



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS

**UTILIZAÇÃO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS BASEADA EM
MODELOS PARA A IMPLANTAÇÃO DE GÊMEOS DIGITAIS EM
SISTEMA DE MANUFATURA**

Yasmin Yunes Salles Gaudard

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica

Brasília

2023

Yasmin Yunes Salles Gaudard

**UTILIZAÇÃO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS BASEADA EM
MODELOS PARA A IMPLANTAÇÃO DE GÊMEOS DIGITAIS EM
SISTEMA DE MANUFATURA**

Dissertação de Mestrado submetida ao programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas Mecatrônicos.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 15 de dezembro de 2023.

Prof. Dr. Jones Yudi Mori Alves da Silva, UnB/ PPMEC
Orientador

Prof. Dra. Andrea Cristina dos Santos, UnB/ EPR
Membro Convidado 1

Prof. Dr. Regis Scalice/ UFSC
Membro Convidado 2

Brasília, DF
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Yunes Salles Gaudard, Yasmin

Utilização de Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos para a implantação de Gêmeos Digitais em Sistema de Manufatura / Yasmin Yunes Salles Gaudard; orientador Jonas Yudi. – Brasília, 2023.

76 p.

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. – Universidade de Brasília, 2019. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Arcadia. 2. Digital Twin. 3. Indústria 4.0. 4. MBSE. I Yudi, Jonas. II. Departamento de Engenharia Mecânica. /FT/UnB

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

GAUDARD, Y.Y.S., (2023). Utilização de Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos para a implantação de Gêmeos Digitais em Sistema de Manufatura. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 76 p

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Yasmin Yunes Salles Gaudard

TÍTULO: Utilização de Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos para a implantação de Gêmeos Digitais em Sistema de Manufatura

GRAU: Mestre

ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Trabalho de Graduação pode ser reproduzida nem modificada sem autorização por escrito do autor.

RESUMO

O objetivo deste projeto foi conceber uma estrutura que guie a implementação de Gêmeos Digitais em Sistemas de Manufatura, empregando a Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos. Visando respaldar a evolução tecnológica do Laboratório Aberto de Brasília (LAB), um ambiente colaborativo de aprendizado ativo e multidisciplinar focado em prototipagem. O LAB busca a implementação de Gêmeos Digitais (DT) em diferentes níveis de abstração de seu sistema de manufatura, visando apresentar diversas perspectivas do ambiente industrial, abrangendo equipamentos, processos, pessoas e produtos. Um DT é comumente definido como uma representação virtual de um objeto físico ou processo, permitindo simulações ultrarrealistas de modelos físicos, capturando dados históricos e processamento/monitoramento em tempo real. A sua composição multitecnológica, representa um desafio a sua implementação. Nesse contexto, foi proposto um esquema respaldado pela Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE), considerada uma abordagem mais adequada para aplicações ligadas a sistemas complexos. Além disso, a ISO 23247, que fornece diretrizes para a utilização de Gêmeos Digitais em ambientes industriais, serviu como fonte de requisitos para a estrutura proposta. O método desta pesquisa seguiu as etapas de compreensão do contexto, levantamento de atributos para o *framework* de implementação de um DT apoiado pela MBSE, validação desses atributos, definição do modelo final e sua aplicação no LAB. A partir da modelagem do sistema em vários níveis que foi realizada com o método MBSE Arcadia, por meio da ferramenta gratuita Capella. Os resultados alcançados incluem o Modelo para a implementação de um DT de múltiplos escopos e a arquitetura preliminar do sistema de interesse, identificando os atores envolvidos no cenário escolhido, suas funcionalidades e o fluxo de interação entre todos os componentes. Isso permitirá futuras simulações e análises em um único quadro, considerando o sistema como um todo, e não subsistemas isolados.

Palavras Chave: Gêmeo Digital; MBSE; Arcadia; Capella; Indústria 4.0

ABSTRACT

The objective of this project was to devise a framework guiding the implementation of Digital Twins in Manufacturing Systems, employing Model-Based Systems Engineering. This aims to support the technological evolution of the Open Laboratory of Brasília (LAB), a collaborative environment focused on active and multidisciplinary learning with a primary focus on prototyping. LAB seeks to implement Digital Twins (DT) at different levels of abstraction within its manufacturing system, aiming to present diverse perspectives of the industrial environment, encompassing equipment, processes, people, and products. A DT is commonly defined as a virtual representation of a physical object or process, enabling ultra-realistic simulations of physical models, capturing historical data, and processing/monitoring in real-time. Its multitechnological composition poses a challenge to its implementation. In this context, a scheme supported by Model-Based Systems Engineering (MBSE) was proposed, considered a more suitable approach for applications related to complex systems. Additionally, ISO 23247, which provides guidelines for the use of Digital Twins in industrial environments, served as a source of requirements for the proposed structure. The research methodology followed the stages of understanding the context, identifying attributes for the implementation framework of a DT supported by MBSE, validating these attributes, defining the final model, and applying it to LAB. The system modeling at various levels was carried out using the MBSE Arcadia method through the free tool Capella. The achieved results include the Model for the implementation of a multi-scope DT and the preliminary architecture of the system of interest. This identified the actors involved in the chosen scenario, their functionalities, and the flow of interaction between all components. This will enable future simulations and analyses within a unified framework, considering the system as a whole rather than isolated subsystems.

Keywords: Digital Twin; MBSE; Arcadia; Capella; Industry 4.0

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivo Geral	12
1.1.1 Objetivos Específicos	12
1.2 Metodologia de Pesquisa	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 Indústria 4.0	15
2.2 Digital Twin	17
2.2.1 O Estado da Arte	17
2.2.2 As aplicações do Digital Twin	19
2.2.3 Gêmeos Digitais e a MBSE	24
2.3 Engenharia de Sistemas	26
2.3.1 A Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos	28
2.3.2 O Método Arcadia	30
3 DESENVOLVIMENTO	37
3.1 Série ISO 23247	37
3.1.1 Entidades do DT e as Camadas RAMI 4.0	49
3.2 O Framework	50
4 ESTUDO DE CASO	53
4.1 A Fábrica Modelo: O Laboratório Aberto da UnB	53
4.2 A ferramenta Capella	55
4.2.1 Utilizando o Capella para modelar a Fábrica Modelo – LAB	60
4.2.1.1. Análise Operacional - Sistema LAB	61
4.2.1.2. Análise do Sistema	64
5 CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS	72
ANEXO I – XML DESCRIÇÃO OME	74
ANEXO II – MAPEAMENTO LAB	75
ANEXO III – MAPEAMENTO LAB	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – RAMI 4.0.....	16
Figura 2 – Tecnologias do Digital Twin	19
Figura 3 – Porcentagem das áreas de pesquisa envolvendo DT.....	19
Figura 4 – Aplicação do DT ao longo do ciclo de vida.....	20
Figura 5 – DTS o Digital Twin do Chão de Fábrica (nível sistema).....	22
Figura 6 – MBSE o suporte para o DT.....	25
Figura 7 – MBSE viabilizando a criação de modelos virtuais	26
Figura 8 – O ciclo de vida em V da SE.....	27
Figura 9 – Perspectivas de Engenharia do Arcadia.....	31
Figura 10 - Exemplo Arquitetura Operacional.....	32
Figura 11 – Exemplo Arquitetura do Sistema (SAB).....	33
Figura 12 – Exemplo Arquitetura Lógica (LES).....	34
Figura 13 – Exemplo Arquitetura Lógica (LES).....	35
Figura 14 – Modelo de Referência baseado em domínios	39
Figura 15 – Modelo de Referência baseado em entidades	40
Figura 16 – Visão Funcional: ISO 23271(2021).....	41
Figura 17 - Redes de Comunicação entre entidades.....	45
Figura 18 - ISO vs. RAMI 4.0.....	49
Figura 19 - Instalações do LAB	54
Figura 20 - Stakeholders e Clientes do LAB.....	54
Figura 21 - Matriz de atividades MBSE com Capella	56
Figura 22 – Navegador Semântico do Capella.....	57
Figura 23 – Comparação pilares de implementação	58
Figura 24 – Adoção do Capella por empresas.....	59
Figura 25 – Linhas de Negócio dos usuários Capella	60
Figura 26 – Funções do Sistema	62
Figura 27 – Diagrama Arquitetura Operacional.....	64
Figura 28 – Representação Sistêmica da Célula de Impressão 3D	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Etapas da pesquisa	13
Quadro 2 – Descrição funcional das entidades	42
Quadro 3 – Atributo Informacional OME.....	44
Quadro 4 – Requisitos para troca informacional entre Redes	46
Quadro 5– Framework: Desenvolvimento de um DT através do MBSE	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D – Três Dimensões

AR – *Augmneted Reality*

B2MML - *Business to Manufacturing Markup Language*

CLT - Consolidação das Leis do Trabalho

CKD - *Completely Knock-Down*

CPS – *Cyber-Physical Sistem*

DT – *Digital Twin*

DTS - *Digital Twin Shop Floor*

eCl@ss - *Electronic Classification*

FDM - *Fused Deposition Modeling*

GPS - *Global Positioning System*

IoT – *Internet of Things*

ISO - *International Organization for Standardization*

LAB – Laboratório Aberto de Brasília

MBSE - Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (*Model-Based Systems Engineering*)

