks* das informações relacionadas ao produto, como dados de uso do produto, e condições de descarte, para se obter informações que suportem as fases MOL e EOL.

Em um cenário em que as atividades das fases MOL e EOL têm visibilidade limitada das informações relacionadas ao produto (JUN; KIRITSIS; XIROUCHAKIS, 2007), o sistema PLM permite o gerenciamento, centralização e compartilhamento dos dados do ciclo de vida do produto com outros sistemas legados, assim como a transformação dos dados, de forma estruturada, para que eles possam ser recuperados e reutilizados de forma ágil e eficiente, conforme apresentado na figura 15.

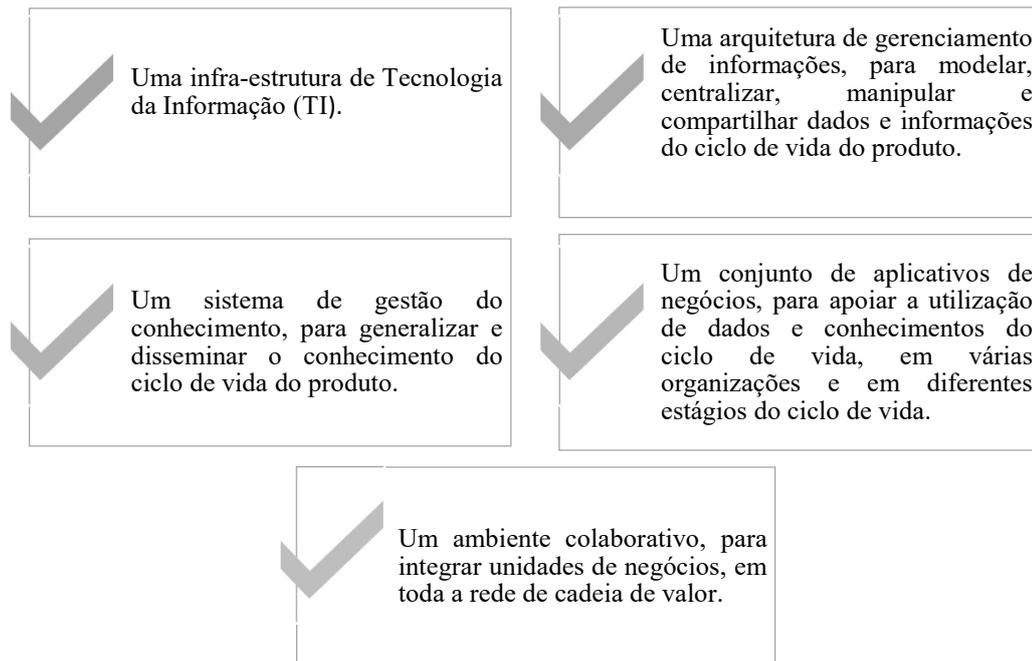
Figura 15 – Requerimentos do sistema PLM



Fonte: Adaptado de Cao *et al.* (2009).

O processo do gerenciamento do ciclo de vida do produto, geralmente, é composto por sistemas de informação, baseados em computador, que auxiliam na estratégia dentro das organizações. Os componentes em um sistema PLM incluem os itens evidenciados na figura 16.

Figura 16 – Componentes do sistema PLM



Fonte: Adaptado de Cao *et al.* (2009).

A ideia, portanto, é que as informações de MOL possam ser utilizadas também no EOL, com o objetivo de selecionar a opção EOL mais adequada (especialmente para planejar a remanufatura e reutilização), fornecendo *feedback* para o BOL e possibilitando uma melhoria na nova geração de produtos (DEMOLY; MATSOKIS; KIRITSIS, 2012).

Todas essas fases têm como objetivo minimizar os custos e o tempo gasto, uma vez que é a partir delas que se compreende os possíveis problemas, anteriormente aos processos de desenvolvimento e fabricação de produtos, melhorando, dessa forma, o desempenho da organização e utilizando tecnologia e suporte (SOTO-ACOSTA *et al.*, 2016). Cerca de 40% do tempo do engenheiro é gasto para estabelecer uma conexão entre as informações sobre os processos, com pesquisa e compartilhamento de informações. Nesse cenário, o uso correto do sistema PLM pode economizar pelo menos 50% desse tempo e o tempo economizado pode ser utilizado para desenvolver tarefas de maior agregação de valor (SOTO-ACOSTA *et al.*, 2016).

Ademais, a legislação ambiental, cada vez mais rigorosa, levou à busca de maior eficiência em todos as dimensões, incluindo todo o ciclo de vida do produto (CAO *et al.*, 2009).

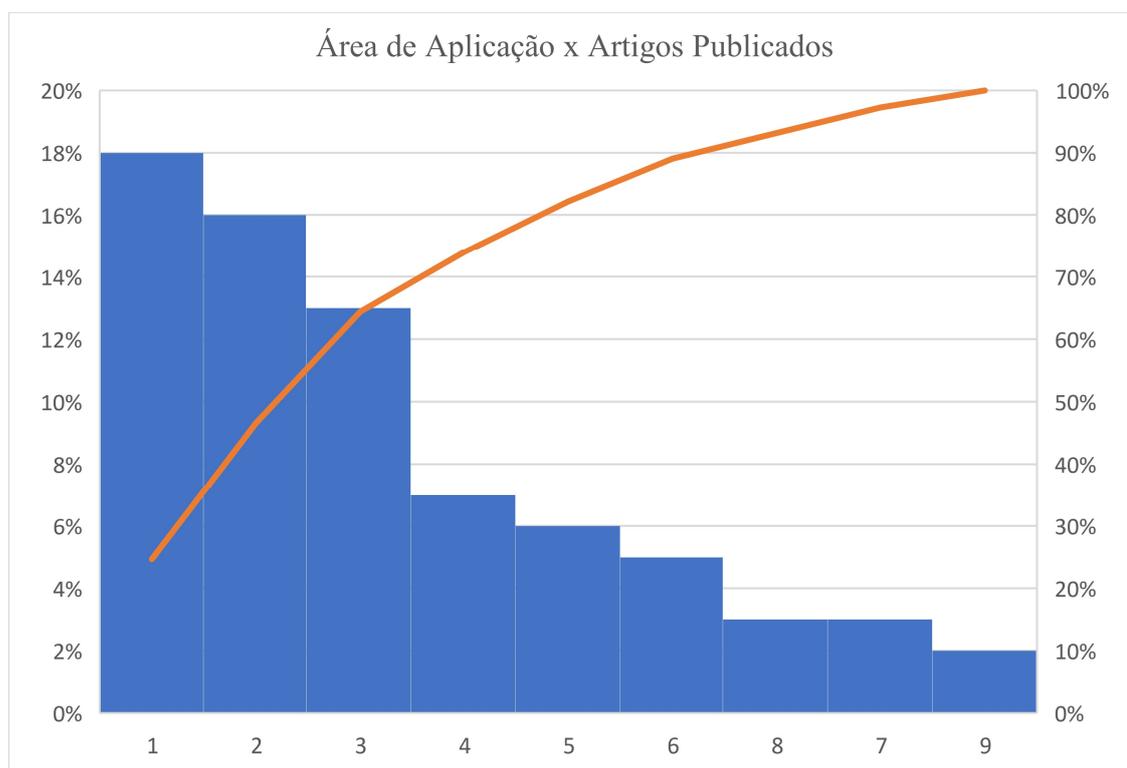
O sistema PLM também oferece uma gama de ferramentas para apoiar o negócio, incluindo a capacidade de gerenciar fluxos de trabalho, mas o aspecto central de um sistema PLM eficaz é a estruturação do banco de dados, garantindo que todos os usuários tenham acesso a um suporte efetivo de informações (YOUNG *et al.*, 2007). Para tanto, é necessário haver uma conexão entre os processos de *design* e análise de produtos com os processos de produção e cadeia de suprimentos, incluindo PDM, CSM, ERP, MES, CRM e outros (RACHURI *et al.*, 2008), já que o efeito de otimização do sistema PLM ocorre somente quando há o compartilhamento de conhecimento em todo o ciclo de vida do produto, ou seja, o desenvolvimento do sistema PLM é resultado da integração de muitos dados do ciclo de vida (ZHANG *et al.*, 2017b).

### **3.3.2 Aplicações do gerenciamento do ciclo de vida do produto**

Na aplicação do gerenciamento do ciclo de vida do produto, um grande desafio é entender as implicações do desenvolvimento e interoperação entre diferentes tipos de ambientes de informação e sistemas de ciclo de vida do produto (CHUNGOORA *et al.*, 2013) devido à dificuldade na integração entre os sistemas. Assim, há uma tendência na conversão de modelos já existentes em ontologias (existem diversos trabalhos sobre o tema (MATSOKIS; KIRITSIS, 2010), assim como a criação de novos modelos. Além disso, no setor automotivo e na indústria manufatureira, investimentos crescentes no campo do gerenciamento do ciclo de vida do produto têm sido observados, uma vez que esses setores enfrentam uma enorme pressão do governo sobre as regulamentações ambientais, mais especificamente, na redução de poluentes, como, por exemplo, o dióxido de carbono (TANG; QIAN, 2008).

Os artigos estudados na presente pesquisa foram classificados, conforme o campo de aplicação, evidenciado na Figura 17. No apêndice A, são apresentados mais detalhes da análise.

Figura 17 – Gráfico da área de aplicação X artigos publicados sobre o gerenciamento do ciclo de vida do produto



| Legenda | Área                               | Legenda | Área               |
|---------|------------------------------------|---------|--------------------|
| 1       | Aeroespacial                       | 6       | Área médica        |
| 2       | Ontologia                          | 7       | Áreas sustentáveis |
| 3       | Automotivo                         | 8       | IoT                |
| 4       | Pequenas e médias empresas (SME's) | 9       | Construção         |

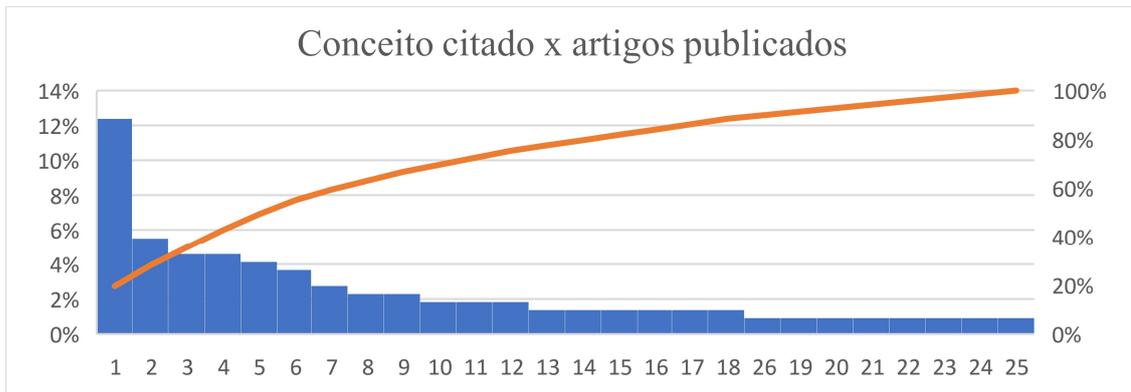
Fonte: Elaboração própria.

A figura 17 evidencia que a área de aplicação no setor aeroespacial foi a mais encontrada pelos autores em sua base de pesquisa, representando 18% em relação ao total, seguido das áreas de ontologia (2) e automotiva (3). Na análise final, as nove áreas encontradas e relatadas representam quase 100% do total das áreas de aplicação encontradas na base selecionada e estudada, conforme a aplicação do princípio de Pareto<sup>2</sup>, conforme pode ser visto no segundo eixo do gráfico.

As palavras-chave mais representativas do gerenciamento do ciclo de vida do produto podem ser visualizadas na Figura 18 e o detalhamento com os respectivos autores está detalhado no apêndice B.

<sup>2</sup> Princípio utilizado para estabelecer uma ordenação dos fatores que mais influenciam relativamente com base no total

Figura 18 – Conceitos citados junto ao gerenciamento do ciclo de vida do produto x artigos publicados



| Legenda | Conceito   | Legenda | Conceito   |
|---------|--|---------|--|
| 1       | Computer-aided design (CAD)  | 14      | Computer-aided technologies (CAx)                      |
| 2       | Computer aided manufacturing (CAM)   | 15      | Customer relationship management (CRM)                 |
| 3       | Computer-aided engineering (CAE)   | 16      | Fuzzy analytic hierarchy process (FAHP)                |
| 4       | Unified Modeling Language (UML)  | 17      | Integrates Case-Based Reasoning (CBR)                  |
| 5       | Enterprise Resource planning (ERP)   | 18      | Product embedded information devices (PEIDs)           |
| 6       | Product Data Management (PDM)  | 19      | Computer Aided Process Planning (CAPP)                 |
| 7       | Product Lifecycle Management and Information Tracking using Smart Embedded Systems (PROMISE) | 20      | CATIA PLM  |
| 8       | Radio frequency identification (RFID)  | 21      | Model Based Definition (MBD)                           |
| 9       | Web Ontology Language (OWL)  | 22      | Model-Driven Architecture (MDA)                        |
| 10      | Product design Engineering based on Generative Assembly Sequences planning (PEGASUS)         | 23      | Product Information Model (PIM)                        |
| 11      | Quantum lifecycle management (QLM)   | 24      | Quality Function Deployment (QFD)                      |
| 12      | Server-Oriented Architecture (SOA)   | 25      | Standard for the Exchange of Product data model (STEP) |
| 13      | Big Data   |         |  |

Fonte: Elaboração própria.

Na figura 18, é possível observar os conceitos citados em conjunto com o gerenciamento do ciclo de vida do produto, sendo o CAD, o mais citado com 12,5% em relação ao total, seguido dos conceitos de CAM e CAE, devido a ser o sistema mais utilizado em conjunto com conceito do gerenciamento do ciclo de vida do produto. Na análise final, os vinte e cinco conceitos encontrados e relatados representam quase 100% do total das áreas de aplicação encontradas na base, conforme a aplicação de Pareto no segundo eixo do gráfico.

### 3.3.3 Implementação do gerenciamento do ciclo de vida do produto

Quando uma empresa adota o gerenciamento do ciclo de vida do produto pela primeira vez, o processo de implementação se torna um processo de mudança, porque as mudanças devem ocorrer não apenas no nível de TI, mas também em nível estratégico e de processo, mais especificamente, no nível das habilidades e capacidades individuais dos funcionários (SOTO-ACOSTA *et al.*, 2016).

As empresas com o objetivo de implementar o sistema PLM podem tomar como base os onze passos conceituais fornecidos a seguir para estabelecer seu próprio processo de implementação, vinculando os elementos específicos da empresa em um ambiente abrangente de gerenciamento do ciclo de vida. Para isso, é necessário seguir onze passos:

- a) definir o objetivo da implementação do gerenciamento do ciclo de vida;
- b) analisar o gerenciamento do ciclo de vida existente (caso a empresa já conte com um);
- c) analisar os processos de classificação;
- d) identificar o nível de maturidade da empresa;
- e) selecionar um modelo de referência apropriado;
- f) personalizar o modelo de referência;
- g) especificar requisitos para seleção do sistema;
- h) selecionar uma solução de *software*;
- i) definir o caminho da evolução;
- j) implementar solução de *software* selecionada;
- k) treinar os funcionários (SCHUH *et al.*, 2008).

Faz-se necessário mencionar também que a implementação da estratégia do sistema PLM é, de fato, um investimento a longo prazo, no entanto, seus benefícios não são mensuráveis em um curto período. Além disso, pode haver falhas de implementação, em casos de incompatibilidade entre o *software* selecionado e a filosofia da empresa. Portanto, para evitar esse tipo de problema, a escolha da solução do gerenciamento do ciclo de vida deve ser precedida de uma análise extensiva dos processos e procedimentos de negócios (SOTO-ACOSTA *et al.*, 2016).

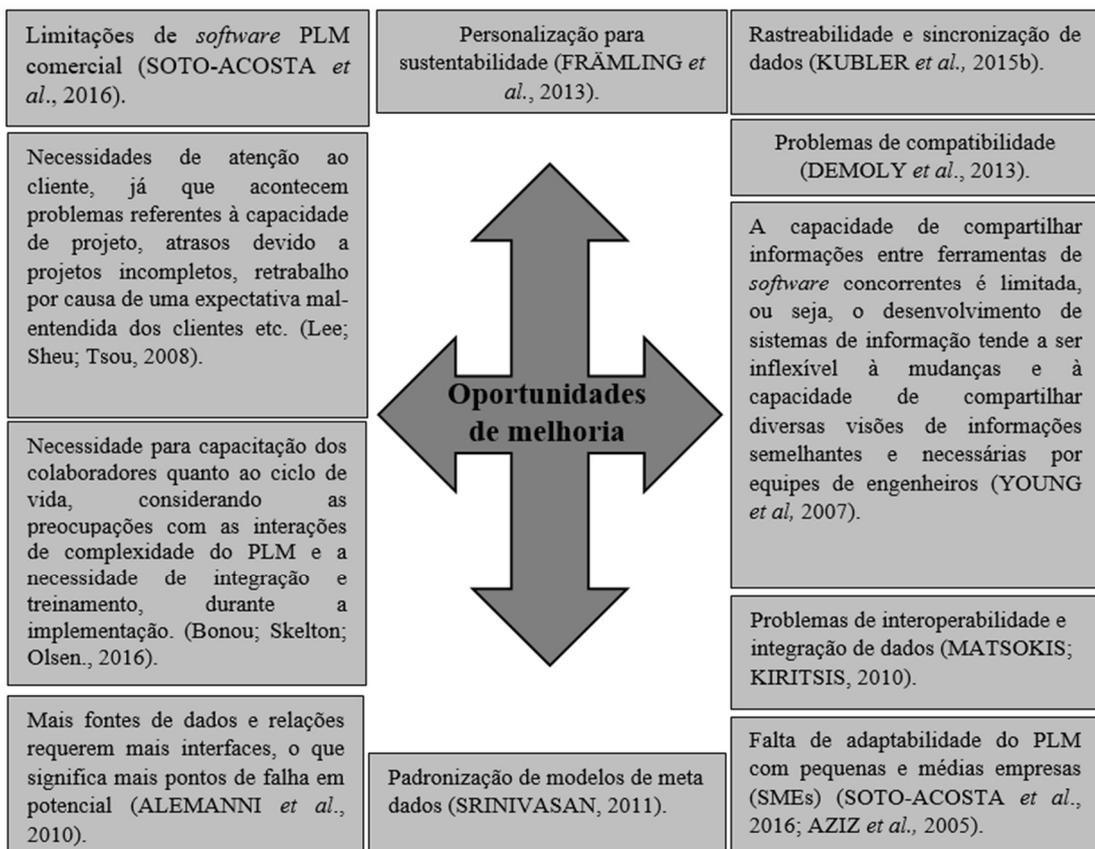
Embora o potencial do sistema PLM, de circuito fechado (gerenciamento *end to end* do ciclo de vida de todas as etapas do produto), seja amplamente reconhecido, ainda existem questões fundamentais que precisam ser abordadas (FRÄMLING *et al.*, 2014), pois ainda

existem limitações do *software* do sistema PLM comercial, o que significa que sua adoção implica em certas limitações, como, por exemplo, a integração do sistema PLM com outros sistemas (SOTO-ACOSTA *et al.*, 2016). É necessário, portanto, gerenciar um conjunto de relações para fornecer consistência de dados espalhados por diferentes mídias e formatos, muitas vezes, referidos como "associatividade" (ALEMANNI *et al.*, 2010).

Outrossim, há a oportunidade de melhoria em arquiteturas que tendem a ser inflexíveis na interface de dados (FRÄMLING *et al.*, 2014; Young *et al.*, 2007), o que significa a existência de mais pontos de falha potencial (ALEMANNI *et al.*, 2010). Logo, se faz necessário melhorar tanto a rastreabilidade e sincronização de dados (KUBLER *et al.*, 2015a), quanto a capacidade de compartilhar informações, por meio de ferramentas de *software* competitivas (YOUNG *et al.*, 2007).

Em suma, o PLM é um sistema em constante desenvolvimento, ou seja, ainda se faz necessário algumas melhorias, sumarizadas na figura 19.

Figura 19 - Oportunidades de melhoria do sistema PLM



Fonte: Adaptado de Santos, Reis e Fleury (2020).

A figura 19 apresenta as principais oportunidades de melhoria, mapeadas em relação ao tema do sistema PLM nos artigos analisados neste trabalho. As oportunidades podem ser consideradas lacunas/necessidades que podem ser preenchidas com a melhoria do sistema PLM, melhorias que o presente trabalho buscou compreender, de modo a atendê-las com a integração do tema do gêmeo digital e do gerenciamento do ciclo de vida do produto, conforme será apresentado na próxima seção.

### 3.4 A INTEGRAÇÃO DO GÊMEO DIGITAL NO CICLO DE VIDA DO PRODUTO

O gêmeo digital representa uma estrutura em que todos os elementos estão conectados, formando uma rede de informação. A transferência de informações para o ciclo de vida de produtos e sistemas, em um contexto industrial, leva à crescente criação, uso e armazenamento de artefatos digitais de todos os tipos, os quais contêm todas as informações e dados necessários, por diferentes partes interessadas, e formam um enorme armazenamento de dados digitais (ROSEN *et al.*, 2015). Com base na análise de *big data* dos dados acima, o gêmeo digital é capaz de prever, continuamente, o ciclo de vida do produto, sua vida útil restante e a probabilidade de falhas (QI; TAO, 2018).

Do ponto de vista do gerenciamento do ciclo de vida, a fusão de todos os artefatos de dados cibernéticos, em um sistema de gestão holístico, pode beneficiar vários modelos de consulta de dados e realizar uma otimização online (LENG *et al.*, 2019a). Além disso, o gêmeo digital promove a sinergia entre diferentes estágios do ciclo de vida do produto com a gestão dos dados acumulados e herdados, contribuindo, assim, para a inovação do produto da próxima geração (QI; TAO, 2018).

Assim, é possível dizer que o conceito de gêmeo digital fornece uma nova solução para o gerenciamento de dados. No caso de um produto, o gêmeo digital atua como uma única fonte de dados durante todo o ciclo de vida do produto, permitindo que a participação dos *stakeholders* seja mais ativa, já que os fornecedores podem colaborar com a criação de projeto do produto, planejamento de processos, montagem de produtos, uso e manutenção do produto etc.

O gêmeo digital pode ser utilizado para alcançar a integração e o compartilhamento de dados entre *upstream* e empresas a jusante, mas também para abraçar o desenvolvimento colaborativo de produtos, fabricação, operação e manutenção. Assim, o encapsulamento de serviços *on-line* dos recursos de fabricação de cada empresa pode ser alcançado, com base nos dados do ciclo de vida do produto, adquiridos e dados de processos e tarefas da empresa, responsáveis por facilitar a formação de uma rede de colaboração empresarial (CHENG *et al.*, 2020). No chão de fábrica, em especial, será possível obter uma gestão visualizada e integrada dos dados (ZHUANG; LIU; XIONG, 2018).

Resumindo, o gêmeo digital e o gerenciamento do ciclo de vida do produto devem ser vistos como um conceito integrado para o produto, processo ou serviço (durante a fase do projeto) ou como um sistema dinâmico (durante as operações), ou seja, um composto de operações em todas as fases da vida do produto até a reciclagem. Essas fases se beneficiaram dos dados de fonte única, coletados e traduzidos para uma melhor tomada de decisão.

O mecanismo de implementação consiste, principalmente, em 4 fases:

- a) fase 1 – projeto/ *design* do produto: é composta por etapas descritas e detalhadas por desenhos técnicos e documentos. Neles, o objetivo, as características e funcionalidades do produto são definidos;
- b) fase 2 – prototipagem/ validação do produto: ocorrem as primeiras implementações do produto para teste e validação;
- c) fase 3 – fabricação do produto: implementação e início do processo produtivo do produto;
- d) fase 4 – serviço do produto e reciclagem: fase final da vida útil do produto, em que se tem as etapas de serviço do produto, referente sua própria utilização, e a fase de reciclagem, em que ele pode ser descartado ou reciclado, conforme previsto na fase de *design* (CHENG *et al.*, 2020).

As atividades de pesquisa têm, como foco, os diferentes métodos de engenharia que apoiam o desenvolvimento de produtos, durante todo o seu ciclo de vida (ABRAMOVICI; GÖBEL; DANG, 2016). Além disso, o estudo do uso de simulação, baseado em modelos, pode ser utilizado para diferentes fins (conforme citado no subitem 3.2.5), como diagnóstico e operações otimizadas, não apenas durante a fase do projeto e planejamento, mas também durante outras fases do ciclo de vida (ROSEN *et al.*, 2015).

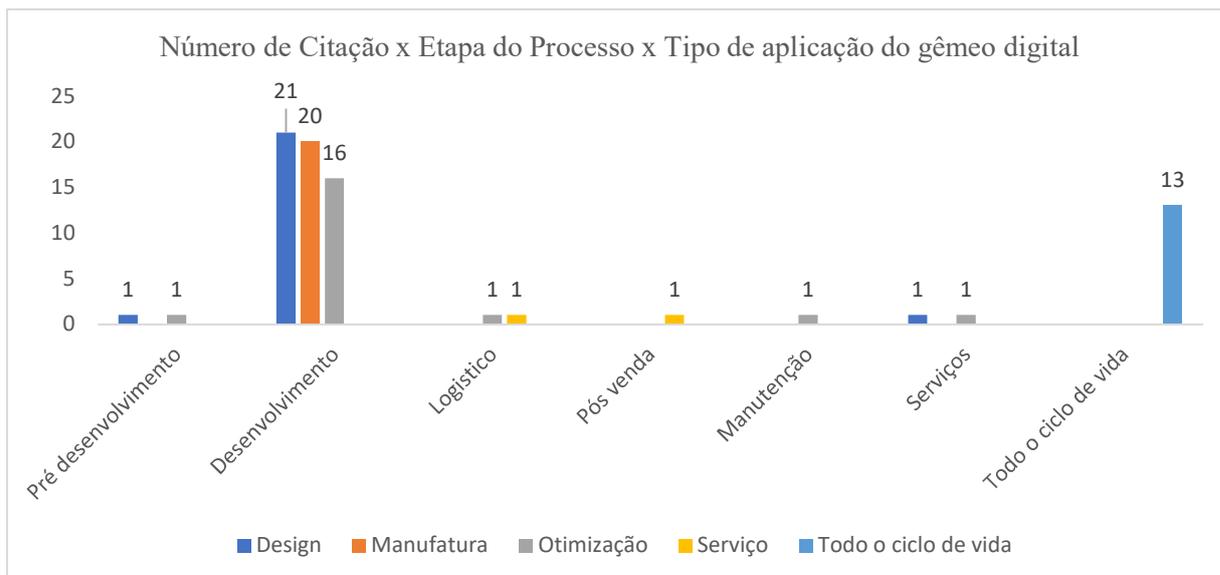
Durando o ciclo de vida do produto, o gêmeo digital deve ser construído com base nos requisitos e nas metas de aplicação, para que os subsistemas de aplicação sejam pensados com uma fusão de conhecimento, gerenciamento de dados, otimização de algoritmos, avaliação e previsão de *status*, lançamento de planos e instruções etc. As informações coletadas têm como objetivo realizar análises da função do produto, implementação de processos, ergonomia, previsões de desempenho do produto, *status* do equipamento, manutenção e testes de produto, planejamento de *layout* de produção, otimização da operação da planta etc. (ZHENG; YANG; CHENG, 2019).

Já na aplicação conjunta do gêmeo digital e do gerenciamento do ciclo de vida do produto, as simulações são partes essenciais do processo, tendo em vista que fornecem uma base de conhecimento experimentável, permitindo, assim, a introdução de novos processos de desenvolvimento ágeis, baseados em novas infraestruturas de comunicação, documentação e teste que abrangem todo o ciclo de vida. Para tanto, são necessários estruturas e processos apropriados, com o intuito de usar, consistentemente, simulações, em diferentes cenários de aplicação (SCHLUSE *et al.*, 2018). Desse modo, será possível mapear, corretamente, todos os tipos de dados físicos do produto e refletir em um espaço virtual (TAO *et al.*, 2018a), em que as simulações mais adequadas fornecem um meio eficaz de implementação (CHENG *et al.*, 2020).

É importante ressaltar que uma abordagem bem estabelecida (que permite o armazenamento, gerenciamento e reutilização das informações do produto dentro do gêmeo digital, em conjunto com a abordagem de gerenciamento do ciclo de vida do produto) visa apoiar uma produção personalizada, um dos componentes fundamentais para facilitar a tomada de decisões rápidas e precisas dentro da engenharia.

As etapas do ciclo de vida que constaram mais aplicações do gêmeo digital podem ser visualizadas na figura 20. Essa figura também indica o motivo pelo qual o gêmeo digital foi utilizado. Por exemplo, foi utilizado durante o pré-desenvolvimento e no desenvolvimento do produto, no processo logístico, no pós-vendas, em serviços e em outros artigos. Já na etapa de manutenção, o gêmeo digital foi aplicado para otimização das atividades.

Figura 20 - Etapas do processo por tipo de aplicação mais citadas



Fonte: Elaboração própria.

É importante ressaltar que as áreas de desenvolvimento do produto e manufatura foram definidas para o presente trabalho da seguinte forma: manufatura é, aqui, considerada como área de transformação da matéria prima em produto acabado ou semiacabado; desenvolvimento do produto (definido pelas fases de projeto informacional), projeto conceitual, projeto detalhado, preparação da produção e lançamento do produto.

O processo de integração entre o gerenciamento do ciclo de vida do produto e o gêmeo digital é sinérgico, complementar e inovador, uma vez que agrega seus benefícios em relação ao controle de dados extraídos (durantes toda a vida do produto) com a tecnologia mais avançada para o mapeamento, controle e simulação.

### 3.5 MODELO DE REFERÊNCIA

Um modelo de referência é uma estrutura abstrata para a compreensão de relacionamentos significativos entre as entidades de algum ambiente (ROSEMANN; AALST, 2007) que consiste em um conjunto mínimo de conceitos unificados e relacionados dentro de um problema específico, além de ser independente de detalhes concretos (MATOOK; INDULSKA, 2009). Assim, os modelos de referência são considerados modelos conceituais genéricos que formalizam as práticas recomendadas para um determinado domínio (MACKENZIE, *et al*, 2006).

O principal objetivo dos modelos de referência é agilizar o projeto de modelos corporativos individuais (particulares), a partir de uma solução genérica, já que eles aceleram o processo de modelagem e estabelecem um repositório, potencialmente, relevante para os processos e estruturas do negócio (MACKENZIE, *et al*, 2006).