MTConnect - *Manufacturing Technology Connect*

OID - *Object Identifier*

OME - *Elemento de manufatura observável*

PHM - *Prognostics and Health Management*

QIF - *Quality Information Framework*

RAMI 4.0 - *Reference Architecture Model for Industry 4.0*

RFID - *Radio Frequency Identifier*

SLS - *Laser sintetizador seletivo*

URL - *Uniform Resource Locator*

UUID - Identificador Único Universal (*Universally Unique Identifier*)

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, ou Quarta Revolução Industrial, surgiu na Alemanha em 2011 e designou todo um processo de inovação no setor. Berger (2014) definiu esse movimento como a evolução dos sistemas produtivos, a partir da união entre novas tecnologias de automação industrial (TA) e tecnologia da informação (TI). Já para Lu (2017), a Quarta Revolução Industrial pode ser conceituada como responsável pela integração entre maquinários e dispositivos através de redes de sensores e softwares que são usados para melhores prever, controlar e planejar resultados. Logo, essa nova Era caracteriza-se pela conectividade entre máquinas, peças de trabalho e sistemas ao longo da cadeia de valor de uma empresa.

Essa indústria do futuro apoia-se em algumas tecnologias que são capazes de conduzir mudanças radicais de processos, cultura, produtos e serviços. Elas são chamadas de tecnologias habilitadoras e, portanto, são partes responsáveis por viabilizar essa revolução industrial (RÜßMANN et al. 2015). Obtiko e Jirkovsky (2015) listaram essas principais tecnologias consideradas fundamentais para se chegar à Indústria 4.0: big data, Internet of Things (IoT), robôs autônomos, simulação, integração de sistemas horizontal e verticalmente, cibersegurança, sistema de nuvem, sistemas ciberfísicos, manufatura aditiva, inteligência artificial e realidade aumentada.

A partir desse contexto e de tecnologias como os sistemas ciberfísicos, simulação, Internet of Things (IoT) e big data, o conceito de Gêmeos Digitais (DT - *Digital Twins*) ganhou força. Quando relacionado à manufatura, um DT pode ser definido como uma representação virtual de um sistema de produção e caracterizado por sincronizar sistemas virtuais e reais, por meio de dispositivos inteligentes que garantem uma comunicação de dados em tempo real (NEGRI et al., 2017). Esse mecanismo torna possível realizar simulações, testes e análises em um ambiente virtual antes de aplicá-los no mundo real. Ademais, pode-se garantir a otimização de processos, identificação de problemas e a realização de manutenção preditiva, contribuindo para aumentar a eficiência operacional e a qualidade dos produtos (JONES et al., 2020).

Como mencionado, os ganhos na implementação de um Gêmeo Digital em sistemas de manufatura são significativos, mas esbarram em alguns desafios. Anderton (2020) exemplificou algumas dessas dificuldades, como conexão e integração de todos os dispositivos, máquinas e objetos da Internet das Coisas (IoT). A escalabilidade, a segurança da informação e a regulamentação também são apontados pelo autor. Adicionalmente, custos e tempo são sempre desafios para projetos novos e de grande porte. Uma vez que sistemas complexos requerem grandes investimentos para o seu desenvolvimento e operação.

Também, o fato de ainda não haver um modelo de referência amplamente difundido para apoiar esse processo e que seja um consenso na indústria, adiciona dificuldade à sua implementação.

Nos últimos anos, têm sido publicados padrões que desempenham um papel crucial ao oferecer suporte diante das dificuldades mencionadas. Esses padrões atuam como diretrizes e referências técnicas, estabelecendo um conjunto unificado de critérios e práticas aceitos internacionalmente na área. Por exemplo, Shao *et al.* (2021) destacaram diversos padrões elaborados para orientar a modelagem de gêmeos digitais em ambientes de manufatura ou fábricas digitais, entre esses padrões, a série ISO 23247 se destaca.

Esse documento foi elaborado pelo Comitê Técnico ISO/TC 184, que trata de Sistemas e Integração de Automação, especificamente pelo Subcomitê SC 4, responsável por Dados Industriais. Ele oferece uma diretriz genérica, uma arquitetura de referência, métodos e abordagens para a implementação específica de gêmeos digitais na manufatura.

Como contribuição ao tema, este estudo procura estabelecer diretrizes para a implementação de um Gêmeo Digital (DT) de múltiplos escopos, fundamentando-se em uma revisão literária abrangente, na série ISO 23247:2021 e, devido à dificuldade envolvida, propõe-se que a Engenharia Baseada em Sistemas (MBSE) possa ser um método de suporte apropriado para essa implementação. Dado que essa é uma abordagem sistêmica utilizada para se projetar, desenvolver e gerenciar sistemas complexos, permitindo uma compreensão aprofundada da interação entre componentes. Ela oferece uma vantagem considerável na concepção e no gerenciamento desses sistemas, pois possibilita a representação visual detalhada e a simulação de diversos aspectos do sistema.

A utilização do MBSE na adoção de um Digital Twin oferece uma série de benefícios, como a capacidade de representar visualmente o sistema em um ambiente controlado, possibilitando análises, simulações e testes virtuais. Além disso, ele promove a integração de dados, colaboração entre equipes multidisciplinares e uma documentação precisa do sistema, auxiliando na tomada de decisões durante o desenvolvimento e evolução do DT.

Logo, este trabalho busca elucidar os principais atributos a serem considerados em projetos de implementação de Gêmeos Digitais nos Sistemas de Manufatura, destacando também o papel fundamental do MBSE no apoio a esse processo.

Para tal, foi realizado um estudo de caso no Laboratório Aberto de Brasília (LAB), um espaço colaborativo de aprendizagem ativa e multidisciplinar voltado para prototipagem. Essa indústria modelo é um laboratório de inovação composto por vários setores, mas foi direcionada atenção à área de Manufatura Aditiva. O LAB considera implementar Gêmeos Digitais (DT)

em diferentes níveis de abstração de seu sistema de manufatura, almejando apresentar diversas perspectivas do ambiente industrial, englobando equipamentos, processos, pessoas e produtos. Nesse cenário, esse estudo mostrou-se fortuito por propor diretrizes para uma implementação como essa.

1.1 Objetivo Geral

Apresentar uma estrutura orientadora para a implementação de Gêmeos Digitais em Sistemas de Manufatura, utilizando a abordagem da Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos. Essa proposta deve ser considerada em projetos que visam a evolução tecnológica na era da Indústria 4.0

1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram definidos de modo a, evolutivamente, permitir o alcance do objetivo geral:

- Explorar conceitos e abordagens associados aos Gêmeos Digitais e à Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos em contextos de sistemas de manufatura.
- Realizar uma análise da Norma ISO 23247, destacando seus principais princípios, diretrizes e requisitos relacionados à implementação de Gêmeos Digitais em ambientes de sistemas de manufatura.
- Propor uma estrutura que integre a Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) à implementação de Gêmeos Digitais em sistemas de manufatura.
- Aplicar a proposta desenvolvida em um ambiente prático, utilizando uma fábrica modelo como cenário.

1.2 Metodologia de Pesquisa

A seleção dos instrumentos que serão utilizados na metodologia da pesquisa está diretamente relacionada com o problema estudado (MARCONI e LAKATOS, 2003). Sua escolha dependerá de fatores tais como a natureza dos fenômenos, o objeto da pesquisa, dentre outros.

Esta pesquisa aplicada pode ser classificada como uma abordagem qualitativa e descritiva já que, busca detalhar os eventos estudados com o objetivo de compreender os fenômenos da situação analisada ou até estabelecer relações entre variáveis (GODOY, 1995).

Por fim, optou-se pela utilização da técnica de estudo de caso para a implementação deste trabalho.

O trabalho foi organizado para apresentar o estado da arte dos conceitos fundamentais: Gêmeos Digitais e MBSE. Posteriormente, delinea-se o desenvolvimento, propondo um framework para a implementação de um gêmeo digital em sistemas de manufatura com suporte da MBSE. A aplicação deste esquema é então demonstrada na Fábrica-Modelo selecionada para o estudo de caso. Finalmente, o trabalho é concluído com a exposição dos principais resultados, uma análise das vantagens e desvantagens, e sugestões para futuras pesquisas.

O Quadro 1 correlaciona as etapas da pesquisa com os seus capítulos correspondentes, os objetivos específicos associados e fornece uma breve descrição do esforço envolvido.

Quadro 1 - Etapas da pesquisa

Etapas da Pesquisa	Capítulo	Objetivos Específico Associado	Descrição
Revisão Bibliográfica	Capítulo 2	Explorar conceitos e abordagens associados aos Gêmeos Digitais e à Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos em contextos de sistemas de manufatura.	Levantamento bibliográfico a partir de revistas acadêmicas e livros.
Levantamento dos Atributos para Framework	Capítulo 3	Realizar uma análise da Norma ISO 23247, destacando seus principais princípios, diretrizes e requisitos relacionados à implementação de Gêmeos Digitais em ambientes de sistemas de manufatura.	Análise da norma ISO 23247 para identificação dos principais atributos necessários para o desenvolvimento de um Framework para implementação de um Digital Twin.
Validação dos Atributos	Capítulo 3	Propor uma estrutura que integre a Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) à implementação de Gêmeos Digitais em sistemas de manufatura.	Comparação entre a RAMI 4.0 e a proposta das entidades funcionais da ISO 23247-2, referências relevantes da literatura sobre sistemas de produção inteligentes e conectados, buscando validar os atributos levantados nessa pesquisa.
Definição do Framework	Capítulo 3	Propor uma estrutura que integre a Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) à implementação de Gêmeos Digitais em sistemas de manufatura.	Apresentação do Framework proposto pela Autora.

Aplicação da Proposta	Capítulo 4	Aplicar a proposta desenvolvida em um ambiente prático, utilizando uma fábrica modelo como cenário.	O estudo de caso foi aplicado ao contexto do Laboratório Aberto de Brasília (LAB UnB).
Conclusão da Pesquisa	Capítulo 5	Aplicar a proposta desenvolvida em um ambiente prático, utilizando uma fábrica modelo como cenário.	A partir da aplicação, é realizada uma análise dos resultados, e então trabalhos futuros e melhorias são propostos.

Fonte: A Autora (2023).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para suportar o trabalho, o referencial teórico foi dividido em quatro partes principais. Na primeira é abordada a Indústria 4.0, na segunda a tecnologia habilitadora Digital Twin e suas aplicações. Na terceira e última parte, apresentou-se um contexto mais aprofundado sobre a Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE).

No tópico de Indústria 4.0, busca-se apresentar seus principais conceitos e as principais tecnologias associadas.

No tópico sobre os Gêmeos Digitais, apresenta-se os conceitos clássicos dessa área de estudo, suas principais aplicações e dificuldades de sua implementação. Então, em subtópico correlato, é introduzida a ideia de se utilizar o MBSE como ferramenta de apoio às diretrizes de implementação da tecnologia mencionada.

Finalmente, os conceitos e o contexto da abordagem de Engenharia Baseada em Modelos de Sistemas (MBSE) são destacados, e a pesquisa apresenta o método específico que será adotado, conhecido como Arcadia.

2.1 Indústria 4.0

Ao longo dos últimos séculos, a indústria passou por significativos avanços tecnológicos em direção ao que está sendo chamado de Indústria 4.0, ou Quarta Revolução Industrial. Esse termo surgiu em 2011 na Alemanha e designou um processo de inovação no setor.

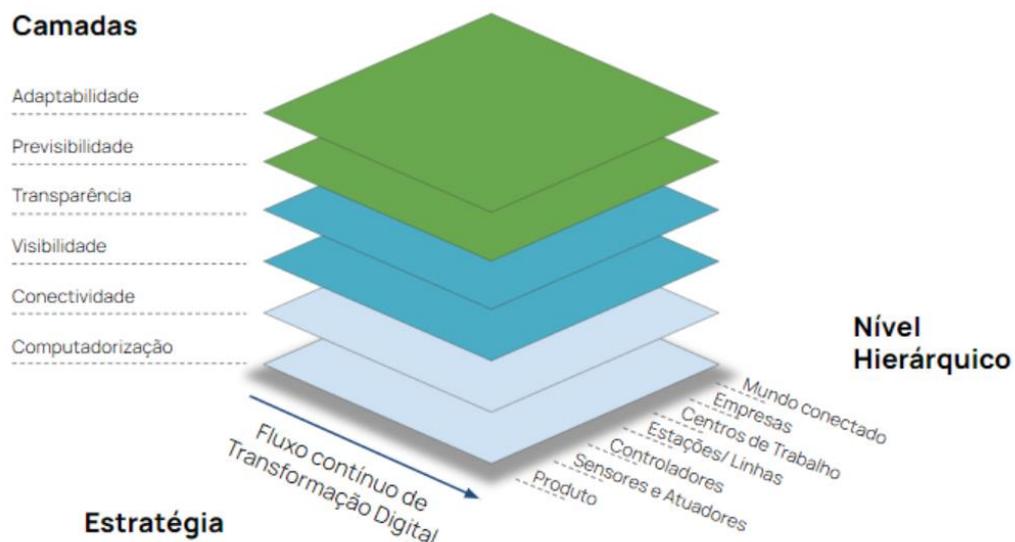
A indústria do futuro apoia-se principalmente nos seguintes pilares tecnológicos: *Big Data*, *Internet of Things* (IoT), robôs autônomos, integração de sistemas horizontal e verticalmente, cibersegurança, sistema de nuvem, sistemas ciberfísicos, manufatura aditiva, inteligência artificial e realidade aumentada (RÜßMANN *et al.* 2015).

Lu (2017), conceitua a Quarta Revolução Industrial como responsável pela integração entre maquinários e dispositivos através de uma rede de sensores e softwares que são usados para melhores prever, controlar e planejar resultados. Logo, caracteriza-se pela conectividade entre máquinas, peças de trabalho e sistemas ao longo da cadeia de valor de uma empresa.

A Indústria 4.0 estimulou a busca pela implementação de sistemas de produção inteligentes e conectados. Com isso, percebeu-se a necessidade de um guia que apoiasse esse processo. Nesse contexto, surge o Rami 4.0 (Modelo Arquitetural de Referência da Indústria 4.0) que fornece uma estrutura conceitual para a definição de uma arquitetura padrão, também, orienta a integração e interoperabilidade entre diferentes componentes de sistemas em um ambiente industrial.

Esse modelo de referência consiste em um sistema tridimensional, dividido em três eixos principais: hierarquia, arquitetura e ciclo de vida. A hierarquia define a interconexão de todos os elementos da produção, incluindo dados, usuário e equipamentos. Ela deve ser flexível, interoperável e distribuída em todas as níveis hierárquicos. Já a arquitetura, define seis camadas de verticalização do fluxo de dados, suas interfaces, interpelações e uso no processo produtivo. E elas são: camada de negócios; camada de funções; camada de informação; camada de comunicação; camada de integração e camada de ativos. O eixo do ciclo de vida, relaciona-se a todo o ciclo de processo do produto, do planejamento ao desenvolvimento (GOTZE, 2016; CHUANG, 2016). A Figura 1 ilustra a representação gráfica do modelo:

Figura 1 – RAMI 4.0



Fonte: Adaptado Hankel and Rexroth (2015)

Ao se desenvolver sistemas apoiando-se no Modelo de Referência, torna-se possível a padronização para descrever interações complexas e requisitos fundamentais entre elementos associados em uma arquitetura.

No contexto da arquitetura da Indústria 4.0, destaca-se a significativa contribuição do RAMI 4.0, que desempenha uma função central ao estabelecer uma estrutura organizada para a integração e interconexão de ativos digitais. Essa referência proporciona uma visão abrangente da cadeia de valor digital, detalhando camadas e entidades que representam componentes tanto físicos quanto digitais. Dentro dessa estrutura, emerge a interconexão

crucial de ativos digitais, delineando a trajetória em direção à próxima fronteira evolutiva na manufatura: os Gêmeos Digitais.

2.2 Digital Twin

2.2.1 O Estado da Arte

A primeira menção do Digital Twin ocorreu em 2003, quando Grieves introduziu o conceito durante cursos ministrados na Universidade de Michigan. À época, a sua definição não era muito precisa, mas estabelecia que um DT era caracterizado por três componentes: um produto físico, o seu correspondente virtual e os dados que conectam ambos. Vale destacar que a representação virtual do produto foi descrita como algo ainda imaturo e que a coleta dos dados do produto físico se daria de forma limitada e manual na época (GRIEVES, 2005).

Desde essa primeira citação até 2011, poucos trabalhos foram publicados sobre o tema. A partir de então, com o desenvolvimento de tecnologias como a Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT), *Big Data* e tecnologias de simulação/emulação (Realidade Virtual e Realidade Aumentada), os gêmeos digitais ganharam força, principalmente na indústria aeroespacial, onde passaram a ser extensivamente explorados (TAO *et al.*, 2018).

Em 2012, Glaesegen e Stargel compartilharam um conceito reconhecido e amplamente utilizado desde então. Definiu-se o Digital Twin como uma integração multi-física, em multi-escala e de simulação probabilística que, a partir de sensores, consegue espelhar um produto físico em seu gêmeo virtual.

Ainda segundo os autores, um DT precisaria, necessariamente, possuir as seguintes características: sincronização em tempo real, interação e convergência entre os modelos físico e virtual, e ter a capacidade de se autoevoluir ao implementar melhorias contínuas a partir de dados coletados.

Para Chen, em 2017, o Digital Twin poderia ser compreendido como um modelo computacional de um elemento ou sistema físico que representa todas as suas funcionalidades a partir de uma integração de dados.