Neste trabalho, a definição utilizada para o modelo de referência é: um modelo conceitual descritivo que unifica conceitos relacionados e formaliza as práticas de um determinado domínio (MATOOK; INDULSKA, 2009; MACKENZIE, *et al*, 2006), considerando que o escopo deste trabalho são dois conceitos relacionados (gêmeo digital e gerenciamento do ciclo de vida do produto) que serão unificados em um único modelo de referência (capítulo 5).

Sabe-se que há um modelo de referência para o processo de ciclo de vida do produto e um mapeamento de funcionalidades e/ou atividades específicas do gêmeo digital para determinado tipo de aplicação. No entanto, dentre as aplicações do gêmeo digital integrado com as etapas do ciclo de vida do produto, ainda não há um modelo de referência que contemple todo o mapeamento das etapas e funcionalidades da integração entre os dois temas. Para o preenchimento dessa lacuna, será apresentada, nos próximos capítulos, uma proposta para a construção de um modelo de referência.

A base para a construção desse modelo é o modelo de referência da gestão do ciclo de vida do produto, com indicações das funcionalidades do PLM de Zancul (2009), complementado com as contribuições das três revisões de literatura, conforme discutido no capítulo 2. A integração entre os modelos tem como objetivo as seguintes contribuições:

- a) documentar, de forma estruturada, melhores práticas da aplicação da integração entre os dois conceitos;
- b) integrar atividades, funcionalidades e conceitos que surgiram de diversas áreas de conhecimento, relacionadas aos dois temas;
- c) apoiar o aprendizado do gerenciamento do ciclo de vida do produto e do gêmeo digital;
- d) servir de benchmarking para futuros modelos de referência sobre o tema.

## 4 MODELOS DO GERENCIAMENTO DO CICLO DE VIDA DO PRODUTO E GÊMEO DIGITAL

Este capítulo descreve, separadamente, dois modelos de referência utilizados como base nesta pesquisa: o gerenciamento do ciclo de vida do produto e o gêmeo digital. As escolhas dos modelos de referência para este trabalho tem como justificativa a continuação da implementação da fábrica do futuro da universidade de São Paulo (USP).

### 4.1 MODELO DO GERENCIAMENTO DO CICLO DE VIDA DO PRODUTO

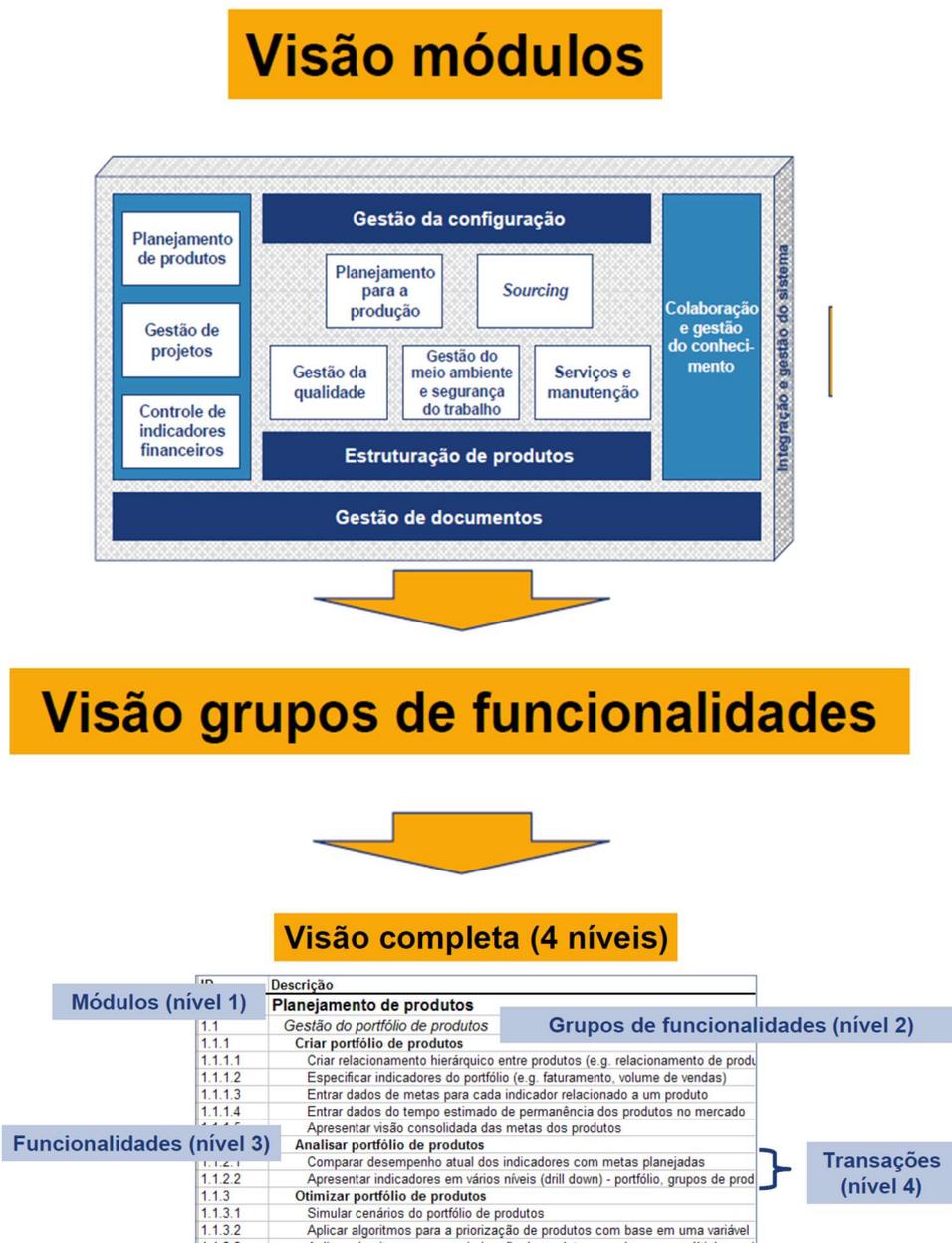
O modelo do gerenciamento do ciclo de vida do produto tem como base o modelo de referência integrado de processo e sistemas do gerenciamento do ciclo de vida do produto, proposto por Zancul (2009). Esse modelo tem como objetivo a construção de uma ferramenta estruturada com o intuito de auxiliar as empresas na seleção de sistemas de informação, através da gestão do ciclo de vida de seus produtos. O autor, primeiramente, obteve o modelo de referência de sistemas PLM e depois integrou o mesmo com o modelo de processo, resultando em um modelo integrado (ZANCUL, 2009).

O modelo de referência de sistemas PLM passou por quatro fases (ZANCUL, 2009):

- a) primeira fase: definição do escopo do gerenciamento do ciclo de vida do produto e seus limites. Nessa fase, foram empregadas as definições do gerenciamento do ciclo de vida do produto da literatura e os requisitos de processo empresarial relacionados ao gerenciamento do ciclo de vida do produto;
- b) segunda fase: pesquisa e análise de dez sistemas disponíveis comercialmente, em que a coleta de dados ocorreu no primeiro semestre de 2006. Nessa pesquisa de Zancul (2009), as funções de *software*, identificadas em soluções comerciais, foram agrupadas em módulos, de acordo com suas semelhanças no escopo;
- c) terceira fase: uma hierarquia de três níveis foi definida com o objetivo de organizar as funções em módulos (nível 1), grupos funcionais (nível 2) e funções (nível 3);
- d) quarta e última fase: descrição tabular de todo o modelo.

O modelo de referência do sistema PLM se concentra nas funções utilizadas para apoiar os processos de negócios das empresas. Trata-se, portanto, de um modelo de referência das funcionalidades dos sistemas que estabelece uma base comum para a comparação entre os diversos sistemas PLM disponíveis comercialmente (ZANCUL, 2009). Como é possível observar na figura 21, a estrutura do modelo de referência dos sistemas PLM é organizada em quatro níveis de detalhamento: módulos, grupos de funções, funções e transações.

Figura 21 - Estrutura do modelo de referência de sistemas PLM



Fonte: Zancul (2009).

No primeiro nível, o modelo é composto por nove módulos. Com base nesses módulos, se deriva a visão dos grupos de funcionalidades do sistema PLM e a visão completa. A visão completa é composta por módulos do nível 1, por grupo funcionalidades do nível 2, por funcionalidades do nível 3 e por transações do nível 4.

Zancul (2009) também demonstra a relação dos módulos com as funções que abrangem todo o ciclo de vida, composta por treze módulos e quarenta e nove grupos de funções, conforme observado na figura 22.

Figura 22 - Grupo de funcionalidades do modelo de referência de sistemas PLM

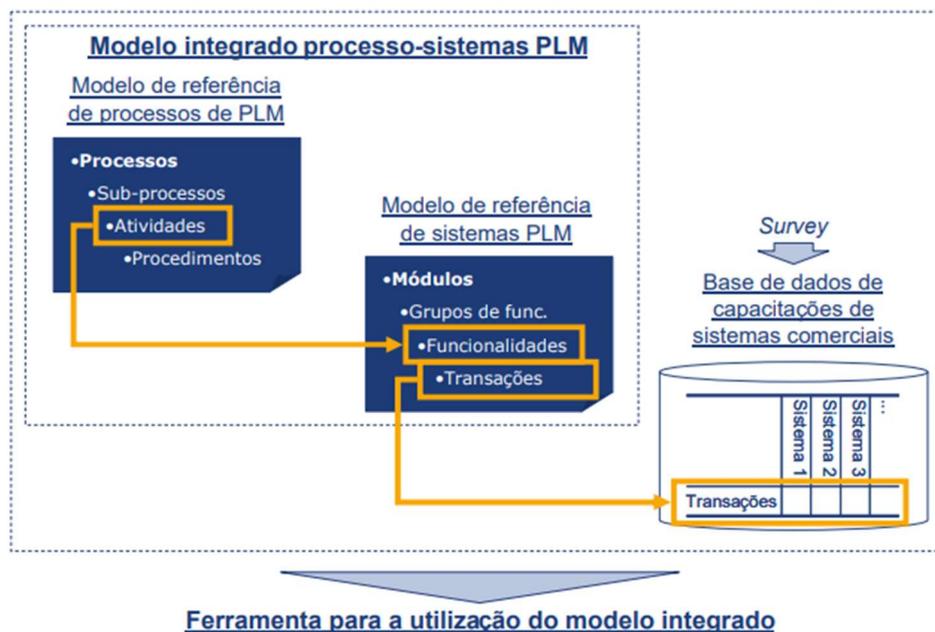
## Visão grupos de funcionalidades

|                                      | <u>Módulos</u>                                  |   | <u>Grupos de funcionalidades</u>                          |   |                              |                              |                    |
|--------------------------------------|---|---|---|---|------------------------------|------------------------------|--------------------|
| Planejamento e gestão dos produtos   | Planejamento de produtos                        | Gestão do portfólio de produtos                 | Coleta, avaliação e seleção de idéias para novos produtos |   | Gestão de requisitos         |                              |                    |
|                                      | Gestão de projetos                              | Planejamento de projetos                        | Controle de projetos                                      |   | Gestão de múltiplos projetos |                              |                    |
|                                      | Controle de indicadores financeiros             | Controle de indicadores financeiros de projetos |   | Cálculo do desempenho financeiro no ciclo de vida |                              |                              |                    |
| Gestão de dados centrais             | Estruturação de produtos                        | Cadastro mestre de materiais                    | Classificação   | Gestão da estrutura de produtos                   | Gestão de variantes          | Configuração de produtos     |                    |
|                                      | Gestão da configuração                          | Gestão de versões, status e validades           | Controle de aprovações                                    | Gestão de mudanças                                | Mudanças de ordens produção  | Controle da configuração     |                    |
|                                      | Gestão de documentos                            | Cadastro e armazenamento de documentos          | Visualização de documentos                                | Publicação de documentação técnica                | Arquivamento de documentos   |                              |                    |
| Geração de dados de produtos         | Gestão da qualidade                             | Métodos de qualidade                            | Planejamento da qualidade                                 | Controle da qualidade                             |                              | Auditorias de qualidade      |                    |
|                                      | Gestão do meio ambiente e segurança do trabalho | Catálogo de materiais controlados               | Acompanhamento de materiais controlados                   | Gestão de resíduos                                |                              | Segurança do trabalho        |                    |
|                                      | Serviços e manutenção                           | Planejamento da manutenção                      |   | Execução da manutenção                            |                              |                              |                    |
|                                      | Planejamento para a produção                    | Cadastro de recursos de produção                | Planejamento do processo de produção                      |   | Planejamento da fábrica      |                              |                    |
|                                      | Sourcing  | Catálogo de componentes                         |   | Gestão de fornecedores                            |                              | eSourcing                    |                    |
| Colaboração e gestão do conhecimento | Comunicação e trabalho em equipe                | Workflow  |   | Gestão do conhecimento                            |                              | Controle de acesso aos dados |                    |
| Integração e gestão do sistema       | Padrões de integração                           | Integração com CAD                              | Integração com ERP  | Integração com PDM / PLM                          | Integração com gestão proj.  | Gestão de usuários           | Segurança de dados |

Fonte: Zancul (2009).

Após a criação do modelo de referência de sistemas PLM, o autor estabeleceu uma conexão entre as atividades do modelo de referência de processos, as funcionalidades do modelo de referência de sistemas e as capacidades de sistemas específicos, conforme a figura 23.

Figura 23 - Estrutura de relacionamento entre os modelos de processos e sistemas PLM e base de dados de capacitações de sistemas comerciais (conceitual)



Fonte: Zancul, 2009.

Como citado anteriormente, a conexão apresentada na figura 23 tem como objetivo a criação de uma ferramenta estruturada, com o intuito de auxiliar as empresas na seleção de sistemas de informação, através da gestão do ciclo de vida dos produtos (ZANCUL, 2009).

Já para a construção do modelo integrado de processo e funcionalidade de sistema, foi elaborada uma matriz de comparação, na qual as linhas descrevem o modelo de processos e as colunas representam o modelo de sistemas, limitado às funcionalidades do tipo específico, conforme pode ser visualizado na figura 24 que apresenta uma visão simplificada do modelo integrado. Ademais, é possível observar que o modelo é composto por processos, subprocessos, atividades e procedimentos (ZANCUL, 2009).

Figura 24 - Modelo de referência integrado de processo e sistemas PLM

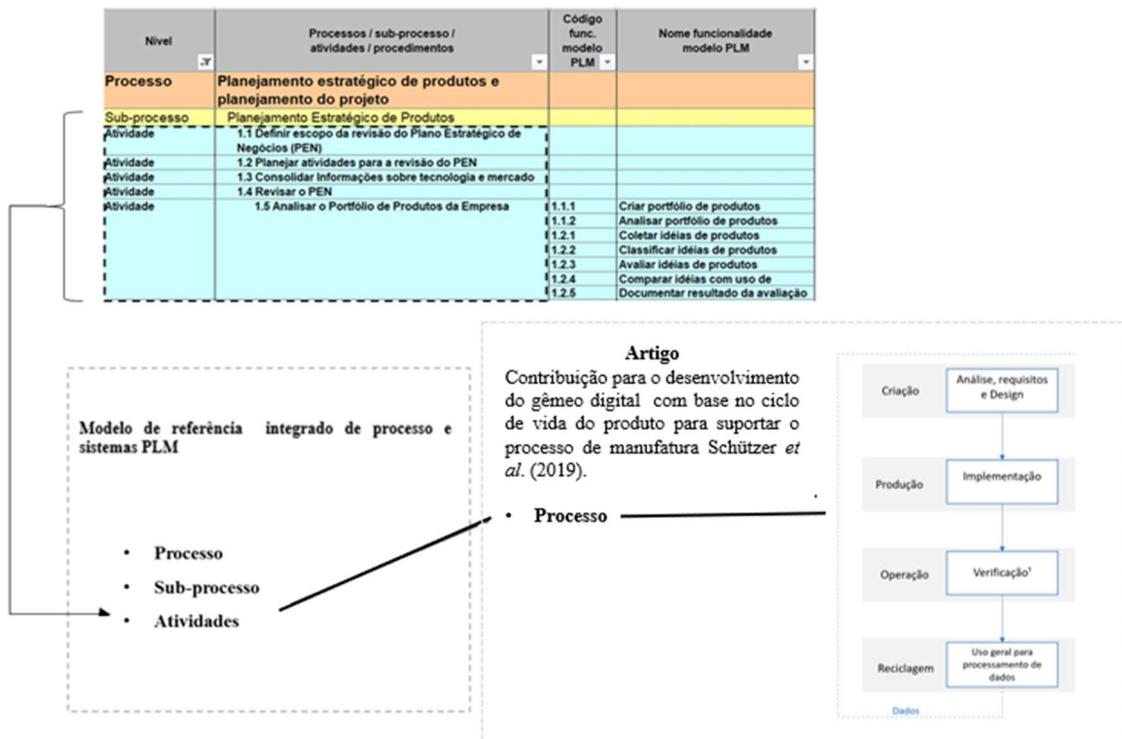
| Modelo dos processo |   | Funcionalidades modelo de sistemas |   |
|---------------------|---|------------------------------------|---|
| Nível               | Processos / sub-processo / atividades / procedimentos                         | Código func. modelo PLM            | Nome funcionalidade modelo PLM                        |
| <b>Processo</b>     | <b>Desenvolvimento de produtos</b>  |                                    |   |
| <b>Sub-processo</b> | <b>Projeto Informacional / Informational Design</b>                           |                                    |   |
| <b>Atividade</b>    | <b>3.1 Atualizar o Plano do Projeto Informacional</b>                         | 2.2.1                              | Visualizar visão geral do status de projetos          |
|                     |   | 2.2.2                              | Registrar e visualizar avanços nos planos de projetos |
|                     |   | 2.2.3                              | Gerar relatórios de gestão de projetos                |
| Procedimento        | Analisar o plano de projeto atual   |                                    |   |
| Procedimento        | Analisar e sintetizar as novas condições para a realização do projeto         |                                    |   |
| Procedimento        | Atualizar o escopo do produto   |                                    |   |
| Procedimento        | Atualizar e detalhar o escopo do projeto                                      |                                    |   |
| Procedimento        | Atualizar e detalhar as atividades, os responsáveis, os prazos e o cronograma |                                    |   |
| Procedimento        | Atualizar e detalhar recursos necessários                                     |                                    |   |
| Procedimento        | Atualizar estimativa de orçamento do projeto                                  |                                    |   |
| Procedimento        | Atualizar, monitorar, valorar e definir novos indicadores de desempenho       |                                    |   |
| Procedimento        | Analisar a viabilidade econômico-financeira do projeto                        |                                    |   |
| Procedimento        | Avaliar novos riscos  |                                    |   |
| Procedimento        | Atualizar plano de comunicação  |                                    |   |
| Procedimento        | Planejar, atualizar e preparar novas aquisições                               |                                    |   |

Fonte: Zancul (2009).

As atividades identificadas pelo modelo podem ser apoiadas pelas funcionalidades do sistema PLM e as funcionalidades mapeadas são base para transações de *softwares* comerciais específicos para o sistema PLM (ZANCUL, 2009).

Como citado, o trabalho de Zancul (2009) será utilizado como base da conexão entre o gerenciamento do ciclo de vida do produto e o gêmeo digital. Essa conexão foi gerada por meio das atividades do modelo de referência integrado entre processo e sistemas, em que as atividades do modelo são relacionadas com os processos de desenvolvimento do gêmeo digital. Ela é apresentada, previamente, na figura 25, porém a construção da relação será apresentada, com mais detalhes, na seção 4.3.1.

Figura 25 - Conexão o modelo integrado de processo e sistemas PLM e os processos do ciclo de vida do gêmeo digital



Fonte: Adaptado de Zancul (2009).

Na figura 25, é possível verificar que a relação entre as atividades do modelo integrado de processo, sistemas PLM de Zancul (2009) e o processo do gêmeo digital, conforme Schützer *et al.* (2019), foi estabelecido por meio da associação entre as atividades e o processo (criação, produção, operação e reciclagem) (seção 4.2.1), exemplo: a primeira divisão do processo do gêmeo digital conforme Schützer *et al.* (2019) é a criação do gêmeo digital e, para gerar a criação do gêmeo digital, é necessário realizar a atividade de mapeamento dos requisitos, sendo que a atividade mapeamento dos requisitos é resultante do modelo integrado de processo, sistemas PLM de Zancul (2009). Portanto, com a correlação entre as atividades e o processo que foi gerado o vínculo para a construção do modelo de referência resultante deste trabalho.

## 4.2 MODELO DO GÊMEO DIGITAL

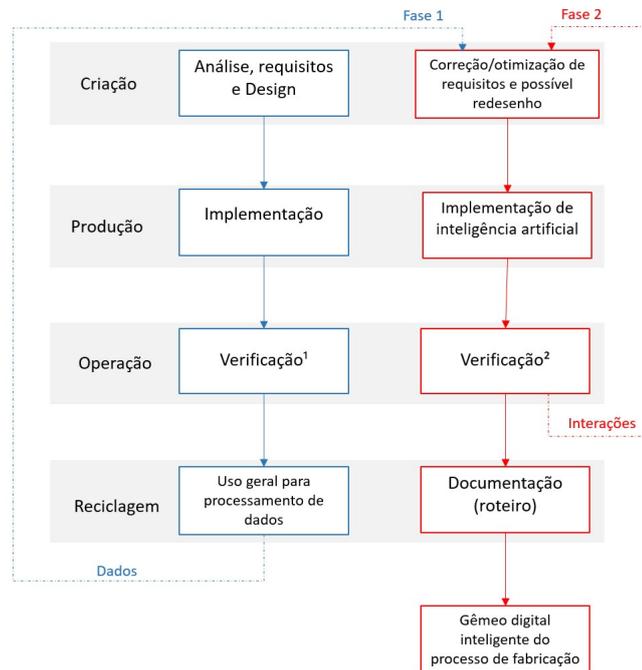
O modelo do gêmeo digital é composto pelos três artigos utilizados como base nesta pesquisa. “a contribuição para o desenvolvimento de um gêmeo digital baseado no ciclo de vida do produto para apoiar o processo de fabricação” de Schützer *et al.* (2019); “desenvolvimento e operação dos gêmeos digitais para sistemas técnicos e serviços” de Stark, Fresemann e Lindow (2019) e “requisitos dos gêmeos digitais no contexto da Indústria 4.0” de Durão *et al.* (2018).

Esses artigos se destacaram no repositório da revisão de literatura, por conter elementos para a estruturação de um modelo de referência para o gêmeo digital. Destaca-se que nos artigos do escopo desta pesquisa, não foram encontrados documentos que apresentassem um modelo de referência para o gêmeo digital.

### 4.2.1 Desenvolvimento de um gêmeo digital

O artigo “A contribuição para o desenvolvimento de um gêmeo digital baseado no ciclo de vida do produto para apoiar o processo de fabricação”, de Schützer *et al.* (2019), propõe diretrizes para a implementação de um gêmeo digital do processo de fabricação (DTMP), com base em uma abordagem de ciclo de vida do produto, sendo dividido em duas fases: a fase 1 (em azul) e a fase 2 (em vermelho), conforme a figura 26.

Figura 26 - Conceito de Projeto de ciclo de vida



Fonte: Adaptado de SCHÜTZER *et al*, 2019.

A primeira fase refere-se ao desenvolvimento do Projeto de ciclo de vida e começa com a (primeira) etapa de criação, em que os requisitos são analisados e, inicialmente, definidos com base em dois aspectos: 1) a literatura de requisitos para o gêmeo digital e 2) o produto a ser fabricado em uma linha de fabricação existente. Já a segunda fase prevê a introdução de ferramentas de inteligência artificial, caracterizando um gêmeo digital inteligente no processo de fabricação (SDTMP) (SCHÜTZER *et al*, 2019).

Na segunda etapa da primeira fase – Implementação –, é realizada a produção do protótipo em conjunto com as simulações, estabelecendo uma conexão entre o mundo físico e o digital. Essa fase permite a troca de dados entre esses dois mundos, em tempo real, para verificação dos comportamentos na fase seguinte. Na terceira etapa – operação –, acontece a sincronização de dados e a verificação dos comportamentos em relação às especificidades e requisitos do projeto, uma vez que os comportamentos desviados devem ser retificados, por protocolos de resolução de problemas, originados durante a primeira fase (SCHÜTZER *et al*, 2019).

Na última etapa, denominada “reciclagem”, as ferramentas e técnicas de inteligência artificial são empregadas para processar os dados coletados durante as fases anteriores, o que possibilita identificar padrões erráticos subjacentes que levam à dessincronização de dados

entre o sistema físico e o virtual. Além disso, essa fase visa identificar a fonte de comportamentos imprevisíveis que podem ser corrigidos, durante a fabricação do produto físico, já que os dados processados, nessa última etapa, podem ser utilizados como entrada para a fase 2 (em vermelho na figura 26), objetivando a correção de erros, otimização dos requisitos e até se tornar base para o redesenho do DTMP. (SCHÜTZER *et al*, 2019).

Nesta pesquisa, a base do processo do ciclo de vida de um gêmeo digital é composta pelas etapas da primeira fase (em azul na figura 26). A aplicação da fase no modelo será descrita no capítulo 5, sobre o modelo de referência integrado. A definição de processo a ser utilizada aqui é a de operação contínua e prolongada de alguma atividade (MELHORAMENTOS, 2022).

#### **4.2.2 Desenvolvimento e operação do gêmeo digital para sistemas técnicos e serviços**

As dimensões do gêmeo digital foram citadas, pela primeira vez, em um estudo, feito por Enders e Hoßbach (2019), que examinou 87 aplicações do gêmeo digital e propôs um esquema de classificação com seis dimensões do gêmeo digital. As questões de pesquisa respondidas pelos autores foram: em quais indústrias são utilizadas os gêmeos digitais? Quais são as dimensões relevantes de um esquema de classificação, para descrever casos de aplicação de gêmeos digitais? O procedimento metodológico, utilizado por eles, foi a revisão de literatura em três etapas: 1) desenvolvimento de critérios para a seleção de publicações relevantes; 2) emprego da abordagem de pesquisa bibliométrica e 3) um esquema de análise para as publicações identificadas. As bases de pesquisa utilizadas foram: *ACM Digital Library*, *AIS eLibrary*, *IEEE Xplore Digital Library*, *Science Direct*, *Springer Link* e *Web of Science* e a busca foi realizada em novembro de 2018 e limitada aos resultados dos anos de 2000 a 2018. Os termos de pesquisa utilizados foram: “*digital twin*”, “*product avatar*”, “*product agent*”, “*product shadow*”, “*information mirroring model*”, e “*cyber-physical equivalence*” (ENDERS; HOßBACH, 2019).

As dimensões foram mapeadas em relação ao número de repetições da dimensão da amostra de artigos estudados, em que foram encontradas seis dimensões: setor industrial, propósito, objeto de referência física, completude, conexão e horário de criação, conforme pode ser visto na figura 27 (ENDERS; HOßBACH, 2019).

Figura 27 - 6 dimensões do gêmeo digital

| Dimensões                   | Características<br>(Número de ocorrências entre parênteses) |                 |                  |                    |                    |  |                   |                    |           |               |
|-----------------------------|---|-----------------|------------------|--------------------|--------------------|--|-------------------|--------------------|-----------|---------------|
|                             | Setor Industrial  | Manufatura (54) | Aeroespacial (5) | Energia (4)        | Automotivo (3)     | Marinha (3)                            | Petróleo (2)      | Agrícola (2)       | Saúde (2) | Setor Público |
| Propósito                   | Simulação (47)  |                 |                  |                    | Monitoramento (32) |  |                   | Control (23)       |           |               |
| Objeto de referência física | Ativo de fabricação (45)                                    |                 |                  | Produto (27)       |                    | Humano (2)                             |                   | Infraestrutura (2) |           |               |
| Compleitude                 | 1-3 Recursos (57)   |                 |                  |                    |                    | >4 Recursos (30)                       |                   |                    |           |               |
| Hora de criação             | Antes da criação do Gêmeo Físico (11)                       |                 |                  |                    |                    | Depois da criação do Gêmeo Físico (76) |                   |                    |           |               |
| Conexão                     | Sem conexão (23)  |                 |                  | Unidirecional (39) |                    |  | bidirecional (25) |                    |           |               |

Fonte: Adaptado de Enders e Hoßbach (2019).

Visando ampliar a fundamentação teórica para estabelecer uma base para o futuro da modelagem do gêmeo digital, Stark, Fresemann e Lindow (2019) utilizaram o estudo de Enders e Hoßbach (2019) como base, para a definição das oito dimensões do gêmeo digital. Para tanto, Stark iniciou a pesquisa com os seguintes objetivos: oferecer uma perspectiva de compreensão coerente do que significa um gêmeo digital; apresentar uma visão detalhada sobre as diferentes definições do gêmeo digital; apresentar as primeiras propostas de modelos e definir a importância futura do conceito. Esses autores consideraram quatro perguntas principais para o debate científico: qual literatura contribui para o corpo teórico relacionado ao termo “gêmeo digital”? Quais propriedades, capacidades e funções são atribuídas, ou, implicitamente, assumidas, aos conceitos do gêmeo digital? Quais conceitos estão, intimamente, relacionados ou são complementares ao “gêmeo digital”? Quais modelos generalizantes e representações do conceito do gêmeo digital são fornecidos?