Liu, Meyendorf e Mrad avançaram em 2018, categorizando que o DT é uma representação viva de um objeto ou sistema uma vez que ele está em constante adaptação e atualização a partir da coleta de dados de maneira online e contínua. Também, acrescenta que o DT deve possuir algum nível de previsibilidade de estado futuro do elemento físico por conta das características mencionadas.

Essa visão é corroborada por Madni e Lucero (2019) que apontaram o Gêmeo Digital como uma representação de um sistema físico que é constantemente atualizado com dados sobre performance, manutenção e status de saúde durante todo o ciclo de vida dessa entidade física.

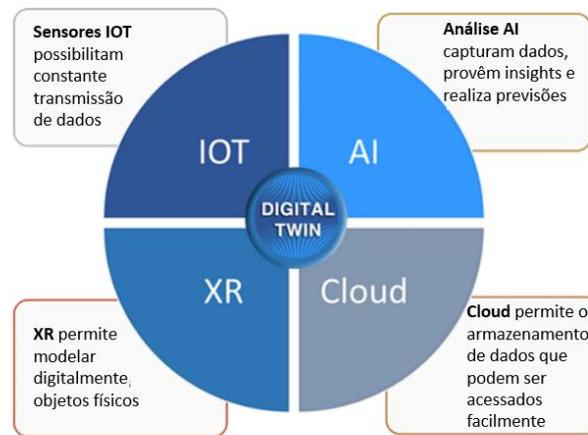
Enriquecendo os conceitos apresentados, Stark e Damerau propuseram em 2019 que o Digital Twin seria uma representação digital ativa de um produto (objeto, máquina, serviço ou ativo intangível) ou de um sistema (um produto e um serviço relacionado) que fosse fiel as suas características, propriedades e comportamentos, a partir de modelos informacionais e dados coletados durante todo o seu ciclo de vida.

Fuller *et al.* (2020) resumiram o Gêmeo Digital como uma integração total de dados entre os sistemas físico e virtual em que o fluxo informacional se dá de forma constante e de forma bidirecional. Destacam que apesar de não haver um conceito universal, um requisito básico deveria ser respeitado a fim de caracterizar um Twin: o fluxo automático de dados entre os sistemas. Segundo os autores, isso garantiria que a representação virtual fosse um gêmeo que indicasse o real estado do sistema físico e que dessa forma, também, conseguisse se auto-regular.

Fuet *et al.* (2022) pensaram no Digital Twin como uma representação digital em tempo real de um objeto físico. Eles estão conectados remotamente a objetos reais e fornecem representações detalhadas desses objetos.

Por fim, Attaran e Celik (2023) enfatizaram os três principais aspectos dos Digital Twins: a aquisição, modelagem e aplicação de dados. O DT emprega pelo menos quatro tecnologias para coletar e armazenar dados em tempo real, obtendo informações cruciais para gerar insights valiosos e criar representações digitais precisas de objetos físicos. Essas tecnologias abrangem a Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Realidade Estendida (XR) e Computação em Nuvem. A Figura 2 demonstra o conceito.

Figura 2 – Tecnologias do Digital Twin



Fonte: Attaran e Celik (2023)

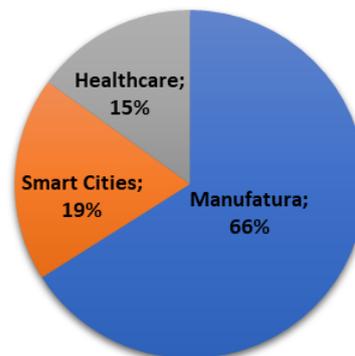
Analisando os estudos citados, percebe-se que há um consenso geral de que o DT possui múltiplas aplicações e que suas características irão variar de acordo com isso, bem como, o ciclo de vida do produto/sistema que visa atender.

2.2.2 As aplicações do Digital Twin

O DT possui múltiplas aplicações e as suas características irão variar de acordo com isso, bem como, o ciclo de vida do produto/sistema que visa atender.

A partir da extensa revisão bibliográfica realizado por Fuller *et al.* (2020), chegou-se à conclusão de que a maioria das pesquisas sobre Digital Twin está vinculada às áreas de Manufatura, *Smart Cities* e Saúde, conforme indicado pela Figura 3.

Figura 3 – Porcentagem das áreas de pesquisa envolvendo DT



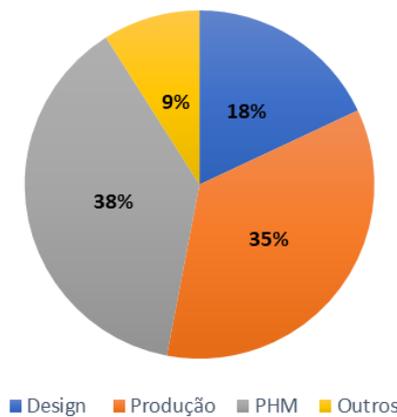
Fonte: Adaptado de Fuller *et al.* (2020)

Uma vez que esse trabalho tem como foco a utilização do DT na Manufatura, essa será a área mais explorada. Ainda referenciando a pesquisa de Fuller *et al.*, aponta-se que nesse mesmo contexto há aplicações com diversas finalidades, sendo as mais comuns: modelagem e simulação.

Já Tao *et al.* (2018), levantaram as aplicações do Gêmeo Digital por etapa do Ciclo de Vida do produto/sistema e o resultado encontrado é retratado pela Figura 4:

Figura 4 – Aplicação do DT ao longo do ciclo de vida

Aplicação DT no Ciclo de Vida



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

Constatou-se que o maior emprego ocorre na PHM (*Prognostics and Health Management*), fase de manutenção. O que corrobora com os achados de Fuller *et al.* (2020), os quais indicam que a modelagem e simulação são as funcionalidades mais características de um Gêmeo Digital.

A norma ISO 23247-1 (2021) indicou as seguintes aplicações do DT na manufatura:

- Controle em tempo real: aplicações de monitoramento, capazes de intervir de forma imediata no processo produtivo;
- Análises *offline*: a partir de tendências e percepções do ambiente o gêmeo realiza recomendações de mudanças futuras para o processo de manufatura;
- Manutenção preditiva: DT agenda e adapta as manutenções nos equipamentos físicos de produção, podendo operar de forma online ou offline;
- PHM: checagem constante das condições dos elementos físicos para caso necessário, agendar manutenções;

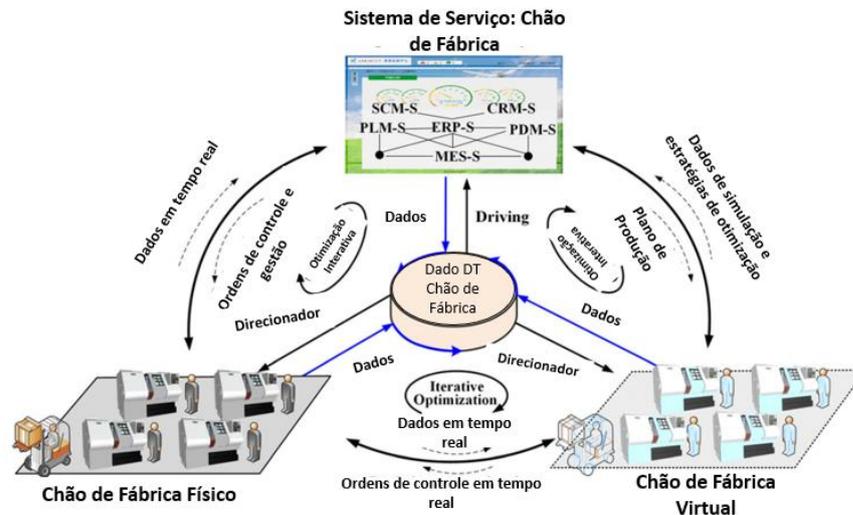
- Projeto de engenharia: levantamento de informações sobre produtos manufaturados, a fim de se desenvolver um design otimizado;
- Controle da produção: aplicação que agenda decisões otimizadas para o processo produtivo.

Com relação aos benefícios de sua utilização na manufatura, a referida norma e Jones *et al.* (2020) indicaram os seguintes itens:

- Redução de custos na produção;
- Redução do risco e tempo de design;
- Redução da complexidade e do tempo de reconfiguração de uma máquina;
- Melhora nos serviços de pós venda;
- Melhora na gestão da produção, dos processos e ferramentas;
- Aumento de eficiência;
- Aumento de segurança e confiabilidade;
- Aumento da flexibilidade durante processo produtivo;
- Planejamento e validação do processo produtivo em looping;
- Gestão de riscos de forma dinâmica;
- Rastreabilidade dos processos.

Ainda considerando o contexto de aplicação industrial, Tao *et al.* (2017) apresentaram uma definição baseada em um maior nível de abstração: o DTS (*Digital Twin Shop Floor*). Nesse caso, o Gêmeo Digital não se restringe a um único objeto, produto ou maquinário. Busca-se representar digitalmente todo o chão de fábrica, o que eleva consideravelmente a complexidade do sistema. A Figura 5 representa a aplicação mencionada.

Figura 5 – DTS o Digital Twin do Chão de Fábrica (nível sistema)



Fonte: Tao *et al.* (2017)

Na imagem tem-se os seguintes elementos envolvidos: chão de fábrica físico, chão de fábrica virtual, um sistema de gerenciamento do chão de fábrica e os dados trocados entre ambos os ambientes. A parte física seria responsável por receber demandas de produção e executá-las até a manufatura dos produtos finais. Já o modelo virtual a partir de sua alta fidelidade e seu mapeamento total do chão de fábrica, consegue entregar previsões e planos para a produção. Além de ser capaz de monitorar todo o processo da manufatura e todas as partes envolvidas.

A partir de 2018, impulsiona-se o uso dessa tecnologia nas Indústrias, tanto por avanços que viabilizam o processo, como por maior maturidade do conceito. Com uma maior adoção dessa tecnologia, surge a necessidade pela definição de um *framework* voltado à sua implementação, por facilitar o entendimento de sua arquitetura e sua introdução prática.

Schroeder *et al.* (2016) propuseram uma arquitetura baseada em cinco níveis (dispositivo, interface com usuário, *web service*, *query* e repositório) para gerenciar os dados do DT. Também, um sistema baseado na Realidade Aumentada para exibir informações em tempo real. Quanto à troca de informação entre os sistemas físicos e digitais, indicaram um método de modelagem via *AutomationML* que possui três estágios: criação do modelo, definição do modelo e desenvolvimento do sistema de informação.

Stark *et al.* (2019) desenvolveram “O modelo de Digital Twin com 8 dimensões” para auxiliar no planejamento de escopo do DT. Cada uma das dimensões possui determinado número de camadas de atingimento:

1. Nível de Integração (global, ambiente industrial, sistema de produção e produto)
2. Conectividade (automática – direcionada pelo contexto, bidirecional e unidirecional)
3. Frequência de Atualização (tempo real, a cada hora, a cada dia e a cada semana)
4. Inteligência ciberfísica (autônoma – total cognição, parcialmente autônoma – IA fraca, automatizada e manual)
5. Capacidade de Simulação (olhar de futuro, ad-hoc, dinâmico e estático)
6. Riqueza do modelo digital (comportamento multifísico, comportamento de controle e geometria cinemática)
7. Interação Humana (Híbrido inteligente – multi sensores, RV/RA – totalmente imersivo e dispositivos inteligentes)
8. Ciclo de Vida do Produto (fim da vida, meio da vida e início da vida)

Além dos esforços de alguns autores, padrões também foram desenvolvidos para orientar a modelagem de gêmeos digitais na manufatura, como:

- IEC TS (*The International Electrotechnical Commission Technical Specifications*) 62832, Estrutura de Fábrica Digital. A especificação define uma estrutura para estabelecer e manter a representação digital de um sistema de produção ao longo de seu ciclo de vida.
- IEEE (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers*) P2806, Arquitetura de Sistema de Representação Digital para Objetos Físicos em Ambientes de Fábrica. O padrão apoia a criação de fábricas digitais.
- IPC (*The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits*) 2551, Padrão Internacional para Gêmeos Digitais. O padrão faz parte dos padrões IPC Factory of the Future. O gêmeo digital IPC é composto pelos gêmeos digitais de produto, processo de fabricação e frameworks de ciclo de vida.
- DIN SPEC, a Concha de Administração de Ativos (AAS). A AAS descreve um ativo eletronicamente de maneira padronizada. Seu propósito é trocar dados relacionados a ativos entre ativos industriais, entre ativos e sistemas de produção ou ferramentas de engenharia.
- ISO 23247, Estrutura de Gêmeo Digital para Manufatura. A série de padrões define uma estrutura que fornece uma diretriz genérica, uma arquitetura de

referência, métodos e abordagens para implementações específicas de gêmeos digitais.

A série ISO 23247, lançada em 2021, foi elaborada pelo Comitê Técnico ISO/TC 184, dedicado a Sistemas e Integração de Automação, e pelo Subcomitê SC 4, focado em Dados Industriais. Essa norma atendeu às necessidades ao oferecer um modelo abrangente que guia o processo de implementação da tecnologia. Detalhes mais aprofundados sobre a norma serão fornecidos no próximo capítulo.

A norma ISO 23247, cujos detalhes serão aprofundados no próximo capítulo, desempenha um papel importante ao estabelecer diretrizes claras sobre o que é necessário para a implementação de Gêmeos Digitais em ambientes de manufatura. Diante desse cenário, esta pesquisa sugere que, para abordar como realizar essas diretrizes, é vantajoso fundamentar-se na Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE).

2.2.3 Gêmeos Digitais e a MBSE

A MBSE é uma metodologia sistemática que emprega modelos gráficos como elemento central para compreender, projetar e analisar sistemas complexos em todas as fases do ciclo de vida. Ao contrário de abordagens que dependem de extensa documentação, a MBSE destaca a utilização de modelos visuais para representar requisitos, arquiteturas e interações, promovendo uma compreensão clara e abrangente do sistema e facilitando a colaboração eficaz entre equipes multidisciplinares.

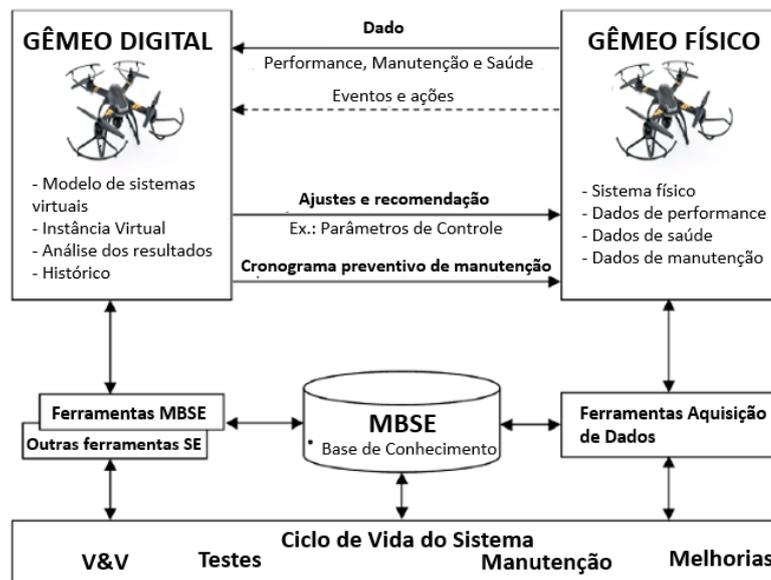
Bickford *et al.* (2020) identificaram vantagens em utilizar essa metodologia no processo de desenvolvimento de gêmeos digitais. Uma vez que para os autores, o MSBE estabelece uma série de padrões e normas que podem ser adaptados a um *framework* apropriado que oriente o desenvolvimento de um DT.

Já Liu *et al.* (2021) propuseram um método de construção do DT de um chão de fábrica, baseado no MBSE. O método proposto é orientado às necessidades de aplicação no chão de fábrica e descreve claramente a composição dos elementos de produção do DT e seus relacionamentos, a composição dos módulos de função do sistema e suas soluções, e as interfaces de integração externas por meio do modelo digital, tornando o processo de desenvolvimento de software do DT gerenciável, reproduzível, reutilizável, rastreável e extensível.

Pontillo (2021) explorou um caminho em que o MBSE pode ser utilizado como apoio a implementação de um DT. Na visão do autor, o gêmeo digital e o gêmeo físico são suportados

por modelos MBSE, que estão conectados a ferramentas de coleta de dados e ferramentas utilizadas pela Engenharia de Sistemas (por exemplo, modelos SysML, Design Structure Matrix, etc.), modelos probabilísticos, simulações de eventos discretos ou simulações baseadas em agentes. Além disso, os modelos MBSE têm a função de serem fontes confiáveis de conhecimento para referência. Essa configuração também assegura uma comunicação bidirecional entre o gêmeo digital e o gêmeo físico. A Figura 6 ilustra a proposta do autor.