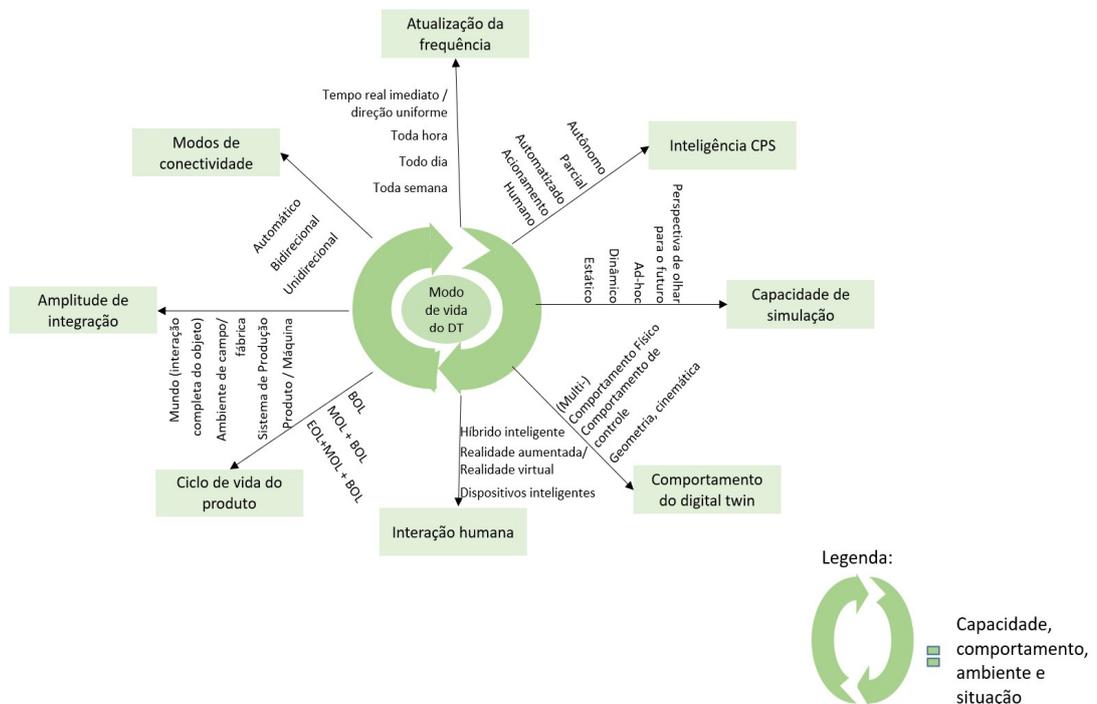
Essa pesquisa utilizou o termo “gêmeo digital” na busca das seguintes bases de dados: *Scopus*, *Web of Science*, *SpringerLink*, *IEEE Xplore* e *Google Scholar*. Após, um filtro foi aplicado para selecionar artigos com importância e aplicação conceito do tema nos artigos selecionados. Os fundamentos teóricos, propriedades, em comum, que foram atribuídas, sistematizadas e agrupadas com o intuito de formar uma base para a futura formação de modelos unificadores e explícitos do gêmeo digital. Como resultado, o estudo de Stark, Fresemann e Lindow (2019) chegou na relação das 8 dimensões do gêmeo digital.

O objetivo da criação das dimensões do gêmeo digital foi o de agrupar as principais características, em contexto e ambiente, bem como apresentar os comportamentos e as capacidades que se destinam a facilitar a descrição dos aspectos mais importantes, ao projetar novos gêmeos digitais ou ampliar os já existentes (STARK; FRESEMANN; LINDOW, 2019).

O conceito das 8 dimensões descreve o gêmeo digital em termos de comportamento e capacidade, em que, para cada um dos itens, existem outras 4 dimensões (STARK;

FRESEMANN; LINDOW, 2019). As oito dimensões não são exclusivas ou exaustivas, mas representam dimensões prováveis de importância para apoiar contextos de negócios individuais do escopo específico do gêmeo digital. Elas podem nortear a definição de metas no desenvolvimento de um novo produto, através do uso de um gêmeo digital já existente, com o intuito de expandir o conhecimento adquirido com o gêmeo digital operacional ou para desenvolver, ainda mais, o gêmeo digital como um produto ou serviço, por conta própria (STARK; FRESEMANN; LINDOW, 2019). Isso pode ser realizado através do acréscimo de novas funções, ao longo das oito dimensões, conforme apresentado na figura 28.

Figura 28 - Representação das 8 Dimensões do gêmeo digital



Fonte: Adaptado de Stark; Fresemann e Lindow (2019).

Cada uma das dimensões oferece três ou quatro níveis de realização. Ademais, um nível superior não é, necessariamente, melhor do que outro, porém retrata um espaço de realização diferente e / ou único (SJAROV *et al.*, 2020). As 8 dimensões, com seus respectivos níveis, podem ser melhor visualizadas na tabela 3.

Tabela 3 – 8 dimensões e níveis do gêmeo digital

| <b>Comportamento e capacidades</b>      |  |                                      |                                       |
|---|--|--------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Interação Humana</b>                 | <b>Inteligência CPS</b>                | <b>Capacidade de simulação</b>       | <b>Comportamento do gêmeo digital</b> |
| Híbrido inteligente                     | Autônomo                               | Perspectiva de olhar para o futuro   | (Multi-) Comportamento físico         |
| Realidade aumentada e realidade virtual | Parcial                                | <i>Ad-hoc</i>                        | Comportamento de controle             |
| Dispositivos inteligentes               | Automatizado                           | Dinâmico                             | Geometria e Cinemática                |
|   | Acionamento humano                     | Estático                             |                                       |
| <b>Ambiente e situação</b>              |  |                                      |                                       |
| <b>Atualização da frequência</b>        | <b>Ciclo de vida do Produto</b>        | <b>Amplitude de integração</b>       | <b>Modos de conectividade</b>         |
| Tempo real imediato / direção uniforme  | Início do ciclo de vida (BOL)          | Mundo (interação completa do objeto) | Automático                            |
| Toda hora                               | Meio do ciclo de vida (MOL) + BOL      | Ambiente de campo/fábrica            | Bidirecional                          |
| Todo dia                                | Fim do ciclo de vida (EOL + MOL + BOL) | Sistema de Produção                  | Unidirecional                         |
| Toda semana                             |  | Produto / Máquina                    |                                       |

Fonte: Adaptado de Stark, Freseman e Lindow (2019).

Nesta pesquisa, as 8 dimensões acima foram consideradas para a criação do modelo de referência do gêmeo digital. Essas dimensões também foram mapeadas em conjunto com os requisitos que serão apresentados na seção 4.2.3, a seguir. A aplicação dos requisitos no modelo pode ser encontrada no capítulo 5, em que será abordado o modelo de referência integrado, resultado da presente pesquisa.

### 4.2.3 Requisitos dos gêmeos digitais na Indústria 4.0

Durão *et al.* (2018) propõe uma síntese dos requisitos de gêmeo digital, com base na revisão da literatura e entrevistas realizadas na indústria. Segundo eles, a definição de gêmeo

digital, assim como seus requisitos, não está, completamente, estabelecida. Por isso, as características que um modelo gêmeo digital deve possuir ainda não foram, consistentemente, definidas na literatura. Os autores procuraram responder às seguintes questões de pesquisa: “quais são os principais requisitos para o desenvolvimento de um gêmeo digital?” e “O que a indústria entende como gêmeo digital?”. A revisão da literatura, desse estudo, concentrou-se na análise de conteúdo de artigos publicados entre 2010 e 2018 e indexados no *ISI Web of Science*. Também foram realizadas entrevistas com representantes da indústria do Brasil e da Alemanha. As entrevistas foram realizadas por telefone com 7 representantes de 6 empresas diferentes: dois da área automotiva, três fornecedores de tecnologia de fabricação e um fornecedor de software ERP. As empresas responderam as seguintes perguntas referentes ao gêmeo digital:

- a) você já ouviu falar do conceito gêmeo digital?;
- b) se sim, o que você entende por gêmeo digital?;
- c) você utiliza gêmeos digitais em algum dos seus processos?;
- d) quais são, na sua opinião, os principais requisitos para a implementação de gêmeos digitais em seus processos?;
- e) qual é o seu plano futuro em relação ao uso do gêmeo digital?.

Após responder à essas perguntas, os requisitos apresentados na literatura foram comparados com os requisitos e preocupações definidos pela indústria. Os resultados desse estudo mostram que os requisitos de gêmeo digital estão relacionados, principalmente, a dados em tempo real, integração e fidelidade. A pesquisa também apontou para a similaridade entre os requisitos da indústria e os encontrados na revisão de literatura. Porém, apesar de todas as empresas entrevistadas afirmarem compreender o conceito de gêmeo digital, a pesquisa concluiu que, na prática, o gêmeo digital está ancorado em modelos de simulação.

Durão *et al.* (2018) encontraram e descreveram 23 requisitos do gêmeo digital, conforme apresentado na tabela 4.

Tabela 4 - Requisitos do gêmeo digital

|                            |                                      |
|----------------------------|--------------------------------------|
| Interação                  | Expansibilidade                      |
| Comunicação                | Globalmente disponível em tempo real |
| Convergência               | Expandida independentemente          |
| Atualizado automaticamente | Interoperabilidade                   |
| Autonomia                  | Modularidade                         |
| Conectividade              | Planejamento de processos            |
| Aquisição de dados         | Localização em tempo real            |
| Captura de dados           | Escalabilidade                       |
| Qualidade dos dados        | Escalável                            |
| Segurança de dados         | Aquisição estável de dados           |
| Armazenagem de dados       | Operação estável                     |
| Eficiência                 |                                      |

Fonte: Adaptado de Durão *et al.* (2018).

Nesta pesquisa, os requisitos acima descritos foram considerados como requisitos do gêmeo digital para a criação do modelo de referência. Esses requisitos também foram mapeados em conjunto com as 8 dimensões do gêmeo digital descritas no subitem 4.2.2. A aplicação dos requisitos no modelo pode ser encontrada no capítulo 5.

### 4.3 RELAÇÕES ENTRE OS MODELOS

O início da construção do modelo de referência, aqui proposto, aconteceu por meio das relações entre as referências acadêmicas escolhidas (conforme 4.1 e 4.2). Seguindo essa perspectiva, este capítulo visa mostrar como as relações foram estabelecidas e consideradas para o desenvolvimento do modelo.

#### 4.3.1 O modelo de referência do gerenciamento do ciclo de vida do produto e os processos do ciclo de vida do gêmeo digital

Na primeira etapa de construção dos relacionamentos entre os modelos, foi considerado o elo entre as atividades do modelo de referência integrado de processos e sistemas PLM de Zancul (2009), assim como os processos do ciclo de vida do gêmeo digital de Schützer *et al.* (2019), conforme a figura 29.

Figura 29 - Relação entre as atividades do modelo de referência integrado de processos e sistemas PLM e os processos do ciclo de vida do gêmeo digital

**Modelo de referência integrado de processos e sistemas PLM – Zancul, 2009**

| Nível        | Processos / sub-processo / atividades / procedimentos                | Código func. modelo PLM | Nome funcionalidade modelo PLM    |
|--------------|--|-------------------------|-----------------------------------|
| Processo     | Planejamento estratégico de produtos e planejamento do projeto       |                         |                                   |
| Sub-processo | Planejamento Estratégico de Produtos                                 |                         |                                   |
| Atividade    | 1.1 Definir escopo da revisão do Plano Estratégico de Negócios (PEN) | 1                       |                                   |
| Atividade    | 1.2 Planejar atividades para a revisão do PEN                        | 1                       |                                   |
| Atividade    | 1.3 Consolidar informações sobre tecnologia e mercado                | 1                       |                                   |
| Atividade    | 1.4 Revisar o PEN  | 1                       |                                   |
| Atividade    | 1.5 Analisar o Portfólio de Produtos da Empresa                      | 1.1.1                   | Criar portfólio de produtos       |
|              |  | 1.1.2                   | Analisar portfólio de produtos    |
|              |  | 1.2.1                   | Coletar ideias de produtos        |
|              |  | 1.2.2                   | Classificar ideias de produtos    |
|              |  | 1.2.3                   | Avaliar ideias de produtos        |
|              |  | 1.2.4                   | Comparar ideias com uso de        |
|              |  | 1.2.5                   | Documentar resultado de avaliação |

**Modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital**



Fonte: Elaboração própria.

A relação entre os processos do gêmeo digital e as atividades foi formada, a partir da seguinte pergunta: “quais atividades, pertencentes ao processo do modelo de referência integrado entre processos e sistemas PLM, correspondem aos processos do ciclo de vida do gêmeo digital?”. Essa pergunta foi estabelecida, uma vez que no processo de criação do ciclo de vida do gêmeo digital, há um processo, denominado desenvolvimento de produtos, que conta com os seguintes subprocessos: projeto informacional, projeto conceitual e projeto detalhado. Cada um desses subprocessos fazem parte do processo do ciclo de vida do gêmeo digital denominado criação. Já os subprocessos de preparação da produção do produto e lançamento do produto, que também fazem parte do processo de desenvolvimento do produto, estão dentro do processo denominado produção, conforme pode ser visto na tabela 5.

Tabela 5 – Detalhamento da relação entre o processo do gerenciamento do ciclo de vida e o processo do gêmeo digital

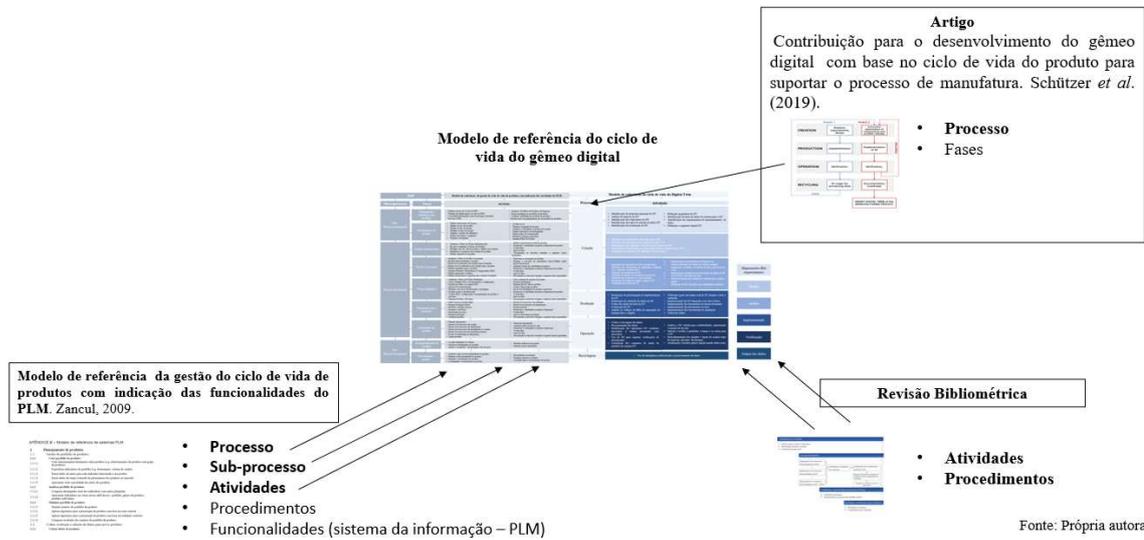
| Nível           | Processos / Subprocesso   | Processo do ciclo de vida do gêmeo digital |
|-----------------|---|--|
| <b>Processo</b> | <b>Planejamento estratégico de produtos e planejamento do projeto</b> | Criação                                    |
| Subprocesso     | Planejamento Estratégico de Produtos                                  |  |
| Subprocesso     | Planejamento do Projeto   |  |
| <b>Processo</b> | <b>Desenvolvimento de produtos</b>                                    |  |
| Subprocesso     | Projeto Informacional / <i>Informational Design</i>                   |  |
| Subprocesso     | Projeto Conceitual / <i>Conceptual Design</i>                         |  |
| Subprocesso     | Projeto Detalhado / <i>Detailed Design</i>                            | Produção                                   |
| Subprocesso     | Preparação da Produção do Produto                                     |  |
| Subprocesso     | Lançamento do Produto   | Operação                                   |
| <b>Processo</b> | <b>Acompanhamento e retirada de produtos</b>                          |  |
| Subprocesso     | Acompanhar Produto e Processo de Produção                             |  |
| Subprocesso     | Descontinuar Produto no Mercado                                       | Reciclagem                                 |
| <b>Processo</b> | <b>Gestão da configuração</b>   | *  |
| Subprocesso     | Gerenciamento de Mudanças de Engenharia                               |  |
| <b>Processo</b> | <b>Melhoria dos processos de gestão do ciclo de vida</b>              |  |
| Subprocesso     | Melhoria (incremental) do PDP   |  |
| Subprocesso     | Transformação do PDP  |  |

Fonte: Elaboração própria da autora.

Outra questão importante é que o processo de gestão da configuração e a melhoria da gestão de ciclo de vida não foram finalizados, neste primeiro momento, uma vez que são processos que utilizam os outputs do processo do ciclo de vida do gêmeo digital. Porém, existem atividades, dentro do processo do gêmeo digital, que são de configuração e melhoria (capítulo 5).

Assim, tendo em vista a relação das atividades do gerenciamento do ciclo de vida com os processos do gêmeo digital, foram identificadas as etapas, atividades e procedimentos do gêmeo digital relacionadas com os processos do gerenciamento do ciclo de vida. Como resultado, obteve-se o modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital. As relações entre os elos dos modelos pode ser visualizado na figura 30:

Figura 30 - Elos entre as bases e o modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital



Fonte: Elaboração própria.

A construção do modelo de referência é composta pelas referências mencionadas acima nos subitens 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3 e no item 4.1. Para tanto, o modelo que representa o “de-para” entre o que influenciou e foi base para cada parte do desenvolvimento pode ser visto na tabela 6. Nela, a relação entre as bases de dados estão marcadas por um “X” que representa o elo existente entre as bases. Por exemplo, na coluna de resultados, pode-se ver que o modelo de referência da integração entre o gerenciamento do ciclo de vida e gêmeo digital foi construído, a partir dos fundamentos do gerenciamento do ciclo de vida, do gêmeo digital, da integração entre o gerenciamento do ciclo de vida e o gêmeo digital, dos requerimentos, das dimensões e funcionalidades do gêmeo digital.

Os campos da tabela em cinza são aqueles não poderiam ser considerados na correlação entre os temas devido não resultar em algo que poderia agregar ao trabalho ou devido a ordem de construção do trabalho, exemplo: os fundamentos do gerenciamento do ciclo de vida (coluna) não poderiam agregar o assunto fundamento do gerenciamento do ciclo de vida (linha) pois são o mesmo assunto ou os fundamentos do gerenciamento do ciclo de vida (coluna) não agregam o assunto fundamentos do gêmeo digital, pois são fundamentos de temas diferentes.

Os campos da tabela sem cor e sem o X, são aqueles que não foram correlacionados no trabalho, exemplo: o modelo de referência integrado de processo e sistemas gerenciamento do ciclo de vida (coluna) somente tem como base os fundamentos do gerenciamento do ciclo de

vida (linha), porém os fundamentos da integração entre o gerenciamento do ciclo de vida e gêmeo digital (coluna) tem como base os fundamentos do gerenciamento do ciclo de vida (linha) e os fundamentos do gêmeo digital (linha).

Tabela 6 – Estrutura do modelo conceitual

| <b>Elementos do modelo</b>  | Revisão de literatura                         |                              |  | Modelo de referência integrado de processo e sistemas PLM | Resultados  |  |
|---|---|------------------------------|--|---|---|--|
|   | Fundamentos do gerenciamento do ciclo de vida | Fundamentos do gêmeo digital | Fundamentos da integração entre o gerenciamento do ciclo de vida e gêmeo digital |   | Modelo de referência da integração entre o gerenciamento do ciclo de vida e gêmeo digital | Benefícios do modelo de referência da integração |
| Fundamentos do gerenciamento do ciclo de vida   |   |                              | X  | X   | X   | X  |
| Fundamentos do gêmeo digital  |   |                              | X  |   | X   | X  |
| Fundamentos da integração entre o gerenciamento do ciclo de vida e gêmeo digital          |   |                              |  |   | X   | X  |
| Requerimentos do gêmeo digital  |   |                              |  |   | X   | X  |
| Dimensões do gêmeo digital  |   |                              |  |   | X   | X  |
| Funcionalidades do gêmeo digital  |   |                              |  |   | X   | X  |
| Modelo de referência da integração entre o gerenciamento do ciclo de vida e gêmeo digital |   |                              |  |   |   | X  |

Fonte: Elaboração própria da autora.

É importante lembrar que a necessidade da inclusão das atividades e procedimentos tem como objetivo adequar o modelo para o gêmeo digital, como também no ciclo de vida do produto físico.

### 4.3.2 Os requerimentos e as dimensões.

A partir do descrito na seção 4.3.1, percebe-se a necessidade de entender as funcionalidades do gêmeo digital para criação das atividades, pertencentes ao processo do gêmeo digital. Com isso, a conexão entre as atividades do processo do gêmeo digital e as dimensões deve ser estabelecida, por meio de um estudo consolidado, capaz de descrever as características do gêmeo digital. Optou-se, portanto, pelo estudo das dimensões do gêmeo digital de Stark, Fresemann e Lindow (2019).

Como já mencionado, o mapeamento das funcionalidades, foram considerados dois novos modelos: o proposto por Stark, Fresemann e Lindow (2019) que explica as 8 dimensões do gêmeo digital e o proposto por Durão *et al.* (2018) que apresenta os requisitos do gêmeo digital.

Os requisitos do gêmeo digital (DURÃO *et al.*, 2018) foram utilizados, com o objetivo de se alcançar a correlação entre o necessário para a criação de um gêmeo digital, o que resultou na integração dos dois conceitos (dimensões e requisitos), em que as funcionalidades do gêmeo digital deveriam ser relacionadas. Assim, com base nesses autores, o modelo das funcionalidades do gêmeo digital, com requisitos e as dimensões relacionados do gêmeo digital, foi construído.

Esse modelo foi pensado para responder a seguinte pergunta: “quais requerimentos pertencem à cada dimensão do gêmeo digital?” (tabela 7). É importante ressaltar que alguns requerimentos podem pertencer à mais de uma dimensão, como, por exemplo, o requerimento “eficiência” que pertence às 8 dimensões.

Tabela 7 – Relacionamento entre os requerimentos e as dimensões do gêmeo digital

(Continua)

| Requerimentos do gêmeo digital      | 8 dimensões                    |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| Real data                           | Atualização da frequência      |
| Convergência                        | Inteligência CPS               |
| Autonomia<br>Atualização automática | Inteligência CPS               |
| Operação estável                    | Inteligência CPS               |
| Fidelidade                          | Comportamento do gêmeo digital |
| Interação                           | Comportamento do gêmeo digital |

(Continuação)

| Requerimentos do gêmeo digital | 8 dimensões  |
|--------------------------------|--|
| Aquisição de dados             | Comportamento do gêmeo digital   |
| Qualidade de dados             | Comportamento do gêmeo digital   |
| Dados de segurança             | Comportamento do gêmeo digital   |
| Dados de armazenamento         | Comportamento do gêmeo digital   |
| Dados estáveis aquisição       | Comportamento do gêmeo digital   |
| Escalabilidade                 | Comportamento do gêmeo digital   |
| Captura de dados               | Amplitude de integração  |
| Interoperabilidade             | Amplitude de integração  |
| Integração                     | Amplitude de integração  |
| Comunicação                    | Modos de conectividade   |
| Conectividade                  | Modos de conectividade<br>Interação Humana   |
| Eficiência                     | Capacidade de simulação<br>Interação Humana<br>Modos de conectividade<br>Comportamento do gêmeo digital<br>Inteligência CPS<br>Atualização da frequência |
| Expansibilidade                | Capacidade de simulação  |
| Modularidade                   | Capacidade de simulação  |
| Eficiência                     | Capacidade de simulação  |
| Convergência                   | Capacidade de simulação  |

Fonte: Elaboração própria.

A tabela 7 foi relacionada com o mapeamento das funcionalidades, apresentado na seção 4.4. Com base em todos os elos e conexões, descritos neste capítulo 4, criou-se o modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital e o modelo das funcionalidades do gêmeo digital (capítulos 5 e seção 4.4).

#### 4.4 MAPEAMENTO DAS FUNCIONALIDADES DO GÊMEO DIGITAL

O modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital é uma forma de completar o modelo de referência integrado de processo e sistemas PLM, para quando o processo do produto for idealizado, em paralelo ao gêmeo digital do produto. Porém, mesmo com as atividades do gerenciamento do ciclo de vida e os processos do gêmeo digital, o modelo ainda necessitava

das funcionalidades do gêmeo digital. Portanto, a pesquisa visa também mapear as funcionalidades do gêmeo digital e integrar ao relacionamento descrito no item 4.3.1.

O intuito do mapeamento é torná-lo base para o modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital, através da revisão de literatura, agregando artigos da base da pesquisa que descrevem, separadamente, as funcionalidades do gêmeo digital para cada aplicação. Essas funcionalidades foram mapeadas, padronizadas e estruturadas (apêndice C). Após seu mapeamento, as funcionalidades foram associadas com as dimensões do gêmeo digital, conforme a tabela 9, e agrupadas por processo, a fim de se obter uma visão macro da relação entre os processos e as dimensões (tabela 8).

É importante ressaltar que o único processo que não tem todas as dimensões é o de reciclagem, uma vez que a atualização da sua frequência dos dados é descontinuada com o produto, ou seja, os dados existentes estão em um banco de dados, porém eles não são atualizados, em tempo real, e, por conta disso, a dimensão não é contemplada pelo processo.

Outro ponto importante é que somente uma dimensão participa de todas as atividades do modelo aqui proposto: o ciclo de vida do produto, representando, mais uma vez, a importância do gerenciamento do ciclo de vida para o gêmeo digital. As dimensões, por atividade, podem ser visualizadas no apêndice D, enquanto as dimensões por processo podem ser observadas na tabela 8.

Tabela 8 – Dimensões do gêmeo digital por processo do modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital

| Processo                                 | Dimensão                       |
|--|--------------------------------|
| <b>Criação<br/>Operação<br/>Produção</b> | Inteligência CPS               |
|  | Modos de conectividade         |
|  | Atualização da frequência      |
|  | Comportamento do gêmeo digital |
|  | Amplitude de integração        |
|  | Ciclo de vida do produto       |
|  | Capacidade de simulação        |
|  | Interação humana               |
| <b>Reciclagem</b>                        | Inteligência CPS               |
|  | Modos de conectividade         |
|  | Comportamento do gêmeo digital |
|  | Amplitude de integração        |
|  | Ciclo de vida do produto       |
|  | Capacidade de simulação        |
| Interação humana                         |                                |

Fonte: Elaboração própria.

A partir da relação entre as dimensões do gêmeo digital e o processo, as dimensões foram associadas com os requerimentos do gêmeo digital, conforme o item 4.3.2. o que possibilitou, em conjunto com a revisão da literatura, a sistematização das funcionalidades do gêmeo digital. A tabela 9 apresenta a lista das funcionalidades do gêmeo digital.

Tabela 9 – Relação das funcionalidades do gêmeo digital por requerimento e dimensão

(Continua)

| Requerimentos do gêmeo digital              | 8 dimensões                    | Funcionalidade  |
|---|--------------------------------|---|
| <b>Real data</b>                            | Atualização da frequência      | Utilizar dados em tempo real.   |
| <b>Real data</b>                            | Atualização da frequência      | Utilizar dados em tempo próximo do real.  |
| <b>Convergência</b>                         | Inteligência CPS               | Convergir os dados de <i>input</i> .  |
| <b>Autonomia<br/>Atualização automática</b> | Inteligência CPS               | Configurar os algoritmos do gêmeo digital;<br>Configurar as funções que retroalimentam o gêmeo digital;<br>Configurar as funções que retroalimentam o processo;<br>Configurar as funções que retroalimentam o produto físico. |
| <b>Operação estável</b>                     | Inteligência CPS               | Construir do modelo digital.  |
| <b>Fidelidade</b>                           | Comportamento do gêmeo digital | Configurar o <i>design</i> do gêmeo digital.  |
| <b>Interação</b>                            | Comportamento do gêmeo digital | Configurar a plataforma do gêmeo digital.   |
| <b>Aquisição de dados</b>                   | Comportamento do gêmeo digital | Integrar os dados de <i>input</i> .   |
| <b>Captura de dados</b>                     | Amplitude de integração        | Integrar os dados de <i>input</i> .   |
| <b>Qualidade de dados</b>                   | Comportamento do gêmeo digital | Configurar a arquitetura do gêmeo digital.  |
| <b>Dados de segurança</b>                   | Comportamento do gêmeo digital | Configurar a coleta de dados.   |
| <b>Dados de armazenamento</b>               | Comportamento do gêmeo digital | Configurar o armazenamento dos dados.   |
| <b>Dados estáveis aquisição</b>             | Comportamento do gêmeo digital | Configurar os parâmetros a serem medidos.   |
| <b>Escalabilidade</b>                       | Comportamento do gêmeo digital | Configurar o modelo de tomada de decisão.   |
| <b>Interoperabilidade</b>                   | Amplitude de integração        | Integrar o sistema do gêmeo digital com os outros sistemas satélites.   |
| <b>Integração</b>                           | Amplitude de integração        | Realizar as integrações entre o produto físico e o digital.   |
| <b>Integração</b>                           | Amplitude de integração        | Realizar as integrações entre dados de outros sistemas como <i>input</i> para o gêmeo digital.  |

(Continuação)

| Requerimentos do gêmeo digital | 8 dimensões                                | Funcionalidade   |
|--------------------------------|--|--|
| <b>Comunicação</b>             | Modos de conectividade                     | Configurar o processamento dos dados.  |
| <b>Conectividade</b>           | Modos de conectividade<br>Interação Humana | Configurar os sensores do gêmeo digital.   |
| <b>Eficiência</b>              | Capacidade de simulação                    | Configurar as simulações do gêmeo digital, das quais podem envolver inteligência artificial (IA) e <i>machine learning</i> (ML). |
| <b>Expansibilidade</b>         | Capacidade de simulação                    | Configurar as simulações, com os dados integrados, para geração de melhorias e de dados para retroalimentação do processo.       |
| <b>Modularidade</b>            | Capacidade de simulação                    | Configurar as simulações, para gerar modularidade no processo.   |
| <b>Eficiência</b>              | Capacidade de simulação                    | Configurar as simulações de teste.   |
| <b>Eficiência</b>              | Capacidade de simulação                    | Configurar as simulações, para análise de falhas.  |
| <b>Eficiência</b>              | Interação Humana                           | Configurar o uso de inteligência artificial, para o processamento de dados.  |
| <b>Convergência</b>            | Capacidade de simulação                    | Convergir os dados de <i>output</i> .  |

Fonte: Elaboração própria.

A tabela 9 apresenta a relação entre as 8 dimensões e os vinte e um requerimentos do gêmeo digital, resultando em trinta funcionalidades do gêmeo digital. As funcionalidades são o benefício do gêmeo digital, uma vez que é por meio delas que se torna possível a aplicabilidade do gêmeo digital no ciclo de vida do gêmeo digital e do produto.