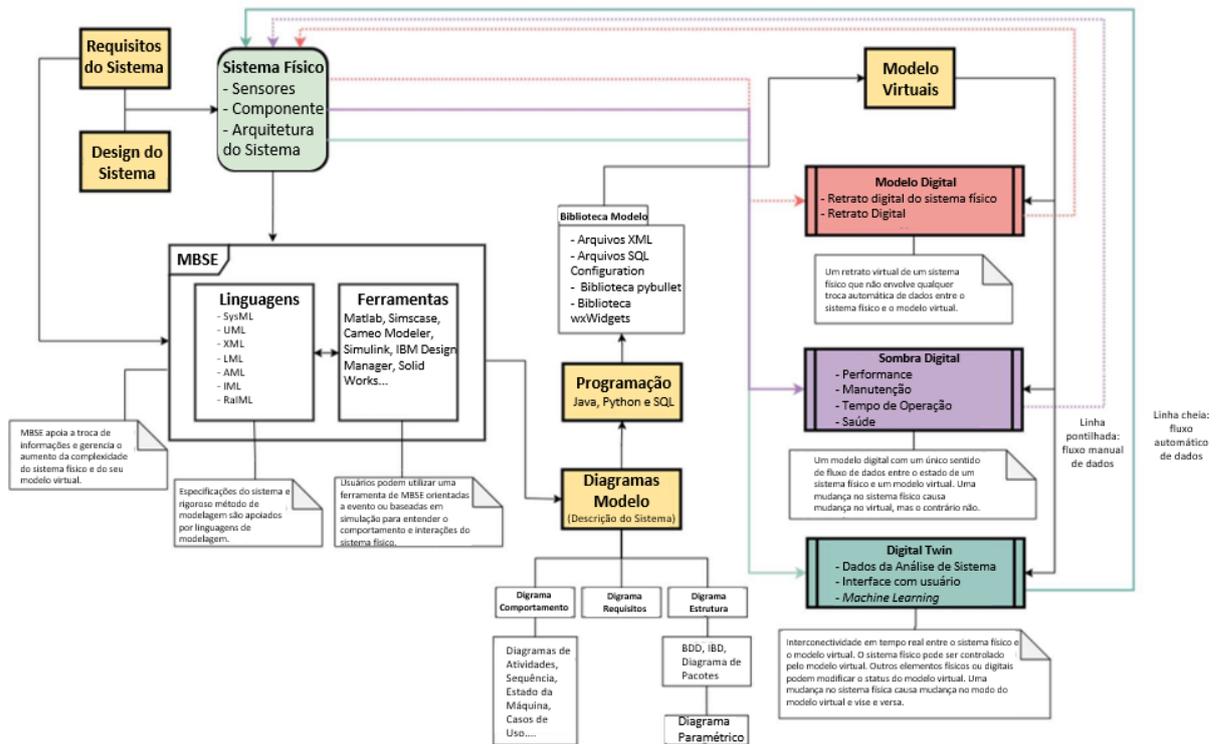
Figura 6 – MBSE o suporte para o DT



Fonte: Adaptado Pontillo (2021)

Lopez e Akundi (2022) exploram essa interseção destacando o potencial dos três pilares do MBSE (linguagem, método e ferramenta) como ponto de partida para o desenvolvimento de um gêmeo digital. Elas destacam que o MBSE permite a utilização de dados de modelagem e simulação para criar um gêmeo digital. No entanto, as autoras também ressaltam limitações das ferramentas autônomas de MBSE, que não oferecem integração de modelos, interoperabilidade de ferramentas, experimentação ou coleta de dados. Mesmo assim, observa-se que o MBSE é usado como uma plataforma de testes para sistemas complexos. A criação e análise de uma simulação virtual de um gêmeo digital, utilizando componentes do mundo real, proporciona acesso a dados interconectados em tempo real. A Figura 7 resume a visão dos autores:

Figura 7 – MBSE viabilizando a criação de modelos virtuais



Fonte: Adaptado Lopez e Akundi (2022)

Avaliando os conceitos até então apresentados e as vantagens percebidas pela utilização da abordagem MBSE, é possível concluir duas grandes contribuições dessa associação para o DT: fluidez na definição de sua arquitetura e apoio para a decomposição dos requisitos dos stakeholders. Dessa forma, uma exploração mais aprofundada desse tema revela-se pertinente para o escopo desta pesquisa.

2.3 Engenharia de Sistemas

A Engenharia de sistemas (SE) pode ser classificada como a ciência que busca compreender o complexo e interdisciplinar universo dos sistemas sociotécnicos, de forma a garantir implantações bem-sucedidas. O conceito começou a ser utilizado por volta dos anos de 1970 quando ganhou força com aplicações no exército norte americano. Desde a sua introdução até os dias atuais, a sua definição evoluiu e a abordagem sobre sistemas tornou-se mais holística (RAMOS; FERREIRA; BARCELO, 2012).

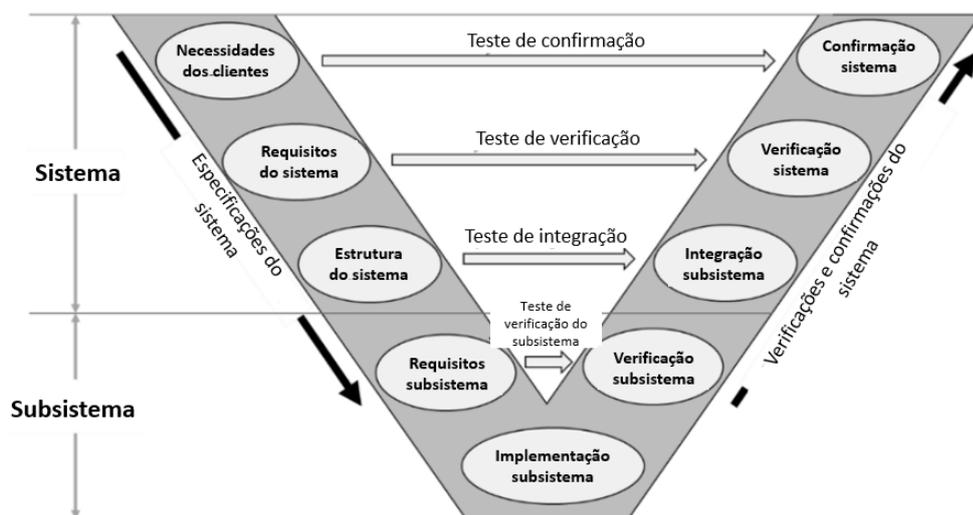
O Conselho Internacional da Engenharia de Sistemas (INCOSE), em 2007, indicou que essa é uma área de estudo focada em identificar as necessidades dos clientes/usuários, traduzi-las em requisitos e posteriormente, em funcionalidades. Como parte do escopo, essas

informações são documentadas e utilizadas para guiar os processos de design e validação desse sistema.

Um dos modelos mais populares da Engenharia de Sistemas e que ajuda a compreender essa ciência, o “ciclo de vida em V”, considera o ciclo de vida sequencial, enfatizando uma abordagem linear para o desenvolvimento de sistemas (INCOSE 2012).

Representado graficamente como uma forma em “V”, ele resume as principais fases presentes em SE propondo um design *top-down* e verificação *bottom-up*. Ou seja, as fases iniciais de análise e planejamento estão no topo de um dos extremos, e são seguidas pelas etapas de design detalhado, implementação, testes e integração até a entrega final no extremo oposto do diagrama. A Figura 8 ilustra os conceitos:

Figura 8 – O ciclo de vida em V da SE



Fonte: Adaptado de McGee (2016)

Essa é apenas uma das abordagens existentes na Engenharia de Sistemas, outras igualmente relevantes são, por exemplo, os modelos em Espiral e os Ágeis. Sobre a segunda, Douglass (2015) aprofunda-se trazendo contexto sobre o tema desde a sua primeira menção no Manifesto *Agile Alliance* em 2001, até a publicação da obra de referência. De forma resumida, o autor conceitua que essa abordagem se caracteriza por ser interativa e incremental, priorizando a colaboração, a adaptabilidade e entregas contínuas funcionais.

Berczuk et al. (2012) destacam vários benefícios dessa metodologia, incluindo a melhoria na qualidade dos dados de engenharia, a sua eficiência, o aumento do ROI, a satisfação dos *stakeholders* e um maior controle de projetos. Isso, por sua vez, resulta na redução dos riscos associados ao desenvolvimento de sistemas. Não por acaso, esse método ganhou

relevância ao longo dos anos se tornado amplamente estudado e adotado na Engenharia de Sistemas.

A escolha por determinada abordagem pode variar de acordo com o contexto, mas é importante ressaltar que todos possuem pontos comuns previstos pela Engenharia de Sistemas. Nota-se tanto a partir dos modelos, como também, por diversos estudos, como o de Bickford *et al.* (2020), que os principais processos envolvidos no design de sistemas na SE envolvem os seguintes estágios: análise de requisitos, especificação do sistema, design do sistema, implementação, teste e operação/manutenção.

Também, independentemente da abordagem adotada existe uma corrente de estudos que entende que modelos gráficos e semânticos podem apoiar o processo de desenvolvimento de sistemas, principalmente os complexos, permitindo uma compreensão mais clara e precisa das interações e dos requisitos do sistema como um todo.

2.3.1 A Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos

Com a evolução tecnológica bem como, o desenvolvimento acelerado de *softwares* e infraestruturas informacionais nas últimas décadas, nos deparamos com sistemas mais complexos e que se utilizam de diversas tecnologias combinadas. Isso representa desafios tanto comerciais como técnicos. Para viabilizar essa realidade, novos métodos de trabalho e desenvolvimento surgem. É nesse contexto que a Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) ganha força.