## 5 MODELO DE REFERÊNCIA DO CICLO DE VIDA DO GÊMEO DIGITAL

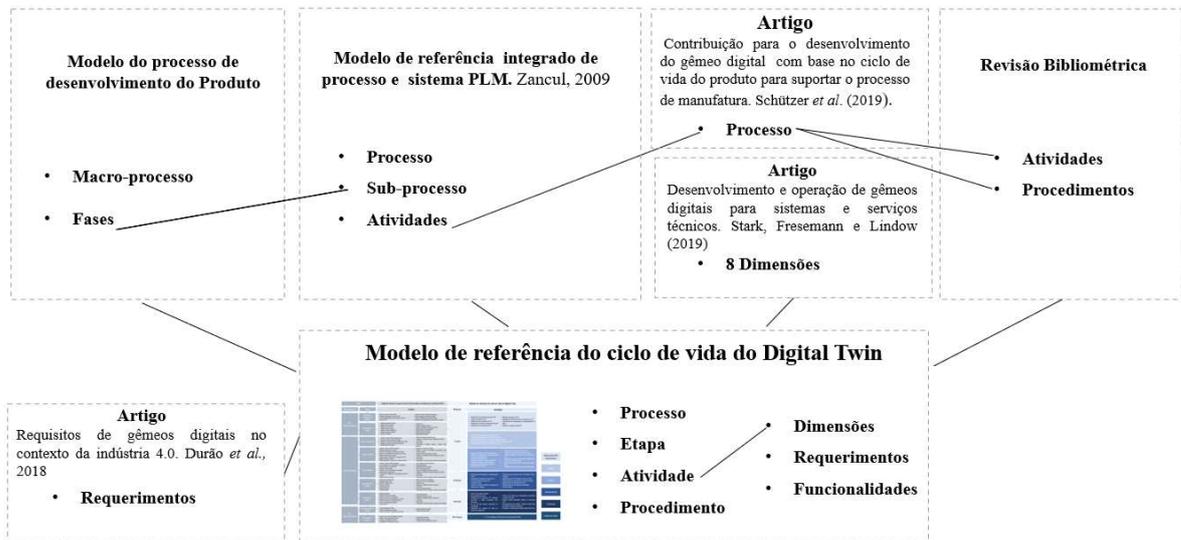
O modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital, resultado desta pesquisa, tem como principal objetivo representar um conceito descritivo, capaz de unificar e formalizar as práticas do desenvolvimento de modelos de gêmeos digitais, além de contemplar todas as etapas do ciclo de vida. Para tanto, esse modelo precisa responder as seguintes perguntas: “Como o gêmeo digital contribui para o gerenciamento do ciclo de vida do produto (PLM)?”, “Como o processo de implementação do gêmeo digital pode ser integrado ao modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital?”.

Há um volume significativo de contribuições das aplicações do gêmeo digital, tendo em vista que ele pode ajudar a responder questões rotineiras da área manufatureira, tais como: “O que acontecerá com a linha de produção, quando um certo parâmetro for alterado? Quais dados devem ser extraídos?” (VACHALEK *et al.*, 2017). Em outras palavras, pode-se dizer que o modelo de referência também permitirá a geração de uma base processual e de dados, para ser *input* e/ou *output* de dados, gerados para o desenvolvimento e melhoria do ciclo de vida do produto, do processo e do próprio gêmeo digital, auxiliando, assim a responder as perguntas acima citadas.

O modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital considera o gêmeo digital como um produto a ser agregado dentro de uma cadeia processual de desenvolvimento do produto, ou seja, considerando que um processo de desenvolvimento de produto já desenvolve um produto físico, o processo somente agregará a criação de um produto digital, o gêmeo digital. No entanto, faz-se necessário incluir algumas atividades e procedimentos para que o gêmeo digital possa ser idealizado, desenvolvido, gerado e descontinuado. Para tanto, foi criado o modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital (apêndice E).

O modelo de referência desenvolvido neste trabalho tem como base os modelos de relacionamento entre os temas descritos anteriormente e o mapeamento das funcionalidades descritas no capítulo 4 que unem os conceitos consolidados dos modelos de referências, na área acadêmica, sobre o gerenciamento do ciclo de vida e novos conceitos e pesquisas realizadas para o gêmeo digital. Além disso, para melhor exemplificar os elos e as relações entre os conceitos base, é possível observar as linhas em preto na figura 31 que representa os elos entre os conceitos base:

Figura 31 - Elos entre as bases, o modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital e as funcionalidades do gêmeo digital



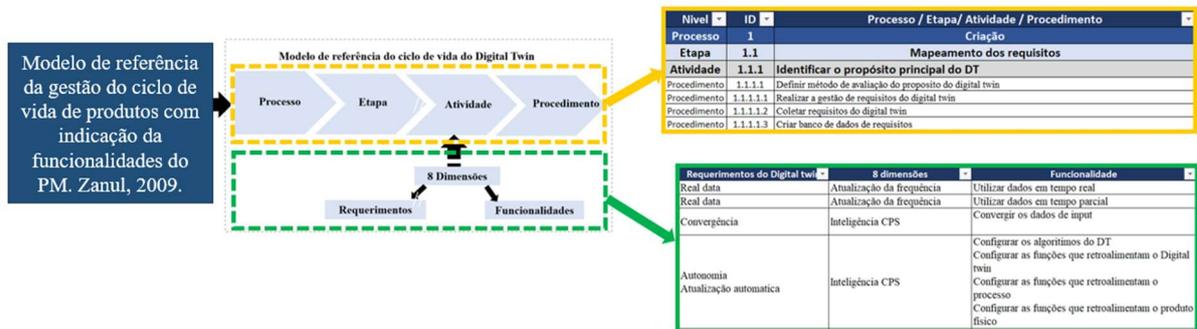
Fonte: Elaboração própria.

Os elos apresentados na figura 31 mostram desde a conexão entre os modelos, até a conclusão do modelo de referência, construído, após a revisão de literatura, a partir das seguintes fases:

- construção dos modelos do gerenciamento do ciclo de vida e do gêmeo digital (seções 4.1 e 4.2);
- construção das relações entre os modelos (seção 4.3);
- mapeamento das funcionalidades do gêmeo digital (seção 4.4);
- construção do modelo (capítulo 5).

Considerando que os itens a, b e c já estavam concluídos, iniciou-se, então, a construção do modelo com a integração dos conceitos apresentados ao longo do trabalho. Essas atividades do modelo deveriam estar conectadas com as dimensões do gêmeo digital para que fosse possível a conexão com a entrega do item b, referente aos subitens 4.3.1 e 4.3.2 que está conectado já ao item c e ao item a, conforme pode ser visualizado na figura 32 que evidencia, em verde, as relações já criadas e, em amarelo, as atividades definidas, com base no processo da seção 4.3.1.

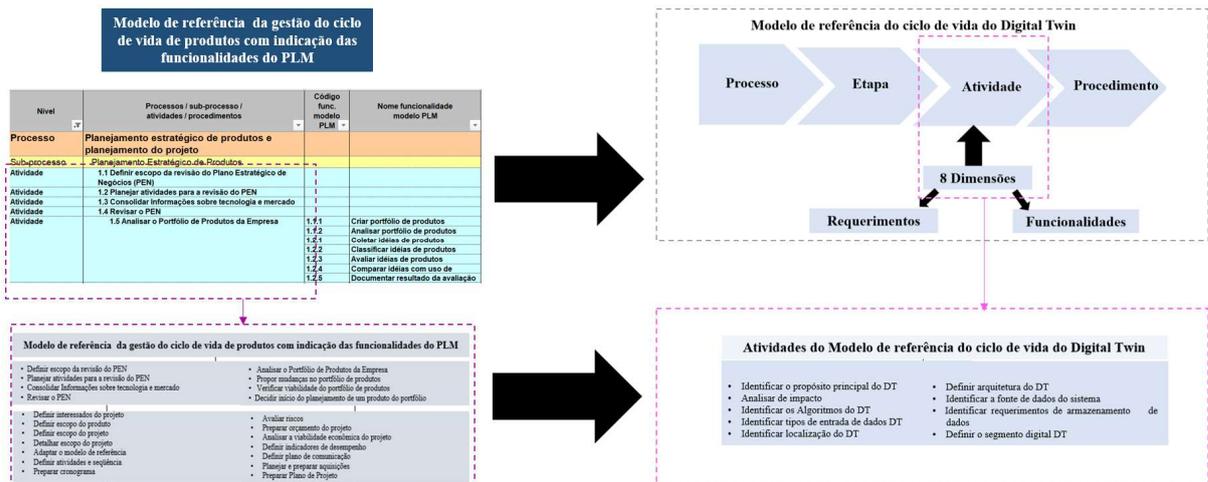
Figura 32 - Relações entre os requerimentos, funcionalidades e dimensões já criadas (em verde) e as atividades construídas, com base no processo do subitem 4.3.1 (em amarelo)



Fonte: Elaboração própria.

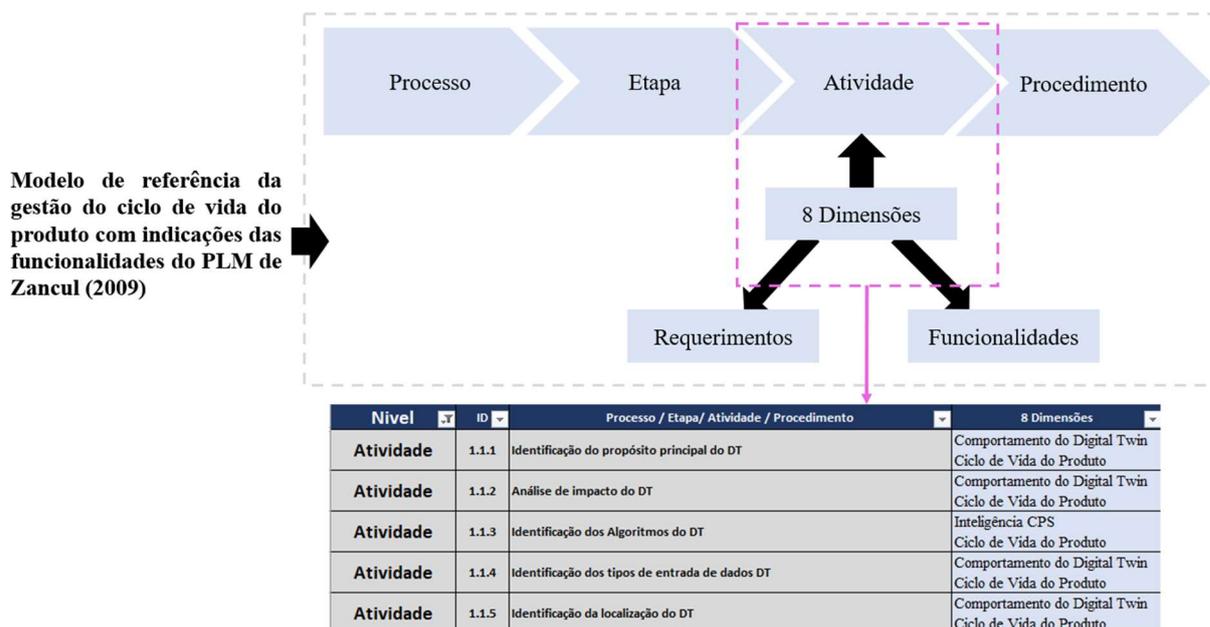
Após a definição das atividades do ciclo de vida do gêmeo digital, gerou-se uma relação entre as atividades do modelo de referência do ciclo de vida de produtos e a indicação das funcionalidades do PLM de Zancul (2009), para verificação da integração entre os dois modelos, conforme a figura 33. Dessa forma, as atividades também foram relacionadas com as dimesões e podem ser visualizadas no apêndice D e na figura 34.

Figura 33 - Relação entre as atividades do modelo de referência do ciclo de vida de produtos, a indicação das funcionalidades do gerenciamento do ciclo de vida de Zancul (2009) e as atividades do modelo de referência do gêmeo digital



Fonte: Elaboração própria.

Figura 34 - Exemplificação das atividades criadas para o modelo de referência do gêmeo digital, relacionadas com as dimensões do gêmeo digital



Fonte: Elaboração própria.

Uma vez que a etapa de criação das atividades estava concluída, foram, então, construídos os procedimentos necessários para a realização das atividades. Esse procedimento teve como base o subitem 4.3.1, conforme apresentado no apêndice E. Após a conclusão do mapeamento dos procedimentos por atividade, foram criadas as etapas por processo para cada atividade, resultando em seis etapas: mapeamento dos requisitos, *design*, análise, implementação, verificação e *output* de dados. Essas etapas fazem parte dos processos do modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital.

O modelo foi estruturado da seguinte forma:

- a) **processo:** os processos foram elaborados com o objetivo de agregar as etapas de forma macro, gerando, assim, quatro subdivisões do processo do gêmeo digital que podem ser conectadas com os processos do modelo de referência integrado de processo e sistemas PLM de Zancul (2009);
- b) **etapa:** as etapas são as subdivisões do processo, com foco no refinamento, na especificação das divisões que formam os processos. Assim, há três etapas para o processo de criação: o mapeamento de requisitos, o *design* e a análise. Na etapa de produção, há também a etapa de implementação, no processo de operação, há a etapa de verificação e, por último, no processo de reciclagem, há a etapa de *output* de dados;

- c) **atividade:** as atividades do modelo são subdivisões de cada uma das seis etapas dos processos. Cada uma delas foi especificada com o objetivo de gerar os procedimentos a serem realizados, em paralelo às atividades do modelo de referência unificado, durante o ciclo de vida do produto e do gêmeo digital;
- d) **procedimento:** as atividades do modelo construído são divididas em procedimentos, modos de execução necessários para a realização de cada uma das atividades, complementando, assim, a construção do modelo realizado na presente pesquisa.

Figura 35 - Estrutura do modelo de referência do ciclo de vida do produto

| Tipo         | ID        | Processo/Etapa/Atividade/Procedimento                     |
|--------------|-----------|---|
| Processo     | 1         | Criação   |
| Etapa        | 1.1       | Mapeamento dos requisitos                                 |
| Atividade    | 1.1.1     | Identificar o propósito principal do DT                   |
|              | 1.1.1.1   | Definir método de avaliação do propósito do gêmeo digital |
|              | 1.1.1.1.1 | Realizar a gestão de requisitos do gêmeo digital          |
|              | 1.1.1.1.2 | Coletar requisitos do gêmeo digital                       |
|              | 1.1.1.1.3 | Criar banco de dados de requisitos                        |
|              | 1.1.1.1.4 | Coletar requisitos no banco de dados                      |
|              | 1.1.1.1.5 | Classificar os requisitos                                 |
| Procedimento |           |   |

Fonte: Elaboração própria.

A estrutura do modelo completo pode ser visualizada no apêndice E e é constituída pela descrição do tipo de divisão e subdivisão (processo, etapa, atividade ou procedimento) e o ID que determina a relação de sequencialidade entre os tipos. A estrutura do modelo construído é apresentada na figura 35.

Figura 36 - Relação entre os processos, as etapas e as atividades do modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital

| Modelo de referência do ciclo de vida do Digital Twin |  |  |
|---|--|--|
| Processo  | Atividade  |  |
| Criação   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Identificar o propósito principal do DT</li> <li>Analisar de impacto</li> <li>Identificar os Algoritmos do DT</li> <li>Identificar tipos de entrada de dados DT</li> <li>Identificar localização do DT</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Definir arquitetura do DT</li> <li>Identificar a fonte de dados do sistema</li> <li>Identificar requerimentos de armazenamento de dados</li> <li>Definir o segmento digital DT</li> </ul>   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Realizar benchmark para inspiração externa voltados para o DT</li> <li>Definir as ferramentas de design para o DT</li> <li>Definir as ferramentas de simulações para o DT</li> <li>Mapear os elementos de dados para sensores do DT</li> <li>Integrar os modelos DT diferentes (Caso exista)</li> </ul>   |  |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Integrar os requisitos de DT ao design físico</li> <li>Definir as ferramentas de inteligência artificial (IA) e machine learning (ML)</li> <li>Definir a plataforma do DT</li> <li>Definir o modelo de tomada de decisão DT</li> <li>Definir os parâmetros a serem medidos</li> <li>Preparar os dados de output e input do DT</li> <li>Preparar o modelo do DT</li> <li>Implementar a plataforma do Digital twin</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Analisar automaticamente os dados do sistema (exemplo: temperatura, umidade, velocidade da broca, tipo de broca e etc)</li> <li>Realizar as simulações para prevenção de falhas do DT</li> <li>Testar o DT com dados de teste</li> <li>Desenvolver os modelos de software para o gêmeo digital</li> <li>Integrar o DT com apoio das comunidades logísticas</li> </ul> |
| Produção  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Realizar a prototipagem &amp; Implementação do DT</li> <li>Coletar os dados do teste do DT</li> <li>Realizar a validação de dados do DT</li> <li>Construir o DT</li> <li>Analisar os códigos de falha da integração do sistema físico e digital</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Utilizar quase em tempo real do DT durante o teste e validação</li> <li>Implementar o DT Integrado com Ativo Físico</li> <li>Implementar as ferramentas de desenvolvimento</li> <li>Implementar as ferramentas de teste</li> <li>Implementar as Ferramentas de simulação</li> <li>Coletar os dados</li> </ul>   |
| Operação  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Estocar os dados</li> <li>Processar os dados</li> <li>Modificar os algoritmos DT conforme necessário e treinar novamente caso necessário</li> <li>Usar o DT para suportar verificações de desempenho</li> <li>Construir os conjuntos de dados de modelos do sistema DT</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Analisar o DT voltada para confiabilidade, manutenção e tomada de decisão</li> <li>Selecionar e avaliar a qualidade, o tempo e os custos para o DT</li> <li>Retroalimentar os insights + inputs do usuário (tipo de material, operador, ferramenta)</li> <li>Atualizar o modelo gêmeo digital usando dados reais</li> </ul>   |
| Reciclagem  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Usar a inteligência artificial para o processamento de dados</li> </ul>   |  |

**Etapas**

- Mapeamento dos requisitos
- Design
- Análise
- Implementação
- Verificação
- Output dos dados

Fonte: Elaboração própria.

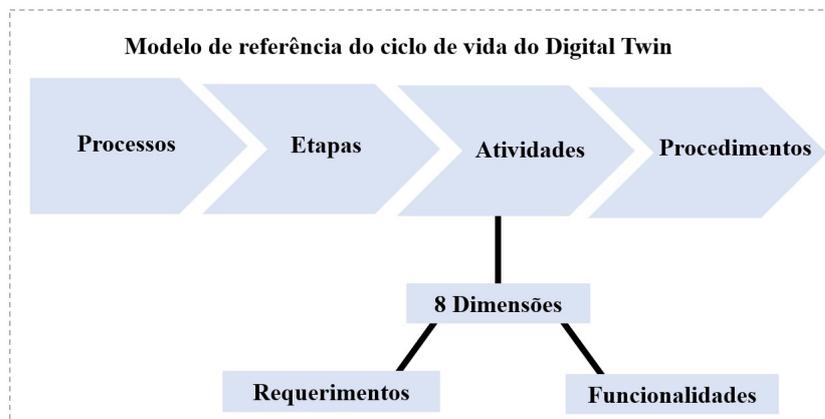
Conforme observado na figura 36, o primeiro processo do modelo do ciclo de vida é a criação do gêmeo digital, composto por três etapas: 1) o mapeamento de requisitos, com o objetivo de realizar a identificação da arquitetura, do propósito e dos fundamentos básicos da criação do gêmeo digital, baseado no produto físico; 2) *design*, composta pela definição gráfica do gêmeo digital e pelas simulações que serão realizadas. Nessa etapa, também é feito um mapeamento visual das integrações entre os diferentes sistemas, caso necessário; e 3) análise, etapa em que a criação do gêmeo digital, de fato, acontece, uma vez que é nesse momento em que se inicia a análise dos dados, por meio do protótipo inicial.

O segundo processo – produção – é composto pela etapa de implementação, quando ocorrem a validação dos dados da análise, obtidos por meio do protótipo, e a construção física e digital do gêmeo digital. Já o terceiro processo – operação – é composto pela etapa de

verificação, em que a sincronização dos dados e os comportamentos gerados nos processos anteriores são verificados, em relação às especificações do projeto e requisitos. Os comportamentos desviados devem ser capazes de ser retificados, conforme definido na etapa de mapeamento dos requisitos. Assim, durante essa etapa já é possível observar melhorias tanto no gêmeo digital, quanto no produto físico, com base nos dados, gerados pelo gêmeo digital, que reatualizam o sistema. Além disso, esse processo deve ser capaz de realizar a validação da etapa de implementação do gêmeo digital que já está em operação.

O processo de reciclagem, por sua vez, é composto pela etapa de *output* dos dados. Até o final desse processo, o gêmeo digital não será mais utilizado, uma vez que parte da premissa de que o gêmeo digital é único por produto físico e o produto físico será reciclado. Porém, os dados coletados, durante todo o ciclo de vida, serão armazenados e utilizados, com base no uso de inteligência artificial para que o processamento de dados possa gerar melhorias em outros produtos físicos e em outros gêmeos digitais. A relação entre os processos, etapas e atividades é apresentada na figura 37.

Figura 37 - Modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital



Fonte: Elaboração própria da autora.

Essa figura representa o modelo de forma visual, apresentando a sequência entre os processos, etapas, atividades e procedimentos. Além disso, mostra que as 8 dimensões estão associadas com as atividades, formando a base para o mapeamento dos requerimentos e funcionalidades. O modelo de referência completo proposto pelo trabalho é apresentado no apêndice E.

## 6 CONCLUSÕES

Este capítulo tem como objetivo apresentar as principais conclusões e contribuições da realização do presente trabalho para a literatura, com base na análise dos resultados obtidos nos capítulos 4 e 5 e nas discussões teóricas apresentadas nos capítulos anteriores.

### 6.1 CONTRIBUIÇÕES PARA A LITERATURA

A pergunta que motivou a presente pesquisa é: “Como o gêmeo digital contribui no gerenciamento do ciclo de vida do produto (PLM)?”. Essa pergunta foi responsável pela investigação aqui promovida que conduziu aos resultados apresentados no capítulo 5, incluindo considerações adicionais que se mostraram pertinentes, a partir de pesquisas investigadas e descritas na revisão de literatura. Assim, as contribuições podem ser vistas nos subitens 6.1.1, 6.1.2 e 6.1.3.

#### 6.1.1 Integração entre o gerenciamento do ciclo de vida e o gêmeo digital

A primeira contribuição da pesquisa se alinha à perspectiva identificada na revisão de literatura, tendo em vista que foi possível criar um modelo de referência que integra os dois temas principais da pesquisa – gerenciamento do ciclo de vida e gêmeo digital –, estabelecendo, assim, a sinergia e integração entre o gêmeo digital e o produto, em todas as etapas do ciclo de vida. O modelo de referência resultante deste trabalho ressalta e confirma a existência de *inputs* em todas as etapas do ciclo de vida que integram, conectam e interagem com cada parte do ciclo de vida do gêmeo digital. Esses *inputs* auxiliam na otimização do ciclo de vida do produto, pois garantem mais rastreabilidade e previsibilidade aos processos. Portanto, com a integração dos temas, também foram constatados os *outputs* que retroalimentam todo o sistema, gerando evoluções e melhorias, por meio de simulações e otimizações com os dados extraídos de todas as etapas.

É importante observar que, na etapa de reciclagem, o gêmeo digital perdeu o vínculo ativo com o produto, já que o gêmeo digital é único, ou seja, mesmo que o produto seja reconstruído (parte da composição do produto seja reaproveitada para a construção de um novo

produto físico e o os *outputs* do gêmeo digital sejam reaproveitados para realização de melhorias para a construção do novo produto), o vínculo da etapa do produto físico deixa de existir. No entanto, o gêmeo digital continua existindo como armazenador dos dados históricos, obtidos durante todas as etapas do ciclo de vida, mesmo nessa última etapa de reciclagem ou durante o próprio descarte do produto.

### 6.1.2 Modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital

Atualmente, não há um modelo de referência para o produto que tem gêmeo digital, mesmo com a existência de outros modelos de referência de ciclo de vida para produto (como aqueles com indicação das funcionalidades do gerenciamento do ciclo de vida). Assim, a segunda contribuição do presente trabalho para a literatura da pesquisa é a construção modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital.

É possível observar, na literatura, uma necessidade de atividades, voltadas para o gêmeo digital, que precisam ser realizadas, durante todas as etapas do ciclo de vida do produto. Portanto, o modelo aqui construído consegue suprir essa necessidade de integração dos temas, complementando todas as atividades que ocorrem em paralelo, com as atividades realizadas para o produto e que devem ser realizadas ao longo do ciclo de vida.

O modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital também tem como objetivo ser um modelo conceitual descritivo que unifica e formaliza as práticas da criação de modelos de gêmeos digitais. Para tanto, esse modelo de referência é capaz de prover respostas às seguintes perguntas: “Como o gêmeo digital contribui para o gerenciamento do ciclo de vida do produto (PLM)?”, “Como o processo de implementação do gêmeo digital pode ser integrado ao um modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital?”.

Esse modelo também beneficia a literatura, a medida em que registra e estrutura as melhores práticas da aplicação da integração entre os dois conceitos (gerenciamento do ciclo de vida e gêmeo digital), além de apoiar o aprendizado do gerenciamento do ciclo de vida e do gêmeo digital e servir como referência para *benchmarking* para futuros modelos de referência sobre o tema.

### 6.1.3 Mapeamento das funcionalidades do gêmeo digital

A terceira contribuição para a literatura da pesquisa é o mapeamento das funcionalidades do gêmeo digital, uma vez que a compreensão sobre o tema é sistêmica e complementa outros estudos processuais, complementando o conhecimento da academia sobre as possibilidades de aplicação do gêmeo digital no desenvolvimento do produto.

## 6.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Para uma melhor avaliação da pesquisa, faz-se necessário atentar-se para as seguintes limitações:

O tema “gêmeo digital” não está, completamente, consolidado e a sua integração com o ciclo de vida do produto é, ainda, recente. Além disso, a amostra, resultante da revisão de literatura, é composta por artigos já existentes e não sobre a totalidade de conhecimento científico sobre o tema.

Por ser um assunto, ainda em ascensão, tanto no meio acadêmico quanto no meio industrial, ainda não existem normas, regulamentos ou melhores práticas de implementação. Portanto, a implementação baseou-se no conhecimento teórico e de estudos de casos já existentes na literatura.

## 6.3 OPORTUNIDADES DE ESTUDOS FUTUROS

Outros desafios enfrentados pelo gêmeo digital, no gerenciamento do ciclo de vida do produto, são apresentados a seguir, com base na revisão de literatura, em que a alínea j) k) i) é resultante da presente pesquisa:

- a) faltam métodos e normas na área (TAO; QI, 2019), o que pode limitar a implementação do gêmeo digital em indústrias regulamentadas, já que não há restrições regulatória. Por isso, será necessário existir um ambiente de desenvolvimento e projeto, onde dados, para fins de aprovação, sejam gerados (ZOBEL-ROOs *et al.*, 2019);

- b) devido à falta de normalização para algumas áreas, além de aspectos conceituais, há limitações éticas, principalmente, quando o gêmeo digital é aplicado na área de saúde (BRUYNSEELS; DE SIO; VAN DEN HOVEN, 2018);
- c) há a necessidade de desenvolver modelos de descrição de evento unificados para fusão de dados de múltiplas fontes de equipamentos heterogêneos em áreas distintas (LENG *et al.* 2019a);
- d) ainda há uma lacuna nos algoritmos de otimização existentes, em relação à adaptação dos requisitos de ajuste dinâmico, altamente frequentes no paradigma digital baseado em gêmeo digital (LENG *et al.*, 2019a);
- e) há necessidade de melhoria nas limitações na coleta, processamento e armazenamento dos dados (DING *et al.*, 2019);
- f) considerando que a exatidão e a resolução dos sensores influenciam, diretamente, a detecção de dados dos modelos de controle, faz-se necessário a melhoria no *software* e no *hardware* para gerenciamento de dados, análise e tomada de decisões, por meio de algoritmos inteligentes e da integração dos diferentes componentes da construção do gêmeo digital (MUKHERJEE; DEBROY, 2019);
- g) se faz necessária a criação de uma metodologia, em que os modelos possam ser desenvolvidos em nível de componente e, então, combinados em simulações no nível de sistema, para, somente depois, serem usados em várias aplicações. Por mais que muitas ferramentas e interfaces disponíveis sejam capazes de resolver vários problemas, o processo de simular sistemas, em sua totalidade, ainda se faz complexo (SCHLUSE *et al.*, 2018);
- h) para garantir a funcionalidade entre empresas do gêmeo digital, é necessária uma representação padronizada de produto, interpretável por computador e não proprietária. Portanto, uma ênfase de pesquisa futura, em relação aos gêmeos digitais baseados em

STEP, é indicada, para permitir a integração vertical e horizontal do ciclo de vida em ambientes da Indústria 4.0. (ANDERL *et al.*, 2018);

- i) na prática, a fidelidade e a exatidão dos modelos de simulação são ainda difíceis de serem alcançados (CAI *et al.*, 2017) e, algumas vezes, chegam a ser menos que satisfatórios. Por isso, modelos de simulação devem ser desenvolvidos para melhorar os resultados da simulação, não apenas em aspectos de fidelidade e exatidão, mas também em aspectos de complexidade e eficiência (DING *et al.*, 2019);
- j) a aplicação prática do modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital, conforme apresentado neste trabalho;
- k) a aplicação das funcionalidades do gêmeo digital e a conexão com as dimensões e os requerimentos dele, conforme apresentado neste trabalho;
- l) medição do desempenho do modelo de referência do ciclo de vida do gêmeo digital resultante deste trabalho, com o objetivo de verificar a eficácia e o ganho da aplicação dentro do ciclo de vida do produto físico.

## REFERÊNCIAS

- ABID, H. *et al.* SysML approach for the integration of a mechatronics system within PLM systems. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 28(9), 972-998, 2014.
- 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**, v. 65, n. 1, p. 185–188, 2016.
- AL-ASHAAB, A. *et al.* Knowledge-based environment to support product design validation. **Knowledge-based Systems**, 26, 48-60, 2012.
- ALAM, K. M.; EL SADDIK, A. C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. **IEEE Access**, v. 5, p. 2050–2062, 2017.
- ALEMANNI, M.; DESTEFANIS, F.; VEZZETTI, E. Model-based definition design in the product lifecycle management scenario. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 52(1-4), 1-14, 2010.
- ALEMANNI, M. *et al.* Performance indicators for PLM benefits evaluation: the Alcatel Alenia Space case study. **Computers in Industry**, 59(8), 833-841, 2008.
- ALISON, W. Controlling the lifecycle. **Drapers**, 26-27, 2010.
- ALLANIC M. *et al.* Towards enhancement of relationships browsing in mature PLM systems. **Ifip Advances in Information and Communication Technology**, 422(1), 345-354, 2014.
- ANDERL, R. *et al.* Digital twin technology – An approach for Industries 4.0 vertical and horizontal lifecycle integration. **IT - Information Technology**, vol. 60, no. 3, 2018, pp. 125-132. DOI 10.1515/itit-2017-0038.
- ANDERSON, A. From product first to better products. **Msi**, 20(10), 2A-8A, 2002.
- ANIŠIĆ, Z. *et al.* Improving product design with IPS-DFX methodology incorporated in PLM software. **Tehnicki Vjesnik**, 20(1), 183-193, 2013.
- AVVENTUROSO, G.; SILVESTRI, M.; PEDRAZZOLI, P. A networked production system to implement virtual enterprise and Product Lifecycle information loops. **Ifac-papersonline**, 50(1), 7964-7969, 2017.
- AZIZ, H. *et al.* Open standard, open source and peer-to-peer tools and methods for collaborative product development. **Computers in Industry**, 56(3), 260-271, 2005.
- BARTHOLOMEW, D. Manufacturers nibbling on PLM. **Industry Week**, 254(4), 63-64, 2005.
- BARTHOLOMEW, D. The juice flows again. **Industry Week**, 253(3), 31-34, 2004.

- BARTHORPE, S.; CHIEN, H. J.; JACK, K. C. S. A survey of the potential for enterprise resource planning (ERP) in improving the effectiveness of construction management in the UK construction industry. **International Journal of Computer Applications in Technology**, 20(1-3), 120-128, 2004.
- BAUGHEY, K. The future of automotive design & development: 3D for all. **Sae International Journal of Materials and Manufacturing**, 2(1), 258-264, 2009.
- BICKFORD, Jason *et al.* Operationalizing digital twins through model-based systems engineering methods. **Systems Engineering**. [S. l.]: Wiley, 12 Oct. 2020. DOI 10.1002/sys.21559.
- BOLTON, R. N. *et al.* Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms. **Journal of Service Management**, v. 29, n. 5, p. 776–808, 15 out. 2018.
- BONOU, A.; SKELTON, K.; OLSEN, S. I. Ecodesign framework for developing wind turbines. **Journal of Cleaner Production**, 126, 643-653, 2016.
- BORSATO, M. *et al.* An ontology building approach for knowledge sharing in product lifecycle management. **International Journal of Business and Systems Research**, 4(3), 278-292, 2010.
- BORSATO, M. Bridging the gap between product lifecycle management and sustainability in manufacturing through ontology building. **Computers in Industry**, 65(2), 258-269, 2014.
- BREZGIN, V. I. *et al.* Modern technologies for rendering information support to cogeneration steam turbine units in their design and operation stages. **Thermal Engineering**, 60(8), 573-579, 2013.
- BRIÈRE-CÔTÉ, A.; RIVEST, L.; DESROCHERS, A. Adaptive generic product structure modeling for design reuse in engineer-to-order products. **Computers in Industry**, 61(1), 53-65, 2010.
- BRINCHECK, B. End-to-end 3-D PLM puts 2-D in its proper place. **Design Engineering**, 51(6), 26-28, 2005.
- BRUNO, G. *et al.* Efficient management of product lifecycle information through a semantic platform. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 9(1), 45-64, 2016.
- BRUNSMANN, J. *et al.* State-of-the-art of long-term preservation in product lifecycle management. **International Journal on Digital Libraries**, 12(1), 27-39, 2012.
- BRUUN, H. P. L *et al.* PLM system support for modular product development. **Computers in Industry**, 67, 97-111, 2015.
- BRUYNSEELS, K.; DE SIO, F. S.; VAN DEN HOVEN, J. Digital Twins in health care: Ethical implications of an emerging engineering paradigm. **Frontiers in Genetics**, v. 9, n. FEB, 13 fev. 2018.

CÁCERES, M. S.; CASTILLO, R. A.; ROSÁRIO, J. M. Digital manufacturing - Integration and collaborative industrial automation approach. **International Review of Mechanical Engineering, Massachusetts**, 4(3), 336-345, 2010.

CAI, H.; XU, L.; XU, B. IoT-Based configurable information service platform for Product Lifecycle Management. **Ieee Transactions on Industrial Informatics**, 10(2), 1558-1567, 2014.

CAI, Y. *et al.* Sensor Data and Information Fusion to Construct Digital-twins Virtual Machine Tools for Cyber-physical Manufacturing. **Procedia Manufacturing**, v. 10, p. 1031–1042, 2017.

CAMARILLO, A.; RÍOS, J.; ALTHOFF, K. D. CBR and PLM applied to diagnosis and technical support during problem solving in the Continuous Improvement Process of manufacturing plants. **Procedia Manufacturing**, 13, 987-994, 2017.

CAMARILLO, A.; RÍOS, J.; ALTHOFF, K. Knowledge-based multi-agent system for manufacturing problem solving process in production plants. **Journal of Manufacturing Systems**, 47, 115-127, 2018.

CANTAMESSA, M.; MONTAGNA, F.; NEIROTTI, P. Understanding the organizational impact of PLM systems: Evidence from an aerospace company. **International Journal of Operations & Production Management**, 32(2), 191-215, 2012.

CAO, H. *et al.* RFID in product lifecycle management: a case in the automotive industry. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 22(7), 616-637, 2009.

CAO, H.; FOLAN, P. Product life cycle: the evolution of a paradigm and literature review from 1950–2009. **Production Planning & Control**, 23(8), 641-662, 2011.

CARO, E.; BOLARIN, F.; CHOCANO, J. Mejora del desarrollo de productos desde la perspectiva de gestión del conocimiento. **Dyna Ingenieria e Industria**, 86(3), 699-706, 2011.

CARVALHO, M. M.; FLEURY, A.; LOPES, A. P. An overview of the literature on technology roadmapping (TRM): Contributions and trends. **Technological Forecasting and Social Change**, 80(7), 1418-1437, 2013.

CASE, L. Solution built on UGS' teamcenter software drives dramatic cost savings for industries managing embedded software associated with electro-mechanical systems. **Automotive Industries Ai**, 186(4), 7, 2006.

CHEN, H. H. *et al.* Developing new products with knowledge management methods and process development management in a network. **Computers in Industry**, 59(2-3), 242-253, 2008.

CHENG, J. *et al.* DT-II: Digital twin enhanced Industrial Internet reference framework towards smart manufacturing. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 62, 1 abr. 2020.

CHIAPPINELLI, C. Lean + technology = lean2. **Managing Automation**, 23(12), 36-38, 2008.

CHUNGOORA, N. *et al.* A model-driven ontology approach for manufacturing system interoperability and knowledge sharing. **Computers in Industry**, 64(4), 392-40, 2013.

COLE, M. D. PLM for C2M. **Apparel**, 50(6), 31-33, 2009.

COURTNEY, M. Keeping track [Product lifecycle management software]. **Engineering & Technology**, 9(12), 64-66, 2014.

CRAWFORD, C. O PLM or not to PLM? That is the question. **Aatcc Review**, 6(9), 24-26, 2006.

CUI, J. *et al.* Customer requirement based on customer architecture hierarchy and BP in product lifecycle management system. **Journal of Zhejiang University**, 42(3), 528-533, 2008.

CUMMINGS, T. Get your data in order. **Control Engineering**, 53(10), 2006.

D'AVOLIO, E.; BANDINELLI, R.; RINALDI, R. A process-oriented framework for PLM implementation in fashion companies. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 109(3), 191-209, 2017.

DEBROY, T. *et al.* Building digital twins of 3D printing machines. **Scripta Materialia**, v. 135, p. 119–124, 1 jul. 2017.

DEMOLY, F.; MATSOKIS, A.; KIRITSIS, D. A mereotopological product relationship description approach for assembly oriented design. **Robotics and Computer-integrated Manufacturing**, 28(6), 681-693, 2012.

DEMOLY, F. *et al.* An assembly oriented design framework for product structure engineering and assembly sequence planning. **Robotics and Computer-integrated Manufacturing**, 27(1), 33-46, 2011a.

DEMOLY, F. *et al.* Geometric skeleton computation enabling concurrent product engineering and assembly sequence planning. **Computer-aided Design**, 43(12), 1654-1673, 2011b.

DEMOLY, F. *et al.* Multiple viewpoint modeling frameworks enabling integrated product–process design. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, 4(4), 269-280, 2010.

DEMOLY, F. *et al.* Product relationships management enabler for concurrent engineering and product lifecycle management. **Computers in Industry**, 64(7), 833-848, 2013.

DENKENA, B. *et al.* Knowledge management in process planning. **Cirp Annals**, 56(1), 175-180. Elsevier BV, 2007.

DIKICI, A.; TURETKEN, O.; DEMIRORS, O. Factors influencing the understandability of process models: A systematic literature review. **Information and Software Technology**, 93, 112-129, 2018.

DING, L. *et al.* Lightweight product lifecycle information management for small enterprises. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 5(1), 21-36, 2011.

DING, K. *et al.* Defining a Digital Twin-based Cyber-Physical Production System for autonomous manufacturing in smart shop floors. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 20, p. 6315–6334, 18 out. 2019.

DUCELLIER, G.; YVARS, P.; EYNARD, B. Managing design change order in a PLM platform using a CSP approach. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, 8(3), 151-158, 2014.

DURÃO, Luiz Fernando CS *et al.* Digital twin requirements in the context of industry 4.0. In: **Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0: 15th IFIP WG 5.1 International Conference, PLM 2018, Turin, Italy, July 2-4, 2018, Proceedings 15**. Springer International Publishing, 2018. p. 204-214.

DURÃO, L. *et al.* Middle of Life Digital Twin: Implementation at a Learning Factory. **Product Lifecycle Management Enabling Smart X**. [S. l.]: Springer International Publishing, 2020. DOI 10.1007/978-3-030-62807-9\_10.

EL SADDIK, A. Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies. **IEEE Multimedia**, v. 25, n. 2, p. 87–92, 1 abr. 2018.

EL SOURI, M. *et al.* A structured approach to defect data management for improving DFM implementation in aerospace manufacturing. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 10(4), 282-300, 2017.

ENDERS, M; HOBBACH, N. Dimensions of Digital Twin Applications - A Literature Review. **AMCIS 2019 Proceedings**, Cancún, 2019.

ESSOP, I. A. *et al.* Investigation into current industrial practices relating to product lifecycle management in a multi-national manufacturing company. **Computer-aided Design and Applications**, 13(5), 647-661, 2016.

EYNARD, B.; TROUSSIER, N.; CARRATT, B. PLM-based certification process in aeronautics extended enterprise. **International Journal of Manufacturing Technology and Management**, 19(3/4), 312-329, 2010. DOI 10.1504/ijmtm.2010.031376.

FALKIEWICZ, Ö. Electrical computer-aided engineering (E-CAE) software. Intech, **Research Triangle**, 58(3-4), 1-4, 2011.

FARISH, M. Joined-up planning [product lifecycle management]. **Engineering & Technology**, 3(21), 61-63, 2008.

FARISH, M.; Word on the street. **Engineering**, 253(2), 8-9, 2012.

FENG, Q. *et al.* Modeling method for product comprehensive design process and its realization. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, Cims, 16(4), 772-782, 2010.

FENG, Q. *et al.* Ontology-based multi-view modeling for integrated product development. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 15(4), 633-638, 2009.

- FORCINIO, H. Going green. **Managing Automation**, 22(4), 48-51, 2007.
- FORTINEAU, V. *et al.* A generic meta-model to support business rules and requirements engineering in a PLM system. **IFAC – Papers Online**, 50(1), 7272-7277, 2017.
- FORTINEAU, V.; PAVIOT, T.; LAMOURI, S. Improving the interoperability of industrial information systems with description logic-based models - The state of the art. **Computers in Industry**, 64(4), 363-375, 2013.
- FRÄMLING, K. *et al.* Agent-based model for managing composite product information. **Computers in Industry**, 57(1), 72-81, 2006.
- FRÄMLING, K. *et al.* Sustainable PLM through Intelligent Products. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 26(2), 789-799, 2013.
- FRÄMLING, K.; KUBLER, S.; BUDA, A. Universal messaging standards for the IoT from a lifecycle management perspective. **Ieee Internet of Things Journal**, 1(4), 319-327, 2014.
- GABOR, T. *et al.* **A simulation-based architecture for smart cyber-physical systems.** Proceedings - 2016 IEEE International Conference on Autonomic Computing, ICAC 2016. **Anais...**Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 21 set. 2016
- GARCIA, P. B.; FAN, I. S. Practitioner requirements for integrated knowledge-based engineering in Product Lifecycle Management. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 3(1), 3-20, 2008.
- GOLOVATCHEV, J. D.; BUDDE, O.; HONG, C. G. Integrated PLM-process-approach for the development and management of telecommunications products in a multi-lifecycle environment. **International Journal of Manufacturing Technology and Management**, 19(3/4), 224-237, 2010.
- GOMES, S. *et al.* Functional design and optimization of parametric CAD models in a knowledge-based PLM environment. **International Journal of Product Development**, 9(1/2/3), 60-77, 2009a.
- GOMES, S. *et al.* Content management based on multi-agent system for collaborative design. **International Journal of Product Development**, 8(2), 178-192, 2009b.
- GORT, A. Improving your product launch success. **Industry Week**, 254(4), 61-1, 2015.
- GRANROS, R. Regulatory compliance for food safety. **Control Engineering**, 56(10), 2009.
- GULLEDGE, T.; SIMON, G. Innovation and transformation using product lifecycle management enabled by NetWeaver. **International Journal of Innovation and Learning**, 6(1), 15-32, 2009.
- HACHANI, S.; GZARA, L.; VERJUS, H. A service-oriented approach for flexible process support within enterprises: application on PLM systems. **Enterprise Information Systems**, 7(1), 79-99, 2013.

HACHANI, S.; VERJUS, H.; GZARA, L. Support of product design processes flexibility in PLM systems using a service-based approach. **International Journal of Services Operations and Informatics**, 7(4), 313-329, 2012.

HE, Y.; GUO, J.; ZHENG, X. From Surveillance to Digital Twin: Challenges and Recent Advances of Signal Processing for Industrial Internet of Things. **IEEE Signal Processing Magazine**, v. 35, n. 5, p. 120–129, 1 set. 2018.

HINCAPIÉ, M. *et al.* Mixing real and virtual components in automated manufacturing systems using PLM tools. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, 209-230, 2014.

HOLZER, D. Fostering the link from PLM to ERP via BIM the aec industry in transition. **Ifip Advances in Information and Communication Technology**, 442, 75-82, 2014.

HUANG, G. Q.; WRIGHT, P. K.; NEWMAN, S. T. Wireless manufacturing: a literature review, recent developments, and case studies. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 22(7), 579-594, 2009.

HUGHES, D.; TAVERNA, M. A. Expanding the digital envelope. **Aviation Week and Space Technology**, 160(19), 50-52, 2004.

IBRAHIM, R.; PAULSON, B. C. Discontinuity in organizations: identifying business environments affecting efficiency of knowledge flows in Product Lifecycle Management. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 3(1), 21-36, 2008.

ILIEVA, I. *et al.* Integration of Product Lifecycle Management (PLM) and Multi Project Management: Toward increasing transparency in product development. **Zwf Zeitschrift Fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb**, 104(11), 931-936, 2009.

IOSIF, G.; IORDACHE, L.; STOICA, V.; ANA-MARIA, L.; EMIL, C.; SUCIU, G.; SUCIU, V. Achieving a More Electric Aircraft: a comparative study between the concurrent and traditional engineering models. **Incas Bulletin**, 10(1), 221-228, 2018.

JOHNSON, C.; GAVILANES, J. Quick and below budget. Intech, **Research Triangle**, 50(5), 51-54, 2003.

JOSHI, N.; DUTTA, D. Managing extended producer responsibility using PLM part 2: Identification of joints for end-of-life treatment planning. **Computer-aided Design and Applications**, 5(6), 764-773, 2008.

JUN, H.-B. *et al.* A framework for RFID applications in product lifecycle management. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 22(7), 595-615, 2009.

JUN, H.; KIRITSIS, D.; XIROUCHAKIS, P. Research issues on closed-loop PLM. **Computers in Industry**, 58(8-9), 855-868, 2007.

KAHLERT, T.; REZAIE, A. Reporting-Strategien für PLM-Umgebungen. **Zwf Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb**, 100(9), 520-523, 2005.

KANG, L *et al.* Microfluidics for drug discovery and development: From target selection to product lifecycle management. **Drug Discovery Today**, 13(1-2), 1-13, 2008.

KÄRKKÄINEN, H.; SILVENTOINEN, A. What is product lifecycle management (PLM) maturity? Analysis of current PLM maturity models. **Journal of Modern Project Management**, 3(3), 96-103, 2016.

KIRITSIS, D. Closed-loop PLM for intelligent products in the era of the Internet of things. **Computer-aided Design**, 43(5), 479-501, 2011.

KNAPP, G. L. *et al.* Building blocks for a digital twin of additive manufacturing. **Acta Materialia**, v. 135, p. 390–399, 15 ago. 2017.

KUBLER, S. *et al.* Enhanced Product Lifecycle Information Management using “communicating materials”. **Computer-aided Design**, 59, 192-200, 2015a.

KUBLER, S.; FRÄMLING, K.; DERIGENT, W. P2P Data synchronization for product lifecycle management. **Computers in Industry**, 66, 82-98, 2015b.

KULTYSHEV, A. Y. *et al.* The experience of implementing and using the Windchill product lifecycle management system at the energy machine building enterprise. **Thermal Engineering**, 60(8), 559-566, 2013.

LAZAREVIC, M. *et al.* Product Lifecycle Management (PLM) methodology for product tracking based on Radio-Frequency Identification (RFID) technology. **Scientific Research and Essays**, 6(22), 4776-4787, 2011.

LE DUIGOU, J. L.; BERNARD, A.; PERRY, N. Framework for Product Lifecycle Management integration in small and medium enterprises networks. **Computer-Aided Design and Applications**, 8(4), 531-544, 2011.

LEE, J.; KAO, H. A.; YANG, S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. **Procedia CIRP**, v. 16, p. 3–8, 2014.

LEE, S. G. *et al.* Product Lifecycle Management in aviation maintenance, repair and overhaul. **Computers in Industry**, 59(2-3), 296-303, 2008.

LEE, Y.; SHEU, L.; TSOU, Y. Quality function deployment implementation based on Fuzzy Kano model: An application in PLM system. **Computers & Industrial Engineering**, 55(1), 48-63, 2008.

LEGARDEUR, J.; MERLO, C.; FISCHER, X. An integrated information system for product design assistance based on artificial intelligence and collaborative tools. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 1(3), 211-229, 2006.

LENG, J. *et al.* Digital twin-driven joint optimisation of packing and storage assignment in large-scale automated high-rise warehouse product-service system. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 2019a.

LENG, J. *et al.* Digital twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel

controlling of smart workshop. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, v. 10, n. 3, p. 1155–1166, 13 mar. 2019b.

LI, C. *et al.* Dynamic Bayesian network for aircraft wing health monitoring digital twin. **AIAA Journal**, v. 55, n. 3, p. 930–941, 2017.

LI, J. *et al.* Big Data in product lifecycle management. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 81(1-4), 667-684, 2015.

LI, H.-F.; Wu, H.-Z. Design and implementation of PLM based on meta-model driven. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 7, 963-968, 2005.

LI, X.-S.; Qi, G.-N. Integrated product model to support implementation of product lifecycle management. **Journal of Zhejiang University**, 42(3), 418-424, 2008.

LIAO, X.; ZHANG, L. Access control model for workflow management system for PLM. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 11(10), 1367-1371, 2005.

LIAO, Y. *et al.* Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 12, p. 3609–3629, 2017.

LIN, W.-T. *et al.* Modular fiber optic cable product architecture for application in Product Lifecycle Management. **Information Technology Journal**, 10(1), 16-28, 2011.

LIU, J. *et al.* Dynamic Evaluation Method of Machining Process Planning Based on Digital Twin. **IEEE Access**, v. 7, p. 19312–19323, 2019a.

LIU, J. *et al.* Digital twin-based process reuse and evaluation approach for smart process planning. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 100, n. 5–8, p. 1619–1634, 19 fev. 2019b.

LIU, Q. *et al.* Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 12, p. 3903–3919, 18 jun. 2019.

LÖWER, M.; HELLER, J. E. PLM reference model for integrated idea and innovation management. **Ifip Advances in Information and Communication Technology**, 422(1), 257-266, 2014.

LU, Y.; XU, X. Resource virtualization: A core technology for developing cyber-physical production systems. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 47, p. 128–140, 1 abr. 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, 1 jun. 2019.

LUNDIN, M. *et al.* Efficient design module capture and representation for product family reuse. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, 17(3), 2017.

- LUO, W. *et al.* Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, v. 10, n. 3, p. 1129–1140, 13 mar. 2019.
- MACKENZIE, C. Matthew *et al.* Reference model for service oriented architecture 1.0. **OASIS standard**, v. 12, n. S18, p. 1-31, 2006.
- MAIER, F.; MEYER, M.; STEINBEREITHNER, M. Nonprofit organizations becoming business-like: A systematic review. **Nonprofit and Voluntary Sector Quarterly**, 45(1), 64-86, 2016.
- MARCHETTA, M. G.; MAYER, F.; FORRADELLAS, R. Q. A reference framework following a proactive approach for Product Lifecycle Management. **Computers in Industry**, 62(7), 672-683, 2011.
- MARCONNET, B. *et al.* An assembly oriented design and optimization approach for mechatronic system engineering. **International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization**, 8, 2017.
- MARUCHECK, A. *et al.* Product safety and security in the global supply chain: Issues, challenges and research opportunities. **Journal of Operations Management**, 29(7-8), 707-720, 2011.
- MATOOK, S.; INDULSKA, M. Improving the quality of process reference models: A quality function deployment-based approach. **Decision Support Systems**, [s. l], v. 47, n. 1, p. 60-71, 01 jan. 2009.
- MATSOKIS, A.; KIRITSIS, D. An ontology-based approach for Product Lifecycle Management. **Computers in Industry**, 61(8), 787-797, 2010.
- MATSOKIS, A.; KIRITSIS, D. Ontology applications in PLM. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 5(1), 84-97, 2011.
- MEJÍA, R. G. *et al.* Implementation of methodology of maintenance of molds of injection supported in tools of Product Lifecycle Management (PLM). **Espacios**, 37(25), 1-20, 2016.
- MELHORAMENTOS. **Dicionário Michaelis**. São Paulo: Companhia Melhoramentos, 2022. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/busca?r=0&f=0&t=0&palavra=processo>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- MELONI, W. Growing by design. **Computer Graphics World**, 32-34, 2007.
- MENG, X. *et al.* Enterprise integration platform based on service-oriented architecture. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 21(3), 36-40, 2008.
- MINERVA, R.; LEE, G.; CRESPI, N. Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models. **Proceedings of the IEEE**. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Oct. 2020. DOI 10.1109/jproc.2020.2998530.
- MING, X. G. *et al.* Collaborative process planning and manufacturing in product lifecycle management. **Computers in Industry**, 59(2-3), 154-166, 2008.

MO, R. *et al.* Validation informatization based on product lifecycle management-teamcenter. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 16(7), 1458-1464, 2010.

MOYNE, J.; ISKANDAR, J. Big data analytics for smart manufacturing: Case studies in semiconductor manufacturing. **Processes**, v. 5, n. 3, 1 set. 2017.

MUKHERJEE, T.; DEBROY, T. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components. **Applied Materials Today**, v. 14, p. 59–65, 1 mar. 2019.

NATHAN, S. Fast lane to production vehicle manufacturers are implementing PLM systems to better integrate development and manufacturing. **Engineer**, 294(7781), 38-40, 2009.

NATIONAL INFRASTRUCTURE COMMISSION. Data for the public good. **National Infrastructure Commission**, p. 76, 2017.

NAVARRO, R.; TIWARI, A.; TURNER, C. Improving product lifecycle management implementations by applying 'lean' principles. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 6(4), 357-380, 2013

NEGRI, E.; FUMAGALLI, L.; MACCHI, M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 939–948, 2017.

NEIL, S. A work in progress. **Managing Automation**, 24(4), 14-21, 2009.

PAAVEL, M.; KARJUST, K.; MAJAK, J. Development of a product lifecycle management model based on the fuzzy analytic hierarchy process. **Proceedings of the Estonian Academy of Sciences**, 66(3), 279-286, 2017.

PALMARINI, R. *et al.* Systematic review of augmented reality applications in maintenance, Robotics and **Computer–Integrated Manufacturing**, 49, 215-228, 2018.

PALMER, D. No-one pretends this is easy. **Manufacturing Computer Solutions**, 10(3), 35-36, 2004.

PATTERSON, E. A.; WHELAN, M. P. **A framework to establish credibility of computational models in biology** *Progress in Biophysics and Molecular Biology* Elsevier Ltd, , 1 out. 2017.

PIANCASTELLI, L. *et al.* Optimized FSI flow simulation using modern up-to-date software systems: A direct comparison between simulated and tunnel results. **Arpn Journal of Engineering and Applied Sciences**, 10(20), 9174-9182, 2015.

PINNA, C. *et al.* An approach to improve implementation of PLM solution in food industry - case study of Poult Group. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 10(2), 151-170, 2017.

PITCHER, G. From cradle to grave. **New Electronics**, 38(7), 42-43, 2005.

POLCAR, J.; HOREJSI, P. Knowledge acquisition and cybersickness: A comparison of VR devices in virtual tours. **Mm Science Journal**, 2015(2), 613-616, 2015.

PORTILLO-BARCO, C.; CHARNLEY, F. Data requirements and assessment of technologies enabling a product passport within products exposed to harsh environments: a case study of a high pressure nozzle guide vane. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 8(3), 253-282, 2015.

PULLIN, J. Making connections. **Environmental Engineering**, 26(2), 39-41, 2013.

QIU, M; CHEN; G.; DONG, J.-X. Ontology based adaptive product lifecycle management system. **Computer Integrated Manufacturing Systems, Cims**, 11(6), 825-830, 2015.

QI, Q.; TAO, F. Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. **IEEE Access**, v. 6, p. 3585–3593, 12 jan. 2018.

RACHURI, S. *et al.* Information sharing and exchange in the context of product lifecycle management: Role of standards. **Computer-Aided Design**, 40(7), 789-800, 2008.

ROSEMANN, M; AALST, W. A Configurable Reference Modelling Language. **Information Systems**. 32. 1-23. 10.1016/j.is.2005.05.003, 2007.

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.

RYAN, T. J. Coming on Strong. **Apparel**, 44(8), 27-32, 2003.

SANTOS, D. S.; REIS, D. A.; FLEURY, A. L. Project Lifecycle Management (PLM): evolution and state of the art. **Product Management & Development**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 70-91, 2020. Editora Cubo. DOI 10.4322/pmd.2019.027.

SASSANELLI C. *et al.* Using design rules to guide the PSS design in an engineering platform based on the product service lifecycle management paradigm. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 11(2), 91-115, 2018.

SAVINO, M. M.; MAZZA, A.; OUZRUT, Y. PLM Maturity model: A multi-criteria assessment in southern Italy companies. **International Journal of Operations and Quantitative Management**, 18(3), 159-180, 2012.

SCHLUSE, M. *et al.* ExperimentTabela Digital Twins-Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 14, n. 4, p. 1722–1731, 1 abr. 2018.

SCHMITT, P. PLM in aerospace. **Manufacturing Engineering**, 138(3), 2007.

SCHUH, G.; ROZENFELD, H.; ASSMUS, D.; ZANCUL, E. Process oriented framework to support PLM implementation. **Computers in Industry**, 59(2-3), 210-218, 2008.

- SCHÜTZER, K. *et al.* Contribution to the development of a Digital Twin based on product lifecycle to support the manufacturing process. **Procedia CIRP**. 84. 82-87. 2019. 10.1016/j.procir.2019.03.212.
- SEIBERT, B. Design agility achieved with PDM/PLM. **Apparel**, 46(9), 22-26, 2005.
- SHAFTO, M. *et al.* DRAFT Modeling, Simulation, information Technology & Processing Roadmap - Technology Area 11. **National Aeronautics and Space Administration**, p. 27, 2010.
- SHARMA, A. Collaborative product innovation: integrating elements of CPI via PLM framework. **Computer-Aided Design**, 37(13), 1425-1434, 2005.
- SHELLEY, T. Controlling change. **Manufacturing Computer Solutions**, 13(5), 28-29, 2007.
- SHEN, J.-X.; ZHOU, R.-R. Research on PLM system framework and key technologies. **Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics**, 35(5), 565-571, 2003.
- SHI, J.-G. *et al.* Critical factors to achieve dockless bike-sharing sustainability in China: A stakeholder-oriented network perspective. **Sustainability**, 10(6), 2018.
- SIMONOVA, L. A.; KHISAMUTDINOV, M. R. Scientific - Industrial aspects of integration product lifecycle management and enterprise resource planning systems. **World Applied Sciences Journal**, 25(4), 690-693, 2013.
- SJAROV M. *et al.*, "The Digital Twin Concept in Industry – A Review and Systematization," 2020 25th **IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)**, 2020, pp. 1789-1796, DOI 10.1109/ETFA46521.2020.9212089.
- SKARKA, W. Contemporary problems connected with including Standard for the Exchange of Product Model Data (ISO 10303 - STEP) in designing ontology using UML and XML. **Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences**, 12(2-3), 231-246, 2005.
- SÖDERBERG, R. *et al.* Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 66, n. 1, p. 137–140, 2017.
- SODHRO, A. H.; PIRBHULAL, S.; SANGAIAH, A. K. Convergence of IoT and product lifecycle management in medical health care. **Future Generation Computer Systems**, 86, 380-391, 2018.
- SOTO-ACOSTA, P.; PLACER-MARURI, E.; PEREZ-GONZALEZ, D. A case analysis of a product lifecycle information management framework for SMEs. **International Journal of Information Management**, 36(2), 240-244, 2016.
- SPERA, J. Manufacturing steps onto the enterprise IT stage. **Circuits Assembly**, 19(6), 28-29, 2008.

- SRINIVASAN, V. An integration framework for product lifecycle management. **Computer-aided Design**, 43(5), 464-478, 2011.
- SRITI, M.-F. *et al.* Ontology-based approach for product information exchange. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 8(1), 1-23, 2015.
- STARK, J. Product Lifecycle Management. **Decision Engineering**, 1-562, 2011.
- STARK, R.; DAMERAU, T. Digital Twin. In **CIRP Encyclopedia of Production Engineering** (pp. 1–8). Springer Berlin Heidelberg, 2019. DOI 10.1007/978-3-642-35950-7\_16870-1.
- STARK, R.; FRESEMANN, C.; LINDOW, K. Development and operation of Digital Twins for technical systems and services **CIRP Annals** Elsevier BV, 2019. DOI 10.1016/j.cirp.2019.04.024.
- STELZER, R. *et al.* Collaboration environment for computer aided design virtual reality (CAD-VR). **Zwf Zeitschrift Fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb**, 104(1-2), 89-93, 2009.
- STEPHENS, S. PLM and steam generator replacement at SONGS. **Nuclear News**, 49(11), 47-50, 2006.
- SUDARSAN, R. *et al.* A product information modeling framework for product lifecycle management. **Computer-Aided Design**, 37(13), 1399-1411, 2005.
- TAIT, N. From point of conception to the point of sale: PLM - Yet another three letter acronym? **Textile Network**, 9, 40-43, 2006.
- TALHI, A. *et al.* Toward an Ontology-Based Architecture for Cloud Manufacturing. **Studies in Computational Intelligence**, 187-195, 2015.
- TANG, G.; HU, L. A medical devices management information system supporting full life-cycle process management. **Chinese Journal of Medical Instrumentation**, 34(4), 304-308, 2015.
- TANG, D.; QIAN, X. Product lifecycle management for automotive development focusing on supplier integration. **Computers in Industry**, 59(2-3), 288-295, 2008.
- TAO, F. *et al.* Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. **CIRP Annals**, v. 67, n. 1, p. 169–172, 1 jan. 2018a.
- TAO, F. *et al.* Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 94, n. 9–12, p. 3563–3576, 1 fev. 2018b.
- TAO, F. *et al.* Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 4, p. 2405–2415, 1 abr. 2019a.
- TAO, F. *et al.* Digital twin-driven product design framework. **International Journal of Production Research**, v. 57, n. 12, p. 3935–3953, 18 jun. 2019b.