Wymore (1993) introduziu o termo MBSE como uma série de conceitos matemáticos, por exemplo, a teoria matemática do acoplamento do sistema, as relações algébricas entre sistemas e a estrutura matemática dos requisitos. Já Delligatti (2013) indica que a metodologia MBSE caracteriza-se por possuir três elementos básicos: uma linguagem de modelação, um método de modelagem e ferramentas para essa modelagem. Sobre o tema, Estefan (2007) concluiu que a descrição e expressão dos sistemas pode se dar tanto de forma textual, como a partir de modelos digitais e gráficos.

Para Bonnet *et al.* (2016), o uso de modelos permite um melhor entendimento sobre sistemas complexos uma vez que viabiliza a verificação prévia de soluções antes de seu desenvolvimento. Mas não somente, modelos podem ser utilizados para uma maior especificação dos requisitos como também, para realizar simulações de baixo nível.

Madni e Sievers (2018) entendem que o MBSE é utilizado para definir requisitos, a estrutura do sistema, realizar a decomposição das funções de um sistema, indicar os fluxos de dado, os comportamentos de software e hardware, além de permitir atividades de teste.

Huldt e Stenius (2018) pontuam que o MBSE pode ser definido como uma técnica descritiva que reflete as funcionalidade, a arquitetura de um sistema e suas regras. Ainda assim, os autores referidos concluíram que à época o termo ainda não possuía uma definição internacionalmente padronizada e por esse motivo, existiam muitos conceitos vagos que permitiam amplas interpretações.

Madni e Sievers (2018), resumem os principais objetivos da metodologia MBSE em três pontos:

- Delimitar o escopo de um modelo computacional;
- Estabelecer conexão entre o domínio sistema com as demais entidades do modelo;
- Gerir o repositório do modelo, de forma a permitir a visualização de informações, simulação e análises.

Um outro olhar, indica que o MBSE é uma área de estudos focada em apoiar os principais estágios do processo de design, segundo a engenharia de sistemas (análise de requisitos, especificação do sistema, design do sistema, implementação, teste e operação/manutenção), baseando-se em modelos (BICKFORD *et al.*, 2020).

Também em 2020, essa abordagem foi endossada pelo Conselho Internacional da Engenharia de Sistemas (INCOSE) que conceitua o MBSE como uma aplicação de modelos diagramáticos para suportar as necessidades de sistemas, design, análise, verificação e atividades de validação.

Ainda de acordo com o conselho, esse apoio inicia-se nas fases de projeto conceitual e estende-se ao longo do desenvolvimento e demais fases do ciclo de vida do sistema. Também, apontam os benefícios dessa adoção: centralização de todas as informações de um sistema em um único repositório, a otimização do gerenciamento do ciclo de vida do produto, aumento da capacidade de se gerenciar projetos complexos, diminuição de custos e prazos, padronização de linguagens envolvidas, definição clara de requisitos e métodos, melhora na comunicação entre *stakeholders*, na qualidade do produto e na gestão de conhecimento.

É importante destacar que diversos artefatos podem ser utilizados nessa metodologia da Engenharia de Sistemas, e a sua escolha deriva-se da linguagem de modelagem definida. Huynh e Osmundson (2006) apontam a *SysML* como a mais utilizada no MBSE, e isso se deve ao fato

de que ela é muito eficaz para especificar requisitos, estruturas e o comportamento funcional de sistemas.

Como mencionado, a linguagem adotada impacta na gramática, nos tipos de diagrama, no método de modelagem e por fim, na ferramenta de modelagem utilizados na abordagem MBSE.

Pensando no objetivo desse estudo e nas diversas alternativas existentes, optou-se pelo método Arcadia (Análise de Arquitetura e Abordagem de Design Integrado). Esse é um método de engenharia de software e sistemas orientado às análises operacionais e design de arquitetura, é inspirado em uma vasta gama de padrões de linguagens de modelagem, como NAF4, DoDAF4 até o próprio *SysML* (Huldt e Stenius, 2018).

2.3.2 O Método Arcadia

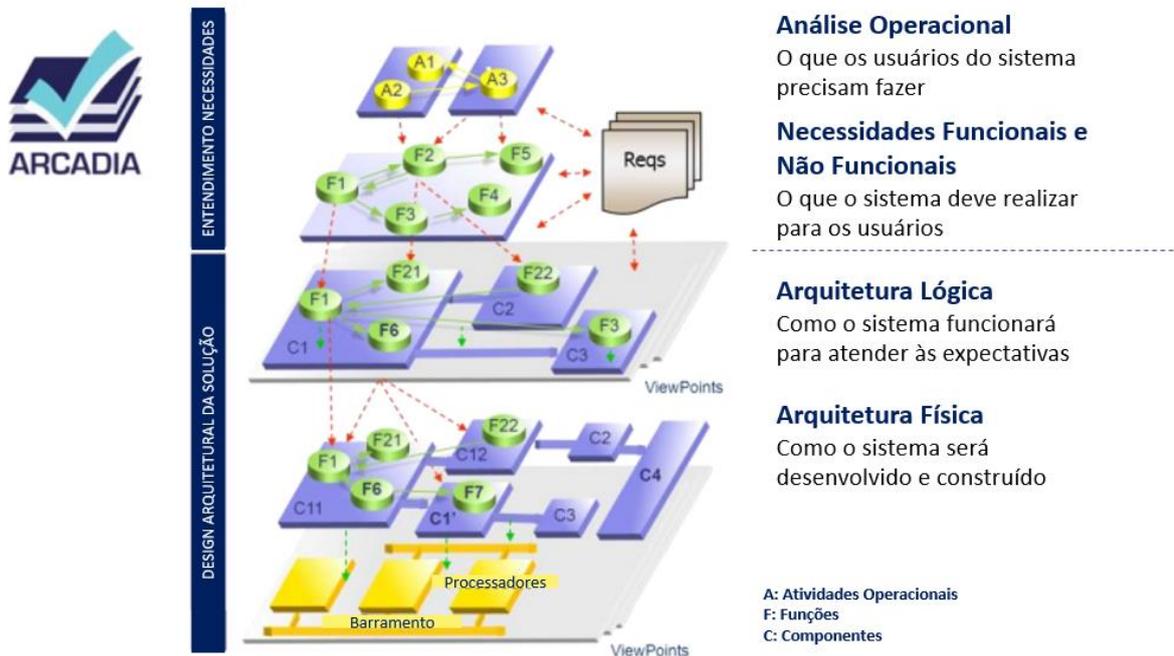
Como já mencionado, o Arcadia é inspirado nos padrões UML/SysML e NAF, e compartilha muitos conceitos com essas linguagens. Ele é resultado de um processo iterativo de definição conduzido por arquitetos de sistemas e software que trabalham em um amplo espectro de áreas de negócios (transporte, aviação, espaço, radares, etc.), de acordo com o padrão IEEE 1220 (ROQUES, 2016).

Segundo Roques (2017) o Método Arcadia (Arquitetura Centrada em Análise e Design Industrializada e Adaptável) é um conjunto estruturado de princípios, práticas e conceitos para o desenvolvimento de sistemas complexos, geralmente utilizado na engenharia de sistemas e na indústria de defesa e aeroespacial. Este método foi desenvolvido pela Thales Group, uma empresa multinacional francesa de tecnologia, para auxiliar no projeto e desenvolvimento de sistemas críticos e complexos.

Ainda segundo o autor, este método promove a modularidade, a reutilização de componentes e a adaptação para atender a requisitos específicos de diferentes sistemas. Ele se baseia em modelos para representar a arquitetura, comportamento e funções do sistema, facilitando a compreensão e a comunicação entre diferentes partes interessadas e equipes de projeto.

Bonnet (2017) reforça que o Arcadia introduz várias perspectivas de engenharia e promove uma distinção clara entre a expressão da necessidade e a expressão da solução. Ele depende intensivamente da análise funcional, a qual é utilizada em todas as perspectivas. A Figura 9 apresenta essas diferentes perspectivas.