- TAO, F.; QI, Q. **Make more digital twins** Nature Publishing Group, , 26 set. 2019.
- TAO, F.; ZHANG, M. Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. **IEEE Access**, v. 5, p. 20418–20427, 24 set. 2017.
- TAVERNA, M. A. New-fangled Falcon. **Aviation Week and Space Technology**, 161(14), 62-64, 2004
- TAVERNA, M. A. Time saver. **Aviation Week and Space Technology** (New York), 166(19), 60-61, 2017.
- TERESKO, J. Making a pitch for PLM. **Industry Week**, 253(8), 57-62, 2004.
- THILMANY, J. Project and lifecycle together. **Mechanical Engineering**, 133(2), 2011.
- TINHAM, B. Collaboration to slash 20% costs at Kvaerner. **Manufacturing Computer Solutions**, 9(1), 28-29, 2003.
- TINHAM, B. PLM: Evolving tools for an evolving market? **Manufacturing Computer Solutions**, 10(4), 24-26, 2004.
- TRAN, A. Wanfeng auto holding group selects UGS' teamcenter express for cPDM. **Automotive Industries Ai**, 186(11), 1-1, 2006.
- TRAPPEY, A. J. C.; HSIAO, D. W. Applying collaborative design and modularized assembly for automotive ODM supply chain integration. **Computers in Industry**, 59(2-3), 277-287, 2008.
- TROTTA, M G. Product lifecycle management: Sustainability and knowledge management as keys in a complex system of product development. **Journal of Industrial Engineering and Management**, 3(2), 309-322, 2010.
- TUEGEL, E. J. *et al.* Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. **International Journal of Aerospace Engineering**, 2011.
- UHLEMANN, T. H. J. *et al.* The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems. **Procedia Manufacturing**, v. 9, p. 113–120, 1 jan. 2017.
- UHLEMANN, T. H. J.; LEHMANN, C.; STEINHILPER, R. **The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0**. *Procedia CIRP. Anais...Elsevier B.V.*, 2017
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, Inova. **Site Fábrica do Futuro - USP**. Disponível em: <https://sites.usp.br/fabricadofuturo/>. Acesso em: 31 maio 2020.
- VACHALEK, J. *et al.* **The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept**. Proceedings of the 2017 21st International Conference on Process Control, PC 2017. *Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, 11 jul. 2017

- VADOUDI, K.; BRATEC, F.; TROUSSIER, N. A GIS-oriented semantic data model to support PLM for DfS. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 10(3), 210-230, 2017.
- VENKATASUBRAMANIAN, V. Prognostic and diagnostic monitoring of complex systems for product lifecycle management: Challenges and opportunities. **Computers & Chemical Engineering**, 29(6), 1253-1263, 2005.
- VENUGOPALAN, S. R.; GANESH, L. S.; SAI, L. P. Deployment maturity assessment of product lifecycle management systems: A study in Indian industries. **International Journal Of Product Lifecycle Management**, 6(2), 178-210, 2012.
- VEZZETTI, E.; MOOS, S.; KRETLI, S. A product lifecycle management methodology for supporting knowledge reuse in the consumer packaged goods domain. **Computer-Aided Design**, 43(12), 1902-1911, 2011.
- VIEIRA, D. R.; VIEIRA, R. K.; CHAIN, M. C. Elements of managerial integration for sustainable product lifecycle management. **International Journal of Product Lifecycle Management**, 9(2), 87-107, 2016.
- VILA, C. *et al.* Project-based collaborative engineering learning to develop Industry 4.0 skills within a PLM framework. **Procedia Manufacturing**, 13, 1269-1276, 2017.
- VON BUCHSTAB, V. ABCs of CAD oversell. **Design Engineering**, 49(4), 2003.
- WALKER, A. J.; COX, J. J. Incorporating global characteristic data into virtual product development models. **Computer-Aided Design and Applications**, 5(6), 900-920, 2008.
- WAN, J. *et al.* A Manufacturing Big Data Solution for Active Preventive Maintenance. **Ieee Transactions on Industrial Informatics**, 13(4), 2039-2047, 2017.
- WANG, C.-F.; XU, Y.-Q. Research on PLM for green manufacturing and its key technology. **Zhuzao/foundry**, 54(2), 108-111, 2005.
- WANG, S. *et al.* Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 2016, 2016.
- WANG, Y., WU, Z. Model construction of planning and scheduling system based on digital twin. **Int J Adv Manuf Technol** 109, 2189–2203, 2020. DOI 10.1007/s00170-020-05779-9.
- WAURZYNIAK, P. Connecting the digital world with the factory floor: New collaborative 3D plant process planning and visualization tools are helping manufacturers prove out PLM's promise. **Manufacturing Engineering**, 154(4), 53-64, 2014.
- WAURZYNIAK, P. PLM's digital twins offer virtual view of manufacturing. **Manufacturing Engineering**, 158(4), 67-73, 2017.
- WAURZYNIAK, P. Programming ingenuity into manufacturing system: New software advances help manufacturers inject creativity and vision into their factory-floor processes. **Manufacturing Engineering**, 154(10), 3-9, 2015a.

- WAURZYNIAK, P. Redefining PLM. **Manufacturing Engineering**, 154(9), 117-126, 2015b.
- WEYER, S. *et al.* Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories: an Example from the Automotive Industry. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 31, p. 97–102, 2016.
- WIENS, D. Juggling WIP. **New Electronics**, 39(15), 38-39, 2006.
- WONG K. We gather today to join ERP and PLM: Marrying enterprise data to product data. **Cadalyst**, 23(9), 42-44, 2006.
- WOODS, T. Life aid. **Engineering**, 246(5), 38-39, 2005.
- YOO *et al.* Integration of design intent during the product lifecycle management. **Ifip Advances in Information and Communication Technology**, 442, 101-110, 2014.
- YOUNG, C. Bridging the data divide. **IBM Data Management Magazine**, 6, 14, 2012.
- YOUNG *et al.* Manufacturing knowledge sharing in PLM: a progression towards the use of heavyweight ontologies. **International Journal of Production Research**, 45(7), 1505-1519, 2007.
- YU, Y.; YAN, J.-W.; LIU, M. Ontology mapping approach oriented to product information collaboration. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 16(5), 1111-1119, 2010.
- ZANCUL, Eduardo de Senzi. **Gestão do ciclo de vida de produtos: seleção de sistemas PLM com base em modelos de referência**. 2009. 227 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2009. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18140/tde-27052009-132444/pt-br.php>. Acesso em: 03 mar. 2021.
- ZHANG H. *et al.* Sustainability consideration within product lifecycle management through maturity models analysis. **International Journal of Services and Operations Management**, 19(2), 151-171, 2014.
- ZHANG, H. *et al.* A Digital Twin-Based Approach for Designing and Multi-Objective Optimization of Hollow Glass Production Line. **IEEE Access**, v. 5, p. 26901–26911, 24 out. 2017a.
- ZHANG, M.-J. *et al.* Performance evaluation method for product lifecycle management. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 17(2), 362-368. 2011.
- ZHANG, Y. *et al.* A big data analytics architecture for cleaner manufacturing and maintenance processes of complex products. **Journal of Cleaner Production**, 142(2), 626-641, 2017b.
- ZHANG, Y. *et al.* A framework for Big Data driven product lifecycle management. **Journal of Cleaner Production**, 159, 229-240, 2017c.
- ZHAO, R. *et al.* Digital twin-driven cyber-physical system for autonomously controlling of micro punching system. **IEEE Access**, v. 7, p. 9459–9469, 2019.

ZHAO, W.-B. *et al.* Energy simulation framework integrated with green manufacturing-enabled PLM information model. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, 2(3), 217-224, 2015.

ZHENG, Y.; YANG, S.; CHENG, H. An application framework of digital twin and its case study. **Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing**, v. 10, n. 3, p. 1141–1153, 13 mar. 2019.

ZHOU, G. *et al.* Knowledge-driven digital twin manufacturing cell towards intelligent manufacturing. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 4, p. 1034–1051, 16 fev. 2020.

ZHU, H. *et al.* A web-based product service system for aerospace maintenance, repair and overhaul services. **Computers in Industry**, 63(4), 338-348, 2012.

ZHU, W. *et al.* Implementations of model based definition and Product Lifecycle Management technologies: A case study in Chinese aeronautical industry. **IFAC – Papers Online**, 49(12), 485-490, 2016

ZHUANG, C.; LIU, J.; XIONG, H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, n. 1–4, p. 1149–1163, 1 abr. 2018.

ZSCHEILE F. From machine files to maintenance history files. **Productivity Management**, 22(1), 62-65, 2017.

ZOBEL-ROOS, S. *et al.* Accelerating biologics manufacturing by modeling or: Is Approval under the QbD and PAT approaches demanded by authorities accepTabela without a digital-twin? **Processes**. MDPI AG, 1 fev. 2019

## APÊNDICE A - LISTA DE AUTORES VS ÁREA DE APLICAÇÃO DO GERENCIAMENTO DO CICLO DE VIDA

(continua)

| Autor  | Área de aplicação   |
|--|---|
| Alemanni <i>et al.</i> (2008; 2010); Brière-côté; Rivest; Desrochers (2010); Cantamessa; Montagna; Neirotti. (2012); Zhu <i>et al.</i> (2012; 2016); El Soury <i>et al.</i> (2017); Vieira; Vieira; Chain. (2016); Navarro; Tiwari; Turner. (2013); Venugopalan, Ganesh; Sai. (2012); Eynard; Troussier; Carratt. (2010); Taverna, M. A. (2004; 2017); Schmitt (2007); Hughes & Taverna (2004); Teresko (2004); Anderson (2002). | Aeroespacial  |
| Alemanni <i>et al.</i> (2010); Cao <i>et al.</i> (2009); Matsokis & Kiritsis (2010); Srinivasan (2011); Tang & Qian (2008); Venugopalan, Ganesh; Sai (2012); Baughey (2009); Shelley (2007); Tran (2006); Case (2006); Brincheck (2005); Teresko (2004); Trappey & Hsiao (2008).   | Automobilística   |
| Lee <i>et al.</i> (2008).  | Manutenção, reparo e revisão da aviação (MRO)                           |
| Young (2012).  | Sistemas back-end, aplicativos de comércio front-end e o data warehouse |
| Hachani <i>et al.</i> (2013).  | Processos de Negócios (BPs)   |
| Brezgin <i>et al.</i> (2013)   | Turbinas de cogeração   |
| Demoly <i>et al.</i> (2013).   | Engenharia simultânea   |
| Barthorpe & Chien & Jack (2004); Holzer (2014).  | Indústria da construção civil   |
| Vezzetti; Moos; Kretli. (2011).  | Indústria de Bens Embalados de Consumo (CPG)                            |
| Sharma (2005).   | CPI - Inovação colaborativa de produtos                                 |
| Cáceres; Castillo; Rosário. (2010).  | Fabricação digital  |
| Iosif <i>et al.</i> (2018).  | Aeronaves elétricas   |
| Courtney (2014); Savino; Mazza; Ouzrout (2012).  | Setores eletromecânicos   |
| Kultyshev <i>et al.</i> (2013).  | Empresa de construção de máquinas de energia                            |
| Brunsmann <i>et al.</i> (2012).  | Indústria de engenharia   |
| D'avolio; Bandinelli; Rinaldi. (2017)  | Empresas de moda  |
| Pinna <i>et al.</i> (2017)   | Indústria alimentícia   |
| Anderson (2002); Forcinio (2007).  | Indústrias de bens  |
| Kubler <i>et al.</i> (2015b).  | Área da Saúde   |
| Venugopalan, Ganesh; Sai (2012).   | Hi-tech area  |
| Avventuroso; Silvestri; Pedrazzoli (2017); Vila <i>et al.</i> (2017).  | Indústria 4.0   |
| Cai; Xu; Xu. (2014); Fortineau; Paviot; Lamouri (2013); Främling <i>et al.</i> (2014).   | IoT   |
| Portillo-Barco & Charnley (2015).  | Motor a jato  |

(Continuação)

| Autor  | Área de aplicação                                     |
|--|---|
| Shi <i>et al.</i> (2018); Camarillo; Ríos; Althoff . (2017); Marconnet <i>et al.</i> (2017); Essop <i>et al.</i> (2016); Waurzyniak (2014); Bartholomew (2005); Wang; Xu; Y. (2005); Trappey & Hsiao (2008).   | Manufatura  |
| Sodhro <i>et al.</i> (2018); Tang & Hu (2015); Allanic <i>et al.</i> (2014); Kang <i>et al.</i> (2008); Kubler <i>et al.</i> (2015a).  | Área médica   |
| Caro; Bolarin; Chocano. (2011).  | Construção naval                                      |
| Stephens (2006).   | Energia nuclear                                       |
| Tinham (2003).   | Petróleo e gás  |
| Aziz <i>et al.</i> (2005); Borsato (2014); Cai; Xu; Xu. (2014); Chungoora <i>et al.</i> (2013); Demoly; Matsokis; Kiritsis.. (2012); Fortineau; Paviot; Lamouri. (2013); Kiritsis (2011); Matsokis & Kiritsis (2010); Young <i>et al.</i> (2007); Sriti <i>et al.</i> (2015); Talhi <i>et al.</i> (2015); Yoo <i>et al.</i> (2014); Matsokis & Kiritsis (2011); Yu; Yan; Liu. (2010); Borsato <i>et al.</i> (2010); Feng <i>et al.</i> (2009); Skarka (2005); Qiu, Chen; Dong. (2015). | Ontologia   |
| Venkatasubramanian (2005).   | Farmacêutica  |
| Mejía <i>et al.</i> (2016).  | Injeção plástica                                      |
| Lazarevic <i>et al.</i> (2011).  | Identificação de radiofrequência (RFID)               |
| Falkiewicz (2011).   | Vendas, compras, contabilidade, manufatura e serviço. |
| Gulledge & Simon (2009).   | Empresa de Logística do Exército Único (VENDA)        |
| Maruchek <i>et al.</i> (2011).   | Segurança e segurança                                 |
| Le Duigou; Bernard; Perry. (2011); Zhang <i>et al.</i> (2011); Alison (2010); Pitcher (2005); Tinham (2004); Bruno <i>et al.</i> (2016).   | Pequenas e médias empresas (PME's)                    |
| Främling <i>et al.</i> (2013); Zhao <i>et al.</i> (2015); Trotta (2010).   | Área sustentável                                      |
| Mo <i>et al.</i> (2010).   | Arquitetura Teamcenter (TC)                           |
| Golovatchev; Budde; Hong. (2010).  | Indústria de telecomunicações                         |
| Zhang <i>et al.</i> (2017c).   | Turbo máquina   |
| Bonou; Skelton; Olsen (2016).  | Turbinas eólicas                                      |

**APÊNDICE B - LISTA DE AUTORES VS PALAVRA-CHAVE DO GERENCIAMENTO DO CICLO DE VIDA**

(Continua)

| <b>Autor</b>  | <b>Palavra-chave</b>  |
|---|---|
| Iosif <i>et al.</i> (2018).   | 2D/3D <i>design</i> software  |
| Brière-côté; Rivest; Desrochers. (2010).  | Adaptive Generic Product Structure (AGPS)   |
| Chen <i>et al.</i> (2008).  | Analytic network process (ANP)  |
| Trappey & Hsiao (2008).   | Advanced product quality planning (APQP) & Atelier Cooperatif de Suivi de Projet in French (ACSP) |
| Gomes <i>et al.</i> (2009b).  | BAE Systems   |
| El Soury <i>et al.</i> (2017).  | Based Access Control Model (RBAC)   |
| Liao & Zhang (2005).  | Big Data  |
| Zhang <i>et al.</i> (2017b); Li <i>et al.</i> (2015); Wan <i>et al.</i> (2017);   |   |
| Marchetta; Mayer; Forradellas. (2011).  | Business Process Model (BPM)  |
| Lundin <i>et al.</i> (2017); Waurzyniak (2015a 2015b; 2017); Zscheile (2017); Farish (2008; 2012); Ding <i>et al.</i> (2011); Gomes <i>et al.</i> (2009a); Neil (2009); Walker & Cox (2008); Shelley (2007); Sudarsan <i>et al.</i> (2005); Lundin <i>et al.</i> (2017); Zscheile (2017); Lee <i>et al.</i> (2008); Denkena <i>et al.</i> (2007); Alemanni <i>et al.</i> (2010); Ming <i>et al.</i> (2008). | Computer-aided <i>design</i> (CAD)  |
| Piancastelli <i>et al.</i> (2015).  | CAD embedded FSI (Fluid System Interaction)   |
| Waurzyniak (2015a; 2015b; 2017); Pullin (2013); Falkiewicz (2011); Walker & Cox (2008); Teresko (2004); Sudarsan <i>et al.</i> (2005); Lee <i>et al.</i> (2008); Ming <i>et al.</i> (2008).   | Computer-aided engineering (CAE)  |
| Waurzyniak (2015a; 2015b; 2017); Walker & Cox (2008); Shelley (2007); Meloni (2007); Woods (2005); Teresko (2004); Sudarsan <i>et al.</i> (2005); Lee <i>et al.</i> (2008); Denkena <i>et al.</i> (2007); Ming <i>et al.</i> (2008).  | Computer-aided manufacturing (CAM)  |
| Denkena <i>et al.</i> (2007); Ming <i>et al.</i> (2008).  | Computer Aided Process Planning (CAPP)  |
| Nathan (2009); Palmer (2004).   | CATIA PLM   |
| Chungoora <i>et al.</i> (2013).   | Computation Independent Model (CIM)   |
| Kärkkäinen & Silventoinen (2016).   | Capability maturity modeling (CMM)  |
| Sharma (2005).  | Collaborative Product Innovation (CPI)  |
| Lundin <i>et al.</i> (2017); Vila <i>et al.</i> (2017); Shen & Zhou (2003).   | Computer-aided technologies (CAx)   |
| Cole (2009).  | Concept2Market (C2M)  |
| Borsato (2014).   | Core Product Model / Open Assembly Model (CPM/OAM)  |

| Autor   | Palavra-chave                                       |
|---|---|
| Cui <i>et al.</i> (2008).   | Customer architecture hierarchy (CAH) method        |
| Young (2012); Bartholomew (2004); Shen & Zhou (2003);   | Customer relationship management (CRM)              |
| Fortineau <i>et al.</i> (2017).   | Data Linked Through Occurrences Network (DALTON)    |
| Hincapié <i>et al.</i> (2014).  | Dassault Systemes (DELMIA)                          |
| Lee <i>et al.</i> (2008).   | Delphi methods                                      |
| Ducellier; Yvars; Eynard. (2014).   | <i>Design</i> Change Orders (DCO)                   |
| Wiens (2006).   | <i>Design</i> data management (DDM) system.         |
| Anišić <i>et al.</i> (2013)   | <i>Design</i> for Excellence (DFX)                  |
| Marconnet <i>et al.</i> (2017)  | <i>Design</i> For Manufacturing and Assembly (DFMA) |
| Vadoudi; Bratec; Troussier. (2017).   | <i>Design</i> for sustainability (DfS)              |
| Dhuieb <i>et al.</i> (2014).  | Digital Factory Assistant (DFA)                     |
| Sodhro; Pirbhulal; Sangaiah. (2018).  | Duty-cycle optimization-based (JEHDO) algorithm     |
| Case (2006).  | Electrical control unit (ECU)                       |
| Zhao <i>et al.</i> (2015).  | EnergyPlus' program                                 |
| Tang & Hu (2015); Holzer (2014); Simonova & Khisamutdinov (2013); Young (2012); Falkiewicz (2011); Wong (2006); Gort (2015); Barthorpe & Chien & Jack (2004); Shen & Zhou (2003). | Enterprise Resource planning (ERP)                  |
| Li & Wu (2005).   | Extensible Markup Language (XML)                    |
| Tait (2006).  | Fashion Lifecycle Management (FLM)                  |
| Shelley (2007).   | Finite element analysis (FEA) computation           |
| Paavel; Karjust; Majak. (2017); Kubler <i>et al.</i> (2014); Lee; Sheu; Tsou. (2008).   | Fuzzy analytic hierarchy process [FAHP]             |
| Granros (2009).   | Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP) |
| Portillo-Barco & Charnley (2015).   | High pressure nozzle guide vane (HPNGV)             |
| Främling <i>et al.</i> (2014).  | Hypertext transfer protocol (HTTP)                  |
| Chungoora <i>et al.</i> (2013).   | Knowledge Systems (IMKS)                            |
| Holzer (2014).  | Information Modeling (BIM)                          |
| Legardeur; Merlo; Fischer. (2006).  | Innovation Development and Diffusion (ID2) system   |
| Li & Qi (2008).   | Integrated product model (IPM)                      |
| Camarillo; Ríos; Althoff. (2017; 2018); Shi <i>et al.</i> (2018).   | Case-Based Reasoning (CBR)                          |
| Lee; Sheu; Tsou. (2008).  | Kano model  |
| Al-ashaab <i>et al.</i> (2012).   | Knowledge-based environment (KBEnv)                 |

| Autor  | Palavra-chave   |
|--|---|
| Al-ashaab <i>et al.</i> (2012).  | Knowledge-Based Environment to Support Product <i>Design</i> Validation (KBE) |
| Garcia & Fan (2008).   | Knowledge Management (KM)   |
| Ibrahim & Paulson (2008).  |   |
| Bonou; Skelton; Olsen (2016).  | Life cycle management (LCM)   |
| Chiappinelli (2008).   | Manufacturing execution software (MES)  |
| Johnson & Gavilanes (2003).  |   |
| Spera (2008).  | Manufacturing operations system (MOS) software                                |
| Camarillo; Ríos; Althoff (2018).   | Manufacturing Problem Solving (MPS)   |
| Tinham (2004).   | MatrixOne and Smartteam   |
| Abid <i>et al.</i> (2014).   | Mechatronic system e System Modelling   |
| Sodhro; Pirbhulal; Sangaiah. (2018).   | Language (SysML).   |
| Zhu <i>et al.</i> (2016).  | Medical Things (IoMT)   |
| Li & Wu (2005); Chungoora <i>et al.</i> (2013).  | Model-Based Definition (MBD)  |
| Aziz <i>et al.</i> (2005).   | Model-Driven Architecture (MDA)   |
| Ilieva <i>et al.</i> (2009).   | MySQL   |
| Venugopalan, Ganesh; Sai .(2012).  | Multi-Project Management (MPM)  |
| Srinivasan (2011).   | New product development (NPD)   |
| Fortineau; Paviot; Lamouri. (2013).  | OMG PLM Services  |
| Srinivasan (2011).   | OntoStep  |
| Joshi & Dutta (2008).  | Open Applications Group Integration   |
| Demoly <i>et al.</i> (2010; 2011a; 2013).  | Specifications OAGIS BODs   |
| Huang; Wright; Newman (2009); Jun <i>et al.</i> (2009); Cao <i>et al.</i> (2009).  | Original Equipment Manufacturers (OEMs)                                       |
| Marchetta; Mayer; Forradellas. (2011);   | Product <i>design</i> Engineering based on Generative                         |
| Chungoora <i>et al.</i> (2013).  | Assembly Sequences planning (PEGASUS)   |
| Soto-acosta <i>et al.</i> (2016).  | Product embedded information devices (PEIDs)                                  |
| Chungoora <i>et al.</i> (2013).  | Product Information Model (PIM)   |
| Camarillo; Ríos; Althoff. (2018).  | Pladomin  |
| Young <i>et al.</i> (2007).  | Platform Specific Model (PSM)   |
| Paavel; Karjust; Majak. (2017); Löwer & Heller (2014); Falkiewicz (2011); Cummings (2006); Crawford (2006); Seibert (2005); Kahlert & Rezaie (2005); Ryan (2003); Von Buchstab (2003). | Process Failure Mode and Effect Analysis (PFMEA)                              |
|  | Process Specification Language (PSL)  |
|  | Product Data Management (PDM)   |

| Autor  | Palavra-chave  |
|--|--|
| Löwer & Heller (2014).   | Product Data Management Systems (PDMS)   |
| Kiritsis (2011); Främpling <i>et al.</i> (2014); Huang; Wright; Newman (2009); Jun <i>et al.</i> (2009); Cao <i>et al.</i> (2009); Kubler <i>et al.</i> (2015a).   | Product Lifecycle Management and Information Tracking using Smart Embedded Systems (PROMISE) |
| Sassanelli <i>et al.</i> (2018).   | Product service systems (PSSs)   |
| Thilmany (2011).   | Project portfolio management (PPM)   |
| Bruun <i>et al.</i> (2015).  | PTC Windchill PDMLink 9.1.   |
| Lee; Sheu; Tsou. (2008); Vezzetti; Moos; Kretli. (2011).   | Quality Function Deployment (QFD)  |
| Främpling <i>et al.</i> (2014); Främpling <i>et al.</i> (2013); Tang & Qian (2008); Kubler <i>et al.</i> (2015a).  | Quantum lifecycle management (QLM)   |
| Kiritsis (2011); Huang; Wright; Newman (2009); Jun <i>et al.</i> (2009); Cao <i>et al.</i> (2009); Kubler <i>et al.</i> (2015a).   | Radio frequency identification (RFID)  |
| Feng <i>et al.</i> (2010)  | Reliability, Maintainability and Supportability (RMS)  |
| Camarillo; Ríos; Althoff. (2018).  | Shared Experience using an Agent-based System Architecture Layout (SEASALT)                  |
| Chen <i>et al.</i> (2008).   | Sensitivity analysis   |
| Demoly; Matsokis; Kiritsis. (2012).  | Semantic Web Rule Language (SWRL)  |
| Hachani; Verjus; Gzara. (2012); Baughey (2009); Meng <i>et al.</i> (2008); Srinivasan (2011).  | Server-Oriented Architecture (SOA)   |
| Al-ashaab <i>et al.</i> (2012).  | Siemens Teamcenter Software (TcSE)   |
| Demoly <i>et al.</i> (2011b).  | SKeLeton geometry-based Assembly Context Definition (SKLACD)                                 |
| Kiritsis (2011); Srinivasan (2011).  | Standard for the Exchange of Product data model (STEP)                                       |
| Zhang <i>et al.</i> (2014).  | TechnoWare, InforWare, FunctionWare, and OrgaWare (TIFO)                                     |
| Vezzetti; Moos; Kretli. (2011).  | Teoriya Resheniya Izobreatatelskikh Zadatch (TRIZ)   |
| Tran (2006).   | UGS' Teamcenter Express  |
| Vadoudi; Bratec; Troussier. (2017); Eynard; Troussier; Carratt (2010); Li & Wu (2005); Sudarsan <i>et al.</i> (2005); Matsokis & Kiritsis (2010); Srinivasan (2011); Zhao <i>et al.</i> (2015); Demoly <i>et al.</i> (2013); Young <i>et al.</i> (2007); Cao <i>et al.</i> (2009). | Unified Modeling Language (UML)  |
| Kultyshev <i>et al.</i> (2013)   | Ural Turbine Works (UTW)   |
| Lin <i>et al.</i> (2011)   | Value Stream Mapping (VSM)   |
| Polcar & Horejsi (2015); Stelzer <i>et al.</i> (2009).   | Virtual Reality (VR)   |
| Zhu <i>et al.</i> (2012).  | World Wide Web Consortium (W3C)  |
| Yoo <i>et al.</i> (2014); Matsokis & Kiritsis (2010); Fortineau; Paviot; Lamouri (2013); Zhu <i>et al.</i> (2012); Demoly; Matsokis; Kiritsis.. (2012).  | Web Ontology Language (OWL)  |

## APÊNDICE C - LISTA DE AUTORES VS FUNCIONALIDADE DO GÊMEO DIGITAL

(Continua)

| Autor   | Funcionalidade  |
|---|---|
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Zhang <i>et al.</i> , 2017a; Negri & Fumagalli & Macchi, 2017; Rosen <i>et al.</i> , 2015; Zheng <i>et al.</i> , 2019; Alam & El saddik, 2017; Qi & Tao, 2018; Tao <i>et al.</i> , 2018a; Luo <i>et al.</i> , 2019; Tao & Zhang, 2017; Liu, J. <i>et al.</i> , 2019b; Zhuang & LIU & XIONG, 2018 e Zhao <i>et al.</i> , 2019 | Utilizar dados em tempo real                              |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020   | Utilizar dados em tempo parcial                           |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020 e Tao, Cheng, <i>et al.</i> , 2018  | Convergir os dados de <i>input</i>                        |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Söderberg <i>et al.</i> , 2017; Luo <i>et al.</i> , 2019; TAO; ZHANG, 2017; Gabor <i>et al.</i> , 2016; Zheng <i>et al.</i> , 2019 e Mukherjee & DebRoy, 2019  | Configurar os algoritmos do gêmeo digital                 |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Leng <i>et al.</i> , 2019a e Tuegel <i>et al.</i> , 2011   | Configurar as funções que retroalimentam o gêmeo digital  |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Leng <i>et al.</i> , 2019a e Tuegel <i>et al.</i> , 2011   | Configurar as funções que retroalimentam o processo       |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Leng <i>et al.</i> , 2019a e Tuegel <i>et al.</i> , 2011   | Configurar as funções que retroalimentam o produto físico |
| Durão <i>et al.</i> , 2020; Debroy <i>et al.</i> , 2017; Söderberg <i>et al.</i> , 2017; Zhuang <i>et al.</i> , 2018; Zhang <i>et al.</i> , 2017a; Tao & Zhang, <i>et al.</i> , 2018; Zheng <i>et al.</i> , 2019 e Mukherjee & DebRoy, 2019   | Construir o modelo digital                                |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Rosen <i>et al.</i> , 2015; Zhang <i>et al.</i> , 2017a; Liu, Q. <i>et al.</i> , 2019 e Tao & Cheng, <i>et al.</i> , 2018  | Configurar o <i>design</i> do gêmeo digital               |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020   | Configurar a plataforma do gêmeo digital                  |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Minerva & Lee & Crespi, 2020; Uhlemann & Schock, <i>et al.</i> , 2017 e Vachalek <i>et al.</i> , 2017  | Integrar os dados de <i>input</i>                         |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020 e Gabor <i>et al.</i> , 2016  | Configurar a arquitetura do gêmeo digital                 |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Gabor <i>et al.</i> , 2016; Ding <i>et al.</i> , 2019; Tao & Qi, 2019; Uhlemann & Lehmann & Steinhilper, 2018; Vachalek <i>et al.</i> , 2017; Negri <i>et al.</i> , 2017; Tao & Qi, 2019 e Zhang <i>et al.</i> , 2017a   | Configurar a coleta de dados                              |

---

|  |   |
|--|---|
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Zheng <i>et al.</i> , 2019 e Rosen <i>et al.</i> , 2015   | Configurar o armazenamento dos dados  |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Mukherjee & DebRoy, 2019; Zhang <i>et al.</i> , 2017a; Rosen <i>et al.</i> , 2015; Zheng <i>et al.</i> , 2019; Knapp <i>et al.</i> , 2017; Debroy <i>et al.</i> , 2017; Alam & El Saddik, 2017; Ding <i>et al.</i> , 2019; Tao <i>et al.</i> , 2018a; Luo <i>et al.</i> , 2019; Tao & Zhang, 2017; Liu, J. <i>et al.</i> , 2019b; Zhuang & Liu & Xiong, 2018; Zhao <i>et al.</i> , 2019; Leng <i>et al.</i> , 2019a; Tao <i>et al.</i> , 2019b; Tao <i>et al.</i> , 2018b; Liu, Q. <i>et al.</i> , 2019; El Saddik, 2018; Cheng <i>et al.</i> , 2020; Liu, J. <i>et al.</i> , 2019a; Schluse <i>et al.</i> , 2018; He & Guo & Zheng, 2018; ZHOU <i>et al.</i> , 2020; Tao & Qi, 2019; Tuegel <i>et al.</i> , 2011; Lu & Xu, 2018; Abramovici <i>et al.</i> , 2016; Cai <i>et al.</i> , 2017; Vachalek <i>et al.</i> , 2017; Uhlemann & Lehmann & Steinhilper, 2018 e Söderberg <i>et al.</i> , 2017 | Configurar os parâmetros a serem medidos  |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Durão <i>et al.</i> , 2020 e Lu & Xu, 2018  | Configurar o modelo de tomada de decisão  |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Zhang <i>et al.</i> , 2017a; Negri & Fumagalli & Macchi, 2017; Rosen <i>et al.</i> , 2015; Zheng <i>et al.</i> , 2019; Alam; El Saddik, 2017; Qi & Tao, 2018; Tao <i>et al.</i> , 2018a; Luo <i>et al.</i> , 2019; Tao & Zhang, 2017; Liu, J. <i>et al.</i> , 2019b; Zhuang & Liu & Xiong, 2018 e Zhao <i>et al.</i> , 2019   | Realizar as integrações entre o produto físico e o digital  |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Zhang <i>et al.</i> , 2017a; Zheng <i>et al.</i> , 2019; Qi & Tao, 2018; Zhuang & Liu & Xiong, 2018; Tao <i>et al.</i> , 2019b; Tao <i>et al.</i> , 2018b; Liu, Q. <i>et al.</i> , 2019; El Saddik, 2018; Cheng <i>et al.</i> , 2020; Schluse <i>et al.</i> , 2018; Weyer <i>et al.</i> , 2016; Zhou <i>et al.</i> , 2020 e Abramovici <i>et al.</i> , 2016   | Realizar as integrações entre dados de outros sistemas como <i>input</i> para o gêmeo digital                                   |
| Schluse <i>et al.</i> , 2018; Shafto <i>et al.</i> , 2010; Zheng <i>et al.</i> , 2019; Ding <i>et al.</i> , 2019; Liu, J. <i>et al.</i> , 2019a; Bruynseels <i>et al.</i> , 2018 e Schützer <i>et al.</i> , 2019   | Configurar o processamento dos dados  |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Ding <i>et al.</i> , 2019; Tao & Qi, 2019; Vachalek <i>et al.</i> , 2017 e Mukherjee & DebRoy, 2019   | Configurar os sensores do gêmeo digital   |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020 e Mukherjee & DebRoy, 2019   | Configurar as simulações do gêmeo digital, das quais podem envolver inteligência artificial (IA) e <i>machine learning</i> (ML) |

---

---

|   |   |
|---|---|
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Wang & Wu, 2020; Mukherjee & DebRoy, 2019; Zhang <i>et al.</i> , 2017a; Negri & Fumagalli & Macchi, 2017; Zheng <i>et al.</i> , 2019; Moyne & Iskandar, 2017; Knapp <i>et al.</i> , 2017; Debroy <i>et al.</i> , 2017; Alam & El Saddik, 2017; Lu & Xu, 2019; Ding <i>et al.</i> , 2019; Qi & Tao, 2018; Tao <i>et al.</i> , 2018a; Luo <i>et al.</i> , 2019; Tao & Zhang, 2017; Liu, J. <i>et al.</i> , 2019b; Zhuang & Liu & Xiong, 2018; Zhao <i>et al.</i> , 2019; Leng <i>et al.</i> , 2019a; Tao <i>et al.</i> , 2019b; Tao <i>et al.</i> , 2018b; Liu, Q. <i>et al.</i> , 2019; El Saddik, 2018; Cheng <i>et al.</i> , 2020; Liu, J. <i>et al.</i> , 2019a; Schluse <i>et al.</i> , 2018; He & Guo & Zheng, 2018; Weyer <i>et al.</i> , 2016; Zhou <i>et al.</i> , 2020; Tao & Qi, 2019; Lu & Xu, 2018; Abramovici <i>et al.</i> , 2016; Cai <i>et al.</i> , 2017; Vachalek <i>et al.</i> , 2017; Uhlemann & Lehmann & Steinhilper, 2018 e Söderberg <i>et al.</i> , 2017 | Configurar as simulações com os dados integrados para geração de melhorias e de dados para retroalimentação do processo |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020   | Configurar as simulações para gerar modularidade no processo  |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Mukherjee & DebRoy, 2019; Zhang <i>et al.</i> , 2017a; Negri & Fumagalli & Macchi, 2017; Zheng <i>et al.</i> , 2019; Moyne & Iskandar, 2017; Knapp <i>et al.</i> , 2017; Debroy <i>et al.</i> , 2017; Alam & El Saddik, 2017; Lu & Xu, 2019; Ding <i>et al.</i> , 2019; Qi & Tao, 2018; Tao <i>et al.</i> , 2018a; Luo <i>et al.</i> , 2019; Tao & Zhang, 2017; Liu, J. <i>et al.</i> , 2019b; Zhuang & Liu & Xiong, 2018; Zhao <i>et al.</i> , 2019; Leng <i>et al.</i> , 2019a; Tao <i>et al.</i> , 2019b; Tao <i>et al.</i> , 2018b; Liu, Q. <i>et al.</i> , 2019; El Saddik, 2018; Cheng <i>et al.</i> , 2020; Liu, J. <i>et al.</i> , 2019a; Schluse <i>et al.</i> , 2018; He & Guo & Zheng, 2018; Weyer <i>et al.</i> , 2016; Zhou <i>et al.</i> , 2020; Tao & Qi, 2019; Lu & Xu, 2018; Abramovici <i>et al.</i> , 2016; Cai <i>et al.</i> , 2017; Vachalek <i>et al.</i> , 2017; Uhlemann & Lehmann & Steinhilper, 2018 e Söderberg <i>et al.</i> , 2017                  | Configurar as simulações de teste   |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020; Rosen <i>et al.</i> , 2015; Gabor <i>et al.</i> , 2016; Cai <i>et al.</i> , 2017 e Tao, Cheng, <i>et al.</i> , 2018  | Configurar as simulações para análise de falhas   |
| Minerva & Lee & Crespi, 2020; Tao, Zhang, <i>et al.</i> , 2019 e Schützer <i>et al.</i> , 2019  | Configurar o uso de inteligência artificial para o processamento de dados   |
| Bickford <i>et al.</i> , 2020 e Vachalek <i>et al.</i> , 2017   | Convergir os dados de <i>output</i>   |

---

APÊNDICE D - DIMENSÕES DO GÊMEO DIGITAL POR ATIVIDADE

(Continua)

| Nível     | ID    | Atividade   | 8 Dimensões   |
|-----------|-------|---|---|
| Atividade | 1.1.1 | Identificar o propósito principal do gêmeo digital                                    | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.1.2 | Analisar o impacto do gêmeo digital   | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.1.3 | Identificar os algoritmos do gêmeo digital  | Inteligência CPS<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.1.4 | Identificar os tipos de entrada de dados gêmeo digital                                | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.1.5 | Identificar a localização do gêmeo digital  | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.1.6 | Definir a arquitetura do gêmeo digital  | Inteligência CPS<br>Modos de conectividade<br>Atualização da frequência<br>Comportamento do gêmeo digital<br>Amplitude de integração<br>Ciclo de vida do produto<br>Capacidade de simulação<br>Interação humana |
| Atividade | 1.1.7 | Identificar a fonte de dados do sistema para o gêmeo digital                          | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.1.8 | Identificar os requerimentos de armazenamento de dados                                | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.1.9 | Definir o segmento digital gêmeo digital  | Inteligência CPS<br>Amplitude de integração<br>Ciclo de vida do produto   |
| Atividade | 1.2.1 | Realizar <i>benchmark</i> para inspiração externa voltados para o gêmeo digital       | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.2.2 | Definir as ferramentas de <i>design</i> para o gêmeo digital                          | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.2.3 | Definir as ferramentas de simulações para o gêmeo digital                             | Capacidade de simulação<br>Ciclo de vida do produto   |
| Atividade | 1.2.4 | Mapear os elementos de dados para sensores do gêmeo digital                           | Modos de conectividade<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.2.5 | Integrar os modelos gêmeos digitais diferentes (Caso exista)                          | Modos de conectividade<br>Amplitude de integração<br>Ciclo de vida do produto   |
| Atividade | 1.3.1 | Integrar os requisitos do gêmeo digital ao <i>design</i> físico                       | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.3.2 | Definir as ferramentas de inteligência artificial (IA) e <i>machine learning (ML)</i> | Interação humana<br>Ciclo de vida do produto  |

(Continuação)

| Nível     | ID     | Atividade   | 8 Dimensões   |
|-----------|--------|---|---|
| Atividade | 1.3.3  | Definir a plataforma do gêmeo digital   | Inteligência CPS<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.3.4  | Definir o modelo de tomada de decisão do gêmeo digital  | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.3.5  | Definir os parâmetros a serem medidos   | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.3.6  | Preparar os dados de <i>output</i> e <i>input</i> do gêmeo digital  | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.3.7  | Preparar o modelo do gêmeo digital  | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.3.8  | Implementar a plataforma do gêmeo digital   | Inteligência CPS<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.3.9  | Analisar automaticamente os dados do sistema (exemplo: temperatura, umidade, velocidade da broca, tipo de broca etc.) | Atualização da frequência<br>Ciclo de vida do produto   |
| Atividade | 1.3.10 | Realizar as simulações para prevenção de falhas do gêmeo digital  | Capacidade de simulação<br>Ciclo de vida do produto   |
| Atividade | 1.3.11 | Testar o gêmeo digital com dados de teste   | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.3.12 | Desenvolver os modelos de <i>software</i> para o gêmeo digital  | Inteligência CPS<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 1.3.13 | Integrar o gêmeo digital com apoio das comunidades logísticas   | Inteligência CPS<br>Amplitude de integração<br>Interação humana<br>Ciclo de vida do produto   |
| Atividade | 2.1.1  | Realizar a prototipagem & implementação do gêmeo digital  | Inteligência CPS<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 2.1.2  | Coletar os dados do teste do gêmeo digital  | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 2.1.3  | Realizar a validação de dados do gêmeo digital  | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 2.1.4  | Construir o gêmeo digital   | Inteligência CPS<br>Modos de conectividade<br>Atualização da frequência<br>Comportamento do gêmeo digital<br>Amplitude de integração<br>Ciclo de vida do produto<br>Interação humana<br>Capacidade de simulação |
| Atividade | 2.1.5  | Analisar os códigos de falha da integração do sistema físico e digital  | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto  |

(Continuação)

| Nível     | ID     | Atividade  | 8 Dimensões  |
|-----------|--------|--|--|
| Atividade | 2.1.6  | Utilizar quase em tempo real do gêmeo digital durante o teste e validação                        | Inteligência CPS<br>Atualização da frequência<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 2.1.7  | Implementar o gêmeo digital integrado com ativo físico   | Amplitude de integração<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 2.1.8  | Implementar as ferramentas de desenvolvimento  | Inteligência CPS<br>Ciclo de vida do produto   |
| Atividade | 2.1.9  | Implementar as ferramentas de teste  | Inteligência CPS<br>Ciclo de vida do produto   |
| Atividade | 2.1.10 | Implementar as ferramentas de simulação  | Capacidade de simulação<br>Ciclo de vida do produto  |
| Atividade | 2.1.11 | Coletar os dados   | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto   |
| Atividade | 3.1.1  | Estocar os dados   | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto<br>Amplitude de integração<br>Modos de conectividade  |
| Atividade | 3.1.2  | Processar os dados   | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto<br>Interação humana<br>Amplitude de integração<br>Modos de conectividade<br>Capacidade de simulação |
| Atividade | 3.1.3  | Modificar os algoritmos do gêmeo digital conforme necessário e treinar novamente caso necessário | Inteligência CPS<br>Ciclo de vida do produto<br>Capacidade de simulação  |
| Atividade | 3.1.4  | Usar o gêmeo digital para suportar verificações de desempenho                                    | Inteligência CPS<br>Ciclo de vida do produto   |
| Atividade | 3.1.5  | Construir os conjuntos de dados de modelos do sistema gêmeo digital                              | Inteligência CPS<br>Ciclo de vida do produto   |
| Atividade | 3.1.6  | Analisar o gêmeo digital voltada para confiabilidade, manutenção e tomada de decisão             | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto<br>Capacidade de simulação  |
| Atividade | 3.1.7  | Selecionar e avaliar a qualidade, o tempo e os custos para o gêmeo digital                       | Comportamento do gêmeo digital<br>Ciclo de vida do produto   |
| Atividade | 3.1.8  | Retroalimentar os <i>insights + inputs</i> do usuário (tipo de material, operador, ferramenta)   | Amplitude de integração<br>Ciclo de vida do produto<br>Amplitude de integração<br>Modos de conectividade   |

(Continuação)

| Nível     | ID    | Atividade  | 8 Dimensões   |
|-----------|-------|--|---|
| Atividade | 3.1.9 | Atualizar o modelo gêmeo digital usando dados reais          | Inteligência CPS<br>Atualização da frequência<br>Ciclo de Vida do Produto<br>Amplitude de integração<br>Modos de conectividade<br>Interação humana<br>Amplitude de integração |
| Atividade | 4.1.1 | Usar a inteligência artificial para o processamento de dados | Inteligência CPS<br>Ciclo de vida do produto<br>Modos de conectividade<br>Comportamento do gêmeo digital<br>Capacidade de simulação   |

APÊNDICE E - MODELO DE REFERÊNCIA DO CICLO DE VIDA DO GÊMEO DIGITAL

(Continua)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>    | <b>Processo/Etapa/Atividade/Procedimento</b>   |
|------------------|--------------|--|
| <b>Processo</b>  | <b>1</b>     | <b>Criação</b>   |
| <b>Etapa</b>     | <b>1.1</b>   | <b>Mapeamento dos requisitos</b>   |
| <b>Atividade</b> | <b>1.1.1</b> | <b>Identificar o propósito principal do gêmeo digital</b>                            |
| Procedimento     | 1.1.1.1      | Definir método de avaliação do propósito do gêmeo digital                            |
| Procedimento     | 1.1.1.1.1    | Realizar a gestão de requisitos do gêmeo digital                                     |
| Procedimento     | 1.1.1.1.2    | Coletar requisitos do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.1.1.1.3    | Criar banco de dados de requisitos   |
| Procedimento     | 1.1.1.1.4    | Coletar requisitos no banco de dados   |
| Procedimento     | 1.1.1.1.5    | Classificar os requisitos  |
| Procedimento     | 1.1.1.1.6    | Criar relacionamento hierárquico entre categorias                                    |
| Procedimento     | 1.1.1.1.7    | Classificar requisitos utilizando o grupo de funções de classificação do sistema PLM |
| Procedimento     | 1.1.1.1.8    | Agrupar os requisitos  |
| Procedimento     | 1.1.1.1.9    | Relacionar requisitos com grupos de requisitos                                       |
| Procedimento     | 1.1.1.1.10   | Criar relacionamento hierárquico entre requisitos e grupos de requisitos             |
| Procedimento     | 1.1.1.1.11   | Avaliar os requisitos  |
| Procedimento     | 1.1.1.1.12   | Especificar os critérios de avaliação (qualitativos e/ou quantitativos)              |
| Procedimento     | 1.1.1.1.13   | Restringir preenchimento de critérios com opções pré-definidas (campo de seleção)    |
| Procedimento     | 1.1.1.1.14   | Definir pesos para os critérios  |
| Procedimento     | 1.1.1.1.15   | Realizar o processo de avaliação com apoio do sistema PLM                            |
| Procedimento     | 1.1.1.1.16   | Analisar os requisitos com uso de gráficos   |
| Procedimento     | 1.1.1.1.17   | Acompanhar a evolução dos requisitos   |
| Procedimento     | 1.1.1.1.18   | Registrar evolução dos requisitos comparando com baselines                           |
| Procedimento     | 1.1.1.1.19   | Relacionar requisitos com outros objetos do gerenciamento do ciclo de vida           |
| Procedimento     | 1.1.1.2      | Avaliar o público-alvo do uso do gêmeo digital e dos indicadores                     |
| Procedimento     | 1.1.1.3      | Especificar do objetivo geral e específico do gêmeo digital                          |
| Procedimento     | 1.1.1.4      | Analisar a viabilidade técnica-econômica do gêmeo digital                            |
| <b>Atividade</b> | <b>1.1.2</b> | <b>Analisar o impacto do gêmeo digital</b>   |
| Procedimento     | 1.1.2.1      | Analisar o impacto do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.1.2.1.1    | Analisar o impacto do gêmeo digital para o processo                                  |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>    | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>  |
|------------------|--------------|--|
| Procedimento     | 1.1.2.1.2    | Analisar o impacto do gêmeo digital para o produto   |
| Procedimento     | 1.1.2.1.1    | Analisar o impacto do gêmeo digital para o cliente   |
| Procedimento     | 1.1.2.2      | Realizar o plano de gestão da mudança do gêmeo digital dentro de todo o ciclo de vida do produto   |
| <b>Atividade</b> | <b>1.1.3</b> | <b>Identificar os Algoritmos do gêmeo digital</b>  |
| Procedimento     | 1.1.3.1      | Avaliar os algoritmos para o gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.1.3.2      | Configurar critérios de avaliação para os tipos de algoritmos  |
| Procedimento     | 1.1.3.3      | Especificar critérios de avaliação para os tipos de algoritmos   |
| Procedimento     | 1.1.3.4      | Definir os pesos para os critérios para os tipos de algoritmos   |
| Procedimento     | 1.1.3.5      | Realizar o processo de avaliação para os tipos de algoritmos   |
| Procedimento     | 1.1.3.6      | Documentar a justificar da escolha do modo de aplicação para os tipos de algoritmos  |
| Procedimento     | 1.1.3.7      | Relacionar o algoritmo escolhido com os modos de aplicações do gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.1.3.8      | Relacionar o algoritmo escolhido com os KPI's a serem gerados  |
| <b>Atividade</b> | <b>1.1.4</b> | <b>Identificar os tipos de entrada de dados do gêmeo digital</b>   |
| Procedimento     | 1.1.4.1      | Identificar os tipos de entrada de dados   |
| Procedimento     | 1.1.4.2      | Definir quais os tipos de integrações e os dados possíveis de integrar com o gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.1.4.2.1    | Coletar os dados possíveis de serem integrados entre os sistemas selecionados para integrarem com o gêmeo digital                                |
| Procedimento     | 1.1.4.2.2    | Categorizar os dados possíveis de serem integrados entre os sistemas selecionados para integrarem com o gêmeo digital                            |
| Procedimento     | 1.1.4.2.3    | Relacionar os dados possíveis de serem integrados com os tipos de integrações entre os sistemas selecionados para integrarem com o gêmeo digital |
| Procedimento     | 1.1.4.2.4    | Avaliar o relacionamento e as categorizações entre os tipos de integrações e os dados possíveis de integrar com o gêmeo digital                  |
| Procedimento     | 1.1.4.2.5    | Identificar os dados possíveis de serem integrados entre os sistemas selecionados para integrarem com o gêmeo digital                            |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>    | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>  |
|------------------|--------------|--|
| Procedimento     | 1.1.4.3      | Checar validade dos dados na entrada de dados  |
| <b>Atividade</b> | <b>1.1.5</b> | <b>Identificar a localização do gêmeo digital</b>  |
| Procedimento     | 1.1.5.1      | Avaliar o local para o gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.1.5.2      | Configurar critérios de avaliação para o local para o gêmeo digital                              |
| Procedimento     | 1.1.5.3      | Especificar critérios de avaliação para o local para o gêmeo digital                             |
| Procedimento     | 1.1.5.4      | Definir os pesos para os critérios para o local para o gêmeo digital                             |
| Procedimento     | 1.1.5.5      | Realizar o processo de avaliação para o local para o gêmeo digital                               |
| Procedimento     | 1.1.5.6      | Documentar a justificar da escolha do para o local para o gêmeo digital                          |
| Procedimento     | 1.1.5.8      | Relacionar o local escolhido com os KPI's a serem gerados  |
| <b>Atividade</b> | <b>1.1.6</b> | <b>Definir a arquitetura do gêmeo digital</b>  |
| Procedimento     | 1.1.6.1      | Definir arquitetura para o produto   |
| Procedimento     | 1.1.6.1.1    | Definir arquitetura de integração entre o gêmeo digital e o produto                              |
| Procedimento     | 1.1.6.1.2    | Analisar Sistemas, Subsistemas e Componentes (SSC)   |
| Procedimento     | 1.1.6.1.3    | Analisar como os Sistemas, Subsistemas e Componentes (SSC) vão interagir com o gêmeo digital     |
| Procedimento     | 1.1.6.2      | Definir ergonomia e estética do produto  |
| Procedimento     | 1.1.6.2.1    | Mapear quais pontos de ergonomia e estética do produto podem ser incorporados no gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.1.6.2.2    | Analisar quais pontos de ergonomia e estética do produto podem ser incorporados no gêmeo digital |
| Procedimento     | 1.1.6.2.3    | Avaliar quais pontos de ergonomia e estética do produto podem ser incorporados no gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.1.6.3      | Definir fornecedores e parcerias de desenvolvimento  |
| Procedimento     | 1.1.6.4      | Selecionar a concepção do produto e do gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.1.6.5      | Planejar o processo de manufatura macro  |
| Procedimento     | 1.1.6.6      | Definir plano macro dos processos  |
| Procedimento     | 1.1.6.6.1    | Analisar as integrações do processo de manufatura com o gêmeo digital                            |
| Procedimento     | 1.1.6.6.2    | Avaliar quais integrações do processo de manufatura serão conectadas com o gêmeo digital         |
| Procedimento     | 1.1.6.6.3    | Definir quais integrações do processo de manufatura serão conectadas com o gêmeo digital         |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>    | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>  |
|------------------|--------------|--|
| <b>Atividade</b> | <b>1.1.7</b> | <b>Identificar a fonte de dados do sistema para o gêmeo digital</b>  |
| Procedimento     | 1.1.7.1      | Definir quais serão as fontes de dados primária  |
| Procedimento     | 1.1.7.1.1    | Definir quais os dados serão extraídos da fonte de dados primária  |
| Procedimento     | 1.1.7.2      | Definir quais serão as fontes de dados secundária  |
| Procedimento     | 1.1.7.2.1    | Definir quais os dados serão extraídos da fonte de dados secundária  |
| Procedimento     | 1.1.7.3      | Relacionar as fontes de dados escolhida com os KPI's a serem gerados   |
| Procedimento     | 1.1.7.4      | Relacionar as fontes de dados escolhida com os indicadores de análise de falha   |
| <b>Atividade</b> | <b>1.1.8</b> | <b>Identificar os requerimentos de armazenamento de dados</b>  |
| Procedimento     | 1.1.8.1      | Definir a capacidade de armazenamento de dados   |
| Procedimento     | 1.1.8.2      | Definir o tipo de armazenamento de dados   |
| Procedimento     | 1.1.8.3      | Definir o local de armazenamento de dados  |
| Procedimento     | 1.1.8.4      | Definir o fluxo de armazenamento de dados  |
| <b>Atividade</b> | <b>1.1.9</b> | <b>Definir o segmento digital gêmeo digital</b>  |
| Procedimento     | 1.1.9.1      | Identificar as interfaces externas   |
| Procedimento     | 1.1.9.2      | Identificar a missão dos objetivos e das funcionalidades do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.1.9.3      | Identificar a integração entre os dados de <i>output</i> do gêmeo digital com os consumidores  |
| Procedimento     | 1.1.9.4      | Analisar o segmento digital considerando as integrações com outros sistemas, a missão, os objetivos e as funcionalidade do gêmeo digital |
| Procedimento     | 1.1.9.5      | Definir o segmento digital do gêmeo digital  |
| <b>Etapa</b>     | <b>1.2</b>   | <b><i>Design</i></b>   |
| <b>Atividade</b> | <b>1.2.1</b> | <b>Realizar <i>benchmark</i> para inspiração externa voltados para o gêmeo digital</b>   |
| Procedimento     | 1.2.1.1      | Mapear as tecnologias para o gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.2.1.2      | Coletar ideias de conexões tecnológicas para o gêmeo digital com base nos indicares a serem desenvolvidos                                |
| Procedimento     | 1.2.1.3      | Criar banco de dados de ideias sobre as conexões possíveis com o gêmeo digital, de modo que pode ser acessado por toda a empresa         |
| Procedimento     | 1.2.1.4      | Configurar campos de dados para a descrição das ideias sobre as conexões com o gêmeo digital   |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>    | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>  |
|------------------|--------------|--|
| Procedimento     | 1.2.1.5      | Coletar dados sobre as ideias das conexões do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.2.1.6      | Pesquisar ideias em banco de dados   |
| Procedimento     | 1.2.1.7      | Classificar as ideias das conexões com o gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.2.1.8      | Criar relacionamento hierárquico das conexões com o gêmeo digital                                  |
| Procedimento     | 1.2.1.9      | Criar relacionamento hierárquico entre categorias  |
| Procedimento     | 1.2.1.10     | Classificar as ideias  |
| Procedimento     | 1.2.1.11     | Restringir classificação de ideias de acordo com opções pré-definidas (campo de seleção)           |
| Procedimento     | 1.2.1.12     | Avaliar as conexões com o gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.2.1.13     | Configurar os critérios de avaliação   |
| Procedimento     | 1.2.1.14     | Especificar critérios de avaliação (quantitativos e/ou qualitativos)                               |
| Procedimento     | 1.2.1.15     | Definir os pesos para os critérios   |
| Procedimento     | 1.2.1.16     | Realizar o processo de avaliação   |
| Procedimento     | 1.2.1.17     | Comparar ideias graficamente (com 2 ou mais tipos de gráficos)                                     |
| Procedimento     | 1.2.1.18     | Documentar resultado de avaliação das ideias   |
| Procedimento     | 1.2.1.19     | Documentar a justificativa da escolha do modo de aplicação   |
| Procedimento     | 1.2.1.20     | Definir <i>status</i> para a ideia (Aprovada, em avaliação, rejeitada etc.)                        |
| Procedimento     | 1.2.1.21     | Apresentar resultado da avaliação em um ranking de ideias  |
| Procedimento     | 1.2.1.22     | Relacionar ideias com os modos de aplicações do gêmeo digital                                      |
| Procedimento     | 1.2.1.23     | Relacionar ideias com os KPI's a serem gerados   |
| <b>Atividade</b> | <b>1.2.2</b> | <b>Definir as ferramentas de <i>design</i> para o gêmeo digital</b>                                |
| Procedimento     | 1.2.2.1      | Definir se o gêmeo digital será digitalizado por inteiro ou parcial (comparado com o produto real) |
| Procedimento     | 1.2.2.2      | Definir quais os parâmetros e atributos do produto estarão no gêmeo digital                        |
| Procedimento     | 1.2.2.3      | Analisar se os parâmetros e atributos do gêmeo digital estão conectados ao produto                 |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>    | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>  |
|------------------|--------------|--|
| Procedimento     | 1.2.2.4      | Analisar se os parâmetros e atributos do gêmeo digital estão suprindo a necessidade total para os dados necessários para os KPI's              |
| <b>Atividade</b> | <b>1.2.3</b> | <b>Definir as ferramentas de simulações para o gêmeo digital</b>   |
| Procedimento     | 1.2.3.1      | Definir quais e quantas simulações serão realizadas com base no gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.2.3.2      | Definir quais os parâmetros e atributos serão utilizados nas simulações  |
| Procedimento     | 1.2.3.3      | Analisar se os parâmetros e atributos da simulação do gêmeo digital estão conectados ao produto  |
| Procedimento     | 1.2.3.4      | Analisar se os parâmetros e atributos da simulação do gêmeo digital estão mapeados no <i>design</i> para estarem no gêmeo digital              |
| Procedimento     | 1.2.3.5      | Analisar se os parâmetros e atributos da simulação do gêmeo digital estão suprindo a necessidade total para os dados necessários para os KPI's |
| <b>Atividade</b> | <b>1.2.4</b> | <b>Mapear os elementos de dados para sensores do gêmeo digital</b>   |
| Procedimento     | 1.2.4.1      | Avaliar as conexões possíveis de serem utilizadas no gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.2.4.2      | Definir qual tipo de conexão será interligada para cada parâmetro e atributo definido na etapa de <i>design</i>                                |
| Procedimento     | 1.2.4.3      | Analisar se os parâmetros e atributos da simulação do gêmeo digital estão sendo conectados por sensores  |
| Procedimento     | 1.2.4.4      | Analisar se os sensores definidos estão suprindo a necessidade total para os dados necessários para os KPI's                                   |
| Procedimento     | 1.2.4.5      | Analisar a durabilidade da conexão do gêmeo digital com base na durabilidade do ciclo de vida do produto                                       |
| <b>Atividade</b> | <b>1.2.5</b> | <b>Integrar os modelos gêmeo digital diferentes (Caso exista)</b>  |
| Procedimento     | 1.2.5.1      | Definir se o gêmeo digital será somente do produto ou se será do produto e do processo   |
| Procedimento     | 1.2.5.2      | Definir quais serão os parâmetros e atributos conectados entre os gêmeos digitais  |
| Procedimento     | 1.2.5.3      | Definir quais serão as conexões serão utilizadas para a conexão de dados entre os gêmeos digitais  |
| Procedimento     | 1.2.5.4      | Definir se a conexão dos dados entre os gêmeos digitais serão consideradas pelos KPI's   |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>    | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>   |
|------------------|--------------|---|
| <b>Etapa</b>     | <b>1.3</b>   | <b>Análise</b>  |
| <b>Atividade</b> | <b>1.3.1</b> | <b>Integrar os requisitos de gêmeo digital ao <i>design</i> físico</b>  |
| Procedimento     | 1.3.1.1      | Definir arquitetura para o produto  |
| Procedimento     | 1.3.1.2      | Definir arquitetura de integração entre o gêmeo digital e o produto   |
| Procedimento     | 1.3.1.3      | Analisar Sistemas, Subsistemas e Componentes (SSC)  |
| Procedimento     | 1.3.1.4      | Analisar como os Sistemas, Subsistemas e Componentes (SSC) vão interagir com o gêmeo digital                                  |
| Procedimento     | 1.3.1.5      | Definir ergonomia e estética do produto   |
| Procedimento     | 1.3.1.6      | Mapear quais pontos de ergonomia e estética do produto podem ser incorporados no gêmeo digital                                |
| Procedimento     | 1.3.1.7      | Analisar quais pontos de ergonomia e estética do produto podem ser incorporados no gêmeo digital                              |
| Procedimento     | 1.3.1.8      | Avaliar quais pontos de ergonomia e estética do produto podem ser incorporados no gêmeo digital                               |
| Procedimento     | 1.3.1.9      | Definir fornecedores e parcerias de codesenvolvimento   |
| Procedimento     | 1.3.1.10     | Selecionar a concepção do produto e do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.3.1.11     | Planejar o processo de manufatura macro   |
| Procedimento     | 1.3.1.12     | Definir plano macro dos processos   |
| Procedimento     | 1.3.1.13     | Analisar as integrações do processo de manufatura com o gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.3.1.14     | Avaliar quais integrações do processo de manufatura serão conectadas com o gêmeo digital                                      |
| Procedimento     | 1.3.1.15     | Definir quais integrações do processo de manufatura serão conectadas com o gêmeo digital                                      |
| Procedimento     | 1.3.1.15     | Definir quais requisitos estarão correlacionados com os KPI's   |
| <b>Atividade</b> | <b>1.3.2</b> | <b>Definir as ferramentas de inteligência artificial (IA) e <i>machine learning</i> (ML)</b>                                  |
| Procedimento     | 1.3.2.1      | Analisar quais integrações podem ser realizadas entre o gêmeo digital e a inteligência artificial e o <i>machine learning</i> |
| Procedimento     | 1.3.2.2      | Avaliar quais integrações podem ser realizadas entre o gêmeo digital e a inteligência artificial e o <i>machine learning</i>  |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>    | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>  |
|------------------|--------------|--|
| Procedimento     | 1.3.2.2      | Avaliar quais integrações podem ser realizadas entre o gêmeo digital e a inteligência artificial e o <i>machine learning</i> |
| Procedimento     | 1.3.2.3      | Definir quais integrações podem ser realizadas entre o gêmeo digital e a inteligência artificial e o <i>machine learning</i> |
| Procedimento     | 1.3.2.4      | Definir quais KPI's estarão relacionados com esta integração   |
| <b>Atividade</b> | <b>1.3.3</b> | <b>Definir a plataforma do gêmeo digital</b>   |
| Procedimento     | 1.3.3.1      | Realizar um <i>benchmark</i> de quais são os sistemas/plataformas disponíveis para a instalação do gêmeo digital             |
| Procedimento     | 1.3.3.1      | Analisar os sistemas disponíveis para a instalação do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.3.3.1      | Avaliar os sistemas disponíveis para a instalação do gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.3.3.1      | Definir qual o sistema será utilizado para a instalação do gêmeo digital   |
| <b>Atividade</b> | <b>1.3.4</b> | <b>Definir o modelo de tomada de decisão gêmeo digital</b>   |
| Procedimento     | 1.3.4.1      | Realizar um <i>benchmark</i> de modelo de tomada de decisão para o gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.3.4.2      | Analisar os modelos de tomada de decisão do <i>benchmark</i> e já utilizados dentro do processo                              |
| Procedimento     | 1.3.4.3      | Avaliar os modelos de tomada de decisão  |
| Procedimento     | 1.3.4.4      | Definir qual o modelo de tomada de decisão será utilizado  |
| <b>Atividade</b> | <b>1.3.5</b> | <b>Definir os parâmetros a serem medidos</b>   |
| Procedimento     | 1.3.5.1      | Selecionar os parâmetros necessários para os KPI's previamente definidos   |
| Procedimento     | 1.3.5.2      | Especificar os critérios de avaliação (qualitativos e/ou quantitativos) para os parâmetros                                   |
| Procedimento     | 1.3.5.3      | Restringir preenchimento de critérios com opções pré-definidas (campo de seleção)  |
| Procedimento     | 1.3.5.4      | Definir pesos para os critérios de seleção   |
| Procedimento     | 1.3.5.5      | Realizar o processo de avaliação dos parâmetros  |
| Procedimento     | 1.3.5.6      | Registrar os parâmetros escolhidos   |
| Procedimento     | 1.3.5.7      | Mapear os parâmetros escolhidos com os KPI's   |
| <b>Atividade</b> | <b>1.3.6</b> | <b>Preparar os dados de <i>output</i> e <i>input</i> do gêmeo digital</b>  |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>  | <b>ID</b>  | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>   |
|--------------|------------|---|
| Procedimento | 1.3.6.1.1  | Analisar os dados de <i>input</i> do gêmeo digital com base nas conexões              |
| Procedimento | 1.3.6.1.2  | Avaliar os dados de <i>input</i> do gêmeo digital com base nas conexões               |
| Procedimento | 1.3.6.1.3  | Definir os dados de <i>input</i> do gêmeo digital com base nas conexões               |
| Procedimento | 1.3.6.1.4  | Analisar os dados de <i>input</i> do gêmeo digital com base nos parâmetros definidos  |
| Procedimento | 1.3.6.1.5  | Avaliar os dados de <i>input</i> do gêmeo digital com base nos parâmetros definidos   |
| Procedimento | 1.3.6.1.6  | Definir os dados de <i>input</i> do gêmeo digital com base nos parâmetros definidos   |
| Procedimento | 1.3.6.1.7  | Analisar os dados de <i>input</i> do gêmeo digital com base nos KPI's                 |
| Procedimento | 1.3.6.1.8  | Avaliar os dados de <i>input</i> do gêmeo digital com base nos KPI's                  |
| Procedimento | 1.3.6.1.9  | Definir os dados de <i>input</i> do gêmeo digital com base nos KPI's                  |
| Procedimento | 1.3.6.1.10 | Avaliar a correlação entres os dados de <i>inputs</i> do KPI's, parâmetros e conexões |
| Procedimento | 1.3.6.2.1  | Analisar os dados de <i>output</i> do gêmeo digital com base nas conexões             |
| Procedimento | 1.3.6.2.2  | Avaliar os dados de <i>output</i> do gêmeo digital com base nas conexões              |
| Procedimento | 1.3.6.2.3  | Definir os dados de <i>output</i> do gêmeo digital com base nas conexões              |
| Procedimento | 1.3.6.2.4  | Analisar os dados de <i>output</i> do gêmeo digital com base nos parâmetros definidos |
| Procedimento | 1.3.6.2.5  | Avaliar os dados de <i>output</i> do gêmeo digital com base nos parâmetros definidos  |
| Procedimento | 1.3.6.2.6  | Definir os dados de <i>output</i> do gêmeo digital com base nos parâmetros definidos  |
| Procedimento | 1.3.6.2.7  | Analisar os dados de <i>output</i> do gêmeo digital com base nos KPI's                |
| Procedimento | 1.3.6.2.8  | Avaliar os dados de <i>output</i> do gêmeo digital com base nos KPI's                 |
| Procedimento | 1.3.6.2.9  | Definir os dados de <i>output</i> do gêmeo digital com base nos KPI's                 |
| Procedimento | 1.3.6.2.10 | Avaliar a correlação entres os dados de <i>output</i> do KPI's, parâmetros e conexões |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>     | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>  |
|------------------|---------------|--|
| Procedimento     | 1.3.6.3.1     | Avaliar a correlação entre os dados de <i>input</i> e <i>output</i>  |
| Procedimento     | 1.3.6.3.2     | Definir os dados de <i>input</i> e <i>output</i> do gêmeo digital  |
| <b>Atividade</b> | <b>1.3.7</b>  | <b>Preparar o modelo</b> do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.3.7.1       | Realizar da compra da plataforma/sistema do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.3.7.2       | Realizar da compra do sistema de inteligência artificial   |
| Procedimento     | 1.3.7.3       | Realizar da compra do sistema de <i>machine learning</i>   |
| Procedimento     | 1.3.7.4       | Realizar da compra dos sensores  |
| Procedimento     | 1.3.7.5       | Mapear os locais para a instalação do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.3.7.6       | Analisar os locais para a instalação do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.3.7.7       | Avaliar os locais para a instalação do gêmeo digital   |
| <b>Atividade</b> | <b>1.3.8</b>  | <b>Implementar a plataforma do gêmeo digital</b>   |
| Procedimento     | 1.3.8.1       | Implementar a plataforma/sistema do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.3.8.2       | Implementar o sistema de inteligência artificial   |
| Procedimento     | 1.3.8.3       | Implementar o sistema de <i>machine learning</i>   |
| Procedimento     | 1.3.8.4       | Implementar os sensores  |
| Procedimento     | 1.3.8.5       | Realizar a integração entre os sistemas e as conexões  |
| <b>Atividade</b> | <b>1.3.9</b>  | <b>Analisar automaticamente os dados do sistema (exemplo: temperatura, umidade, velocidade da broca, tipo de broca etc.)</b> |
| Procedimento     | 1.3.9.1       | Realizar a análise dados <i>input</i> do gêmeo digital manualmente   |
| Procedimento     | 1.3.9.2       | Avaliar os dados <i>input</i> do gêmeo digital manualmente   |
| Procedimento     | 1.3.9.3       | Realizar a análise dados <i>output</i> do gêmeo digital manualmente  |
| Procedimento     | 1.3.9.4       | Avaliar os dados <i>output</i> do gêmeo digital manualmente  |
| Procedimento     | 1.3.9.5       | Validar os dados de <i>input</i> e <i>output</i>   |
| Procedimento     | 1.3.9.6       | Automatizar os dados de <i>input</i> e <i>output</i> do sistema  |
| <b>Atividade</b> | <b>1.3.10</b> | <b>Realizar as simulações para prevenção de falhas do gêmeo digital</b>  |
| Procedimento     | 1.3.10.1      | Mapear os indicadores de análise de falhas do gêmeo digital em relação as conexões   |
| Procedimento     | 1.3.10.2      | Mapear os indicadores de análise de falhas do gêmeo digital em relação aos sistemas legados                                  |
| Procedimento     | 1.3.10.3      | Mapear os indicadores de análise de falhas do gêmeo digital em relação as simulações   |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>     | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>  |
|------------------|---------------|--|
| Procedimento     | 1.3.10.4      | Correlacionar os indicadores de análise de falha em relação do gêmeo digital, aos sistemas legados e as conexões                             |
| Procedimento     | 1.3.10.5      | Avaliar os indicadores de análise de falha em relação do gêmeo digital, aos sistemas legados e as conexões                                   |
| Procedimento     | 1.3.10.6      | Realizar as simulações de prevenção de falha do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.3.10.7      | Analisar as simulações de prevenção de falha do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.3.10.8      | Avaliar as simulações de prevenção de falha do gêmeo digital   |
| <b>Atividade</b> | <b>1.3.11</b> | <b>Testar o gêmeo digital com dados de teste</b>   |
| Procedimento     | 1.3.11.1      | Mapear os testes para validação do gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.3.11.2      | Analisar os testes para validação do gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.3.11.3      | Validar os testes para validação do gêmeo digital  |
| <b>Atividade</b> | <b>1.3.12</b> | <b>Desenvolver os modelos de <i>software</i> para o gêmeo digital</b>  |
| Procedimento     | 1.3.12.1      | Realizar um <i>benchmark</i> de quais são os <i>softwares</i> para a instalação do gêmeo digital   |
| Procedimento     | 1.3.12.2      | Analisar os <i>softwares</i> para a instalação do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 1.3.12.3      | Avaliar os <i>softwares</i> para a instalação do gêmeo digital com base nos requisitos e necessidade de conexões com outros sistemas legados |
| Procedimento     | 1.3.12.4      | Definir os <i>softwares</i> para a instalação do gêmeo digital   |
| <b>Atividade</b> | <b>1.3.13</b> | <b>Integrar o gêmeo digital com apoio das comunidades logísticas</b>   |
| Procedimento     | 1.3.13.1      | Mapear as possíveis integrações entre o gêmeo digital e as comunidades logísticas  |
| Procedimento     | 1.3.13.2      | Analisar as possíveis integrações entre o gêmeo digital e as comunidades logísticas  |
| Procedimento     | 1.3.13.3      | Avaliar as possíveis integrações entre o gêmeo digital e as comunidades logísticas   |
| Procedimento     | 1.3.13.4      | Definir as integrações entre o gêmeo digital e as comunidades logísticas   |
| Procedimento     | 1.3.13.5      | Implementar as integrações entre o gêmeo digital e as comunidades logísticas   |
| Procedimento     | 1.3.13.6      | Integrar as integrações entre o gêmeo digital e as comunidades logísticas nas análises de teste  |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>    | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>   |
|------------------|--------------|---|
| <b>Processo</b>  | <b>2</b>     | <b>Produção</b>   |
| <b>Etapa</b>     | <b>2.1</b>   | <b>Implementação</b>  |
| <b>Atividade</b> | <b>2.1.1</b> | <b>Realizar a prototipagem &amp; Implementação do gêmeo digital</b>   |
| Procedimento     | 2.1.1.1      | Analisar a descrição técnica da construção do gêmeo digital (com os dados a serem conectados entre o mundo físico e digital)            |
| Procedimento     | 2.1.1.2      | Realizar a prototipagem do gêmeo digital com base na descrição técnica da construção  |
| Procedimento     | 2.1.1.3      | Implementar o protótipo das simulações, interfaces, linguagens e conexões necessários para o teste do gêmeo digital                     |
| <b>Atividade</b> | <b>2.1.2</b> | <b>Coletar os dados do teste do gêmeo digital</b>   |
| Procedimento     | 2.1.2.1      | Realizar a coleta de dados de teste dos parâmetros e atributos do gêmeo digital   |
| Procedimento     | 2.1.2.2      | Realizar a coleta de dados de teste das simulações do gêmeo digital   |
| Procedimento     | 2.1.2.3      | Realizar a coleta de dados de teste da integração entre os gêmeos digitais do processo e do produto                                     |
| <b>Atividade</b> | <b>2.1.3</b> | <b>Realizar a validação de dados do gêmeo digital</b>   |
| Procedimento     | 2.1.3.1      | Analisar a coleta de dados de teste dos parâmetros e atributos do gêmeo digital   |
| Procedimento     | 2.1.3.2      | Avaliar a coleta de dados de teste dos parâmetros e atributos do gêmeo digital com base nos requisitos e nos KPI's                      |
| Procedimento     | 2.1.3.3      | Analisar a coleta de dados de teste das simulações do gêmeo digital   |
| Procedimento     | 2.1.3.4      | Analisar a coleta de dados de teste das simulações do gêmeo digital com base nos requisitos e nos KPI's                                 |
| Procedimento     | 2.1.3.5      | Analisar a coleta de dados de teste da integração entre os gêmeos digitais do processo e do produto                                     |
| Procedimento     | 2.1.3.6      | Analisar a coleta de dados de teste da integração entre os gêmeos digitais do processo e do produto com base nos requisitos e nos KPI's |
| <b>Atividade</b> | <b>2.1.4</b> | <b>Construir o gêmeo digital</b>  |
| Procedimento     | 2.1.4.1      | Analisar a descrição técnica da construção técnica do gêmeo digital (com os dados a serem conectados entre o mundo físico e digital)    |
| Procedimento     | 2.1.4.2      | Implementar os componentes do gêmeo digital   |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>    | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>   |
|------------------|--------------|---|
| Procedimento     | 2.1.4.3      | Implementar as conexões utilizadas para a interface tecnologia entre os diferentes programas    |
| Procedimento     | 2.1.4.4      | Implementar a linguagem e as interfaces finais para os usuários do programa do gêmeo digital    |
| Procedimento     | 2.1.4.5      | Implementar as interfaces tecnológica do processo com o gêmeo digital                           |
| Procedimento     | 2.1.4.6      | Implementar as simulações planejadas  |
| Procedimento     | 2.1.4.7      | Implementar a integração entre os gêmeos digitais do processo e do produto (caso existam)       |
| Procedimento     | 2.1.4.8      | Utilizar o sistema do gêmeo digital em tempo real   |
| <b>Atividade</b> | <b>2.1.5</b> | <b>Analisar os códigos de falha da integração do sistema físico e digital</b>                   |
| Procedimento     | 2.1.5.1      | Mapear os códigos de falhas da integração entre os dados do gêmeo digital e do produto físico   |
| Procedimento     | 2.1.5.2      | Analisar os códigos de falhas da integração entre os dados do gêmeo digital e do produto físico |
| Procedimento     | 2.1.5.3      | Avaliar os códigos de falhas da integração entre os dados do gêmeo digital e do produto físico  |
| Procedimento     | 2.1.5.4      | Definir quais melhorias serão retroalimentadas no sistema                                       |
| <b>Atividade</b> | <b>2.1.6</b> | <b>Utilizar quase em tempo real do gêmeo digital durante o teste e validação</b>                |
| Procedimento     | 2.1.6.1      | Mapear os códigos de falhas da integração entre os dados do gêmeo digital e do produto físico   |
| Procedimento     | 2.1.6.2      | Analisar os códigos de falhas da integração entre os dados do gêmeo digital e do produto físico |
| Procedimento     | 2.1.6.3      | Avaliar os códigos de falhas da integração entre os dados do gêmeo digital e do produto físico  |
| Procedimento     | 2.1.6.4      | Definir quais melhorias serão retroalimentadas no sistema                                       |
| <b>Atividade</b> | <b>2.1.7</b> | <b>Implementar o gêmeo digital integrado com Ativo Físico</b>                                   |
| Procedimento     | 2.1.7.1      | Instalar do sistema do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 2.1.7.2      | Realizar a conexão entre o produto físico e o gêmeo digital                                     |
| Procedimento     | 2.1.7.3      | Extrair os dados do produto para o sistema do gêmeo digital                                     |
| Procedimento     | 2.1.7.4      | Integrar o sistema do gêmeo digital com os outros sistemas selecionado (MES, ERP, CRM e outros) |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>     | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>   |
|------------------|---------------|---|
| Procedimento     | 2.1.7.4       | Integrar o sistema do gêmeo digital com os outros sistemas selecionado (MES, ERP, CRM e outros)                                 |
| Procedimento     | 2.1.7.5       | Configurar o sistema do gêmeo digital (com os dados de <i>input</i> do produto e os dados resultantes da integração do sistema) |
| Procedimento     | 2.1.7.6       | Exibir os resultados da configuração  |
| Procedimento     | 2.1.7.7       | Mapeamento das lições aprendidas durante a etapa do projeto informacional   |
| <b>Atividade</b> | <b>2.1.8</b>  | <b>Implementar as ferramentas de desenvolvimento</b>  |
| Procedimento     | 2.1.8.1       | Mapear as ferramentas para a melhoria contínua do gêmeo digital   |
| Procedimento     | 2.1.8.2       | Avaliar as ferramentas para a melhoria contínua do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 2.1.8.3       | Implementar as ferramentas para a melhoria contínua do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 2.1.8.4       | Integrar as ferramentas para a melhoria contínua do gêmeo digital e do produto físico   |
| <b>Atividade</b> | <b>2.1.9</b>  | <b>Implementar as ferramentas de teste</b>  |
| Procedimento     | 2.1.9.1       | Mapear as ferramentas de teste para o gêmeo digital   |
| Procedimento     | 2.1.9.2       | Avaliar as ferramentas de teste para o gêmeo digital  |
| Procedimento     | 2.1.9.3       | Implementar as ferramentas de teste para o gêmeo digital  |
| Procedimento     | 2.1.9.4       | Integrar as ferramentas de teste para o gêmeo digital e do produto físico   |
| <b>Atividade</b> | <b>2.1.10</b> | <b>Implementar as Ferramentas de simulação</b>  |
| Procedimento     | 2.1.10.1      | Mapear as ferramentas de simulação para o gêmeo digital   |
| Procedimento     | 2.1.10.2      | Avaliar as ferramentas de simulação para o gêmeo digital  |
| Procedimento     | 2.1.10.3      | Implementar as ferramentas de simulação para o gêmeo digital  |
| Procedimento     | 2.1.10.4      | Integrar as ferramentas de simulação para o gêmeo digital e do produto físico   |
| <b>Atividade</b> | <b>2.1.11</b> | <b>Coletar os dados</b>   |
| Procedimento     | 2.1.11.1      | Coletar os dados possíveis de serem integrados entre os sistemas selecionados para integrarem com o gêmeo digital               |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>    | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>  |
|------------------|--------------|--|
| Procedimento     | 2.1.11.2     | Categorizar os dados possíveis de serem integrados entre os sistemas selecionados para integrarem com o gêmeo digital                            |
| Procedimento     | 2.1.11.3     | Relacionar os dados possíveis de serem integrados com os tipos de integrações entre os sistemas selecionados para integrarem com o gêmeo digital |
| Procedimento     | 2.1.11.4     | Avaliar o relacionamento e as categorizações entre os tipos de integrações e os dados possíveis de integrar com o gêmeo digital                  |
| Procedimento     | 2.1.11.5     | Definir quais os tipos de integrações e os dados possíveis de integrar com o gêmeo digital   |
| <b>Processo</b>  | <b>3</b>     | <b>Operação</b>  |
| <b>Etapa</b>     | <b>3.1</b>   | <b>Verificação</b>   |
| <b>Atividade</b> | <b>3.1.1</b> | <b>Coletar e estocar dos dados</b>   |
| Procedimento     | 3.1.1.1      | Realizar a integração entre os dados coletados e o armazenamento dos dados entre o sistema físico e o digital                                    |
| Procedimento     | 3.1.1.2      | Realizar a integração entre os dados coletados e o armazenamento dos dados entre os sistemas legados e o digital                                 |
| <b>Atividade</b> | <b>3.1.2</b> | <b>Processar os dados</b>  |
| Procedimento     | 3.1.2.1      | Analisar os dados coletados em todas as etapas do ciclo de vida do produto digital   |
| Procedimento     | 3.1.2.2      | Processar os dados visando a extração de <i>outputs</i> para o produto físico  |
| Procedimento     | 3.1.2.3      | Processar os dados visando a extração de <i>outputs</i> para o produto digital   |
| Procedimento     | 3.1.2.4      | Processar os dados visando a extração de <i>outputs</i> para o processo  |
| Procedimento     | 3.1.2.5      | Correlacionar os dados processados   |
| Procedimento     | 3.1.2.6      | Avaliar os dados processados   |
| Procedimento     | 3.1.2.7      | Retroalimentar o sistema com os dados processados  |
| <b>Atividade</b> | <b>3.1.3</b> | <b>Modificar os algoritmos gêmeo digital conforme necessário e treinar novamente caso necessário</b>   |
| Procedimento     | 3.1.3.1      | Avaliar os algoritmos utilizados no gêmeo digital  |
| Procedimento     | 3.1.3.2      | Retroalimentar os algoritmos utilizados no gêmeo digital   |
| Procedimento     | 3.1.3.3      | Testar os algoritmos retroalimentados  |
| <b>Atividade</b> | <b>3.1.4</b> | <b>Usar o gêmeo digital para suportar verificações de desempenho</b>   |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>    | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>   |
|------------------|--------------|---|
| Procedimento     | 3.1.4.1      | Analisar quais indicadores de desempenho podem ser suportados pelos dados de <i>output</i> do gêmeo digital         |
| Procedimento     | 3.1.4.2      | Avaliar a viabilidade técnica da conexão dos dados de <i>output</i> do gêmeo digital e os indicadores de desempenho |
| Procedimento     | 3.1.4.3      | Realizar a conexão dos dados de <i>output</i> do gêmeo digital e os indicadores de desempenho                       |
| <b>Atividade</b> | <b>3.1.5</b> | <b>Construir os conjuntos de dados de modelos do sistema gêmeo digital</b>  |
| Procedimento     | 3.1.5.1      | Realizar a extração dos dados de todos os parâmetros e atributos do gêmeo digital                                   |
| Procedimento     | 3.1.5.2      | Realizar a análise crítica de todos dados extraídos em conjunto com os master datas                                 |
| Procedimento     | 3.1.5.3      | Avaliar a utilização dos dados para a retroalimentação no produto físico  |
| Procedimento     | 3.1.5.4      | Avaliar a utilização dos dados para a retroalimentação no produto digital   |
| Procedimento     | 3.1.5.5      | Avaliar a utilização dos dados para a retroalimentação nos KPI's  |
| <b>Atividade</b> | <b>3.1.6</b> | <b>Analisar o gêmeo digital voltada para confiabilidade, manutenção e tomada de decisão</b>                         |
| Procedimento     | 3.1.6.1.1    | Definir métodos de gerenciamento de confiabilidade  |
| Procedimento     | 3.1.6.1.2    | Aplicar métodos de gerenciamento de confiabilidade  |
| Procedimento     | 3.1.6.1.3    | Gerenciar meios de medição de confiabilidade  |
| Procedimento     | 3.1.6.2.1    | Configurar banco de dados de recursos de manutenção   |
| Procedimento     | 3.1.6.2.2    | Gerar ordens de manutenção  |
| Procedimento     | 3.1.6.2.3    | Gerenciar ocupação dos recursos de manutenção   |
| Procedimento     | 3.1.6.2.4    | Registrar indicadores de manutenção por produto e/ou por cliente  |
| Procedimento     | 3.1.6.2.5    | Executar a manutenção   |
| Procedimento     | 3.1.6.2.6    | Registrar alterações na configuração dos produtos e do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 3.1.6.2.7    | Registrar conclusão das ordens de manutenção  |
| Procedimento     | 3.1.6.2.8    | Registrar conhecimentos e experiências geradas na manutenção  |
| Procedimento     | 3.1.6.2.9    | Registrar lições aprendidas   |
| Procedimento     | 3.1.6.3.1    | Definir métodos de gerenciamento de tomada de decisão   |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>      | <b>ID</b>    | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>   |
|------------------|--------------|---|
| Procedimento     | 3.1.6.3.2    | Aplicar métodos de gerenciamento de tomada de decisão   |
| Procedimento     | 3.1.6.3.3    | Gerenciar meios de medição de tomada de decisão   |
| <b>Atividade</b> | <b>3.1.7</b> | <b>Selecionar e avaliar a qualidade, o tempo e os custos para o gêmeo digital</b>   |
| Procedimento     | 3.1.7.1.1    | Definir métodos de qualidade  |
| Procedimento     | 3.1.7.1.2    | Aplicar métodos de qualidade  |
| Procedimento     | 3.1.7.1.3    | Gerenciar meios de medição de qualidade   |
| Procedimento     | 3.1.7.1.4    | Definir amostras de controle de qualidade   |
| Procedimento     | 3.1.7.2.1    | Definir métodos de gerenciamento de tempo   |
| Procedimento     | 3.1.7.2.2    | Aplicar métodos de gerenciamento de tempo   |
| Procedimento     | 3.1.7.2.3    | Gerenciar meios de medição de tempo   |
| Procedimento     | 3.1.7.3.1    | Definir métodos de gerenciamento de custos  |
| Procedimento     | 3.1.7.3.2    | Aplicar métodos de gerenciamento de custos  |
| Procedimento     | 3.1.7.3.3    | Gerenciar meios de medição de custos  |
| <b>Atividade</b> | <b>3.1.8</b> | <b>Retroalimentar os insights + <i>inputs</i> do usuário (tipo de material, operador, ferramenta)</b>   |
| Procedimento     | 3.1.8.1      | Registrar os <i>inputs</i> dos usuários   |
| Procedimento     | 3.1.8.2      | Analisar os <i>inputs</i> dos usuários  |
| Procedimento     | 3.1.8.3      | Relacionar os resultados obtidos pelos <i>inputs</i> dos usuários com os KPI's  |
| Procedimento     | 3.1.8.4      | Revisar e Atualizar o Escopo do Produto e do gêmeo digital  |
| Procedimento     | 3.1.8.5      | Revisar o ciclo de vida do produto e do gêmeo digital   |
| <b>Atividade</b> | <b>3.1.9</b> | <b>Atualizar o modelo gêmeo digital usando dados reais</b>  |
| Procedimento     | 3.1.9.1      | Analisar se os dados de <i>inputs</i> dos usuários devem ser integrados pelo gêmeo digital  |
| Procedimento     | 3.1.9.2      | Atualizar o modelo do gêmeo digital com os dados de <i>inputs</i> dos usuários  |
| <b>Processo</b>  | <b>4</b>     | <b>Reciclagem</b>   |
| <b>Etapa</b>     | <b>4.1</b>   | <b>Output dos dados</b>   |
| <b>Atividade</b> | <b>4.1.1</b> | <b>Usar a inteligência artificial para o processamento de dados</b>   |
| Procedimento     | 4.1.1.1      | Copilar os dados do gêmeo digital de todas as etapas do ciclo de vida do produto por meio do uso de inteligência artificial para o processamento de dados |
| Procedimento     | 4.1.1.2      | Avaliar os dados do gêmeo digital de todas as etapas do ciclo de vida do produto  |

(Continuação)

| <b>Tipo</b>  | <b>ID</b> | <b>Etapa/Atividade/Procedimento</b>  |
|--------------|-----------|--|
| Procedimento | 4.1.1.3   | Mapear os dados do gêmeo digital de todas as etapas do ciclo de vida do produto para o plano de metas do gêmeo digital |
| Procedimento | 4.1.1.4   | Copilar os mapeamentos de lições aprendidas nas etapas anteriores  |
| Procedimento | 4.1.1.5   | Avaliar as lições aprendidas copiladas   |
| Procedimento | 4.1.1.6   | Planejar as ações de melhoria com base nas lições aprendidas   |
| Procedimento | 4.1.1.7   | Planejar as discontinuidades do gêmeo digital  |
| Procedimento | 4.1.1.8   | Avaliar e encerrar o projeto   |