Figura 9 – Perspectivas de Engenharia do Arcadia



Fonte: Adaptado de Arcadia (2023)

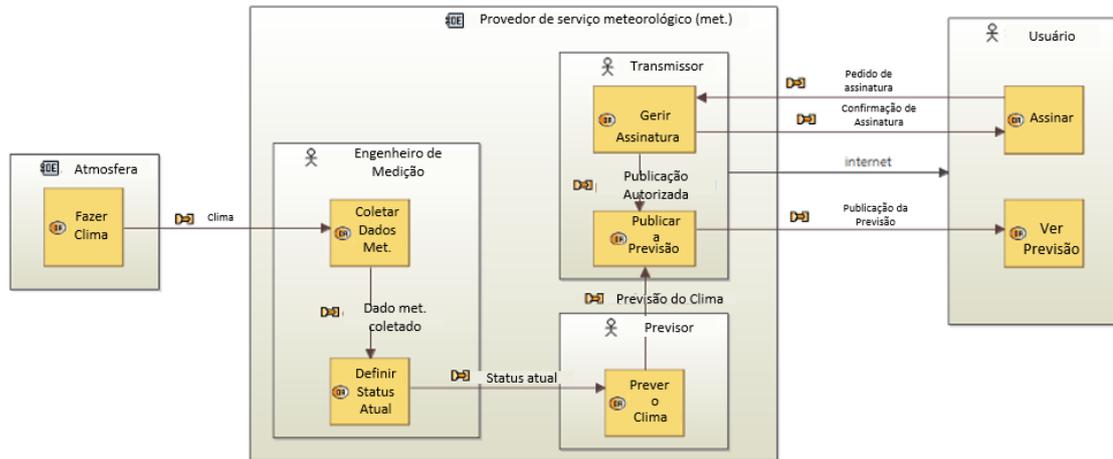
Baron *et al.* (2023) entendem que o método pode ser adaptado para abordagens *top-down*, *bottom-up* e iterativas. Também que ele decompõe o *frame* “Ciclo em V” em quatro etapas (correspondendo aos 4 níveis do Capella). A partir do site oficial do método Arcadia (2023), pode-se detalhar cada uma delas:

- **Análise Operacional** - O primeiro passo concentra-se na análise das necessidades e objetivos do cliente, missões esperadas e atividades, muito além dos requisitos do sistema. Essa análise visa garantir uma definição adequada do sistema em relação ao seu real uso operacional e condições de IVVQ (Integração, Validação, Verificação e Qualificação).

Os resultados desta fase de engenharia consistem principalmente em uma "arquitetura operacional" que descreve e estrutura a necessidade em termos de atores/usuários, suas capacidades operacionais e atividades (incluindo cenários de uso operacional com parâmetros de dimensionamento e restrições operacionais, como segurança, ciclo de vida, etc.).

A Figura 10 apresenta um exemplo de diagrama da Arquitetura Operacional modelado com o Capella, a ferramenta que apoia o método Arcadia, e ilustra os conceitos introduzidos:

Figura 10 – Exemplo Arquitetura Operacional



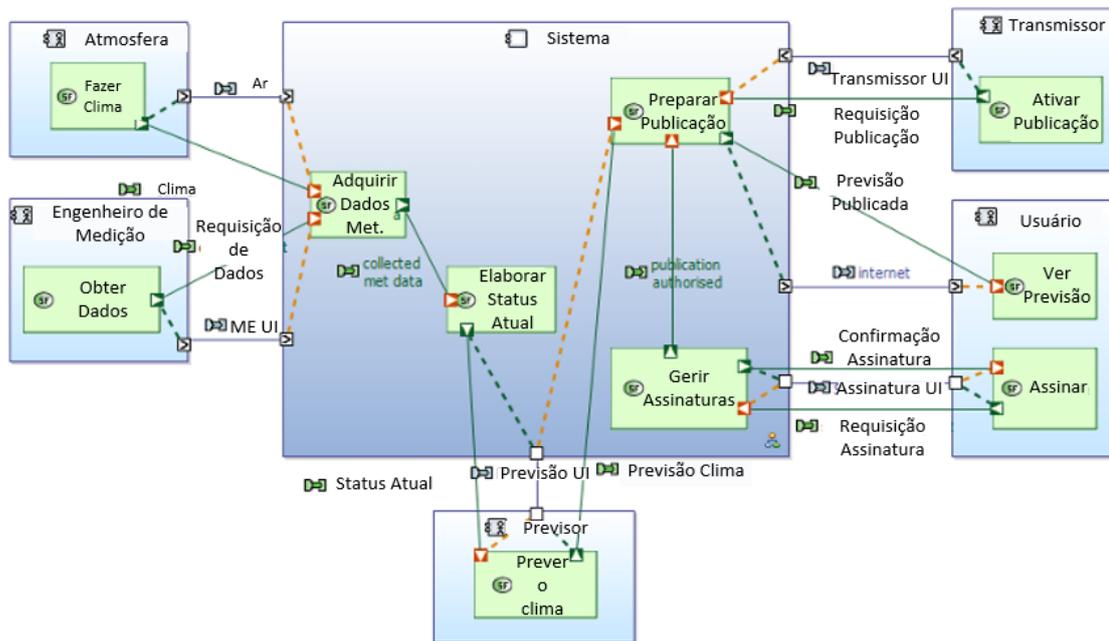
Fonte: Adaptado de Roques (2016)

- **Análise das Necessidades do Sistema** - Essa perspectiva concentra-se no sistema em si, a fim de definir como ele pode satisfazer as anteriores necessidades operacionais, juntamente com seu comportamento e qualidades esperados. O principal objetivo neste ponto é verificar a viabilidade dos requisitos do cliente (custo, prazo, prontidão tecnológica, etc.) e, se necessário, fornecer meios para renegociar seu conteúdo.

Os resultados desta fase de engenharia consistem principalmente em descrições de necessidades funcionais do sistema (funções, cadeias funcionais e cenários), interoperabilidade e interação com os usuários e sistemas externos (funções, intercâmbios além de restrições não funcionais).

A Figura 11 apresenta um exemplo de diagrama da Arquitetura do Sistema (SAB) modelado com o Capella, a ferramenta que apoia o método Arcadia, e ilustra os conceitos introduzidos:

Figura 11 – Exemplo Arquitetura do Sistema (SAB)



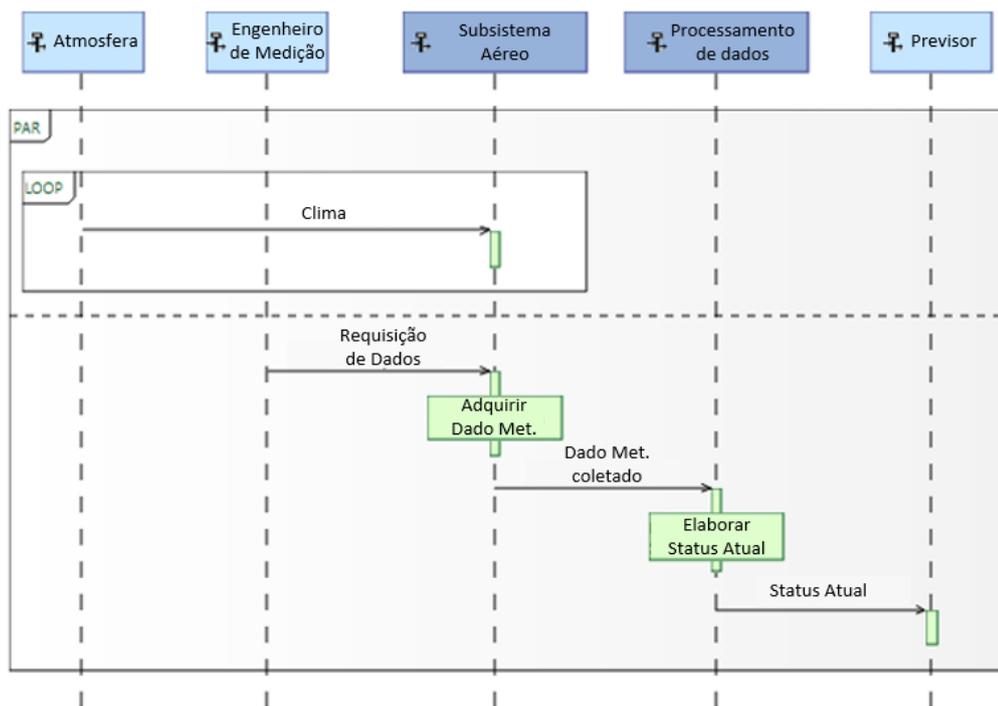
Fonte: Adaptado de Roques (2016)

- Arquitetura Lógica** - Essa perspectiva visa construir uma decomposição de componentes de granulação grosseira do sistema, que dificilmente será contestada posteriormente no processo de desenvolvimento. Partindo de resultados refinados da análise funcional e não funcional anterior (funções, interfaces, trocas funcionais, comportamentos, etc.), é criada uma ou várias decomposições do sistema em componentes lógicos. O processo de construção deve levar em conta os direcionadores e prioridades arquiteturais, pontos de vista e regras de projeto associadas, etc. Todos os principais (não funcionais) limites (segurança, desempenho, IVV, custo, não técnicos, etc.) são considerados e comparados entre si para encontrar o melhor equilíbrio. Essa abordagem é conduzida por pontos de vista, onde formalizam a maneira como essas restrições impactam a arquitetura do sistema.

Os resultados desta fase de engenharia consistem na arquitetura lógica selecionada, que é descrita por componentes e definição de interfaces justificadas, cenários, modos e estados, formalização de todos os pontos de vista e a maneira como são considerados no projeto dos componentes. Como a arquitetura deve ser validada em relação à análise da necessidade, os links com requisitos e cenários operacionais também devem ser produzidos.

A Figura 12 apresenta um exemplo de diagrama da Arquitetura Lógica do Sistema (LES) modelado com o Capella, a ferramenta que apoia o método Arcadia, e ilustra os conceitos introduzidos:

Figura 12 – Exemplo Arquitetura Lógica (LES)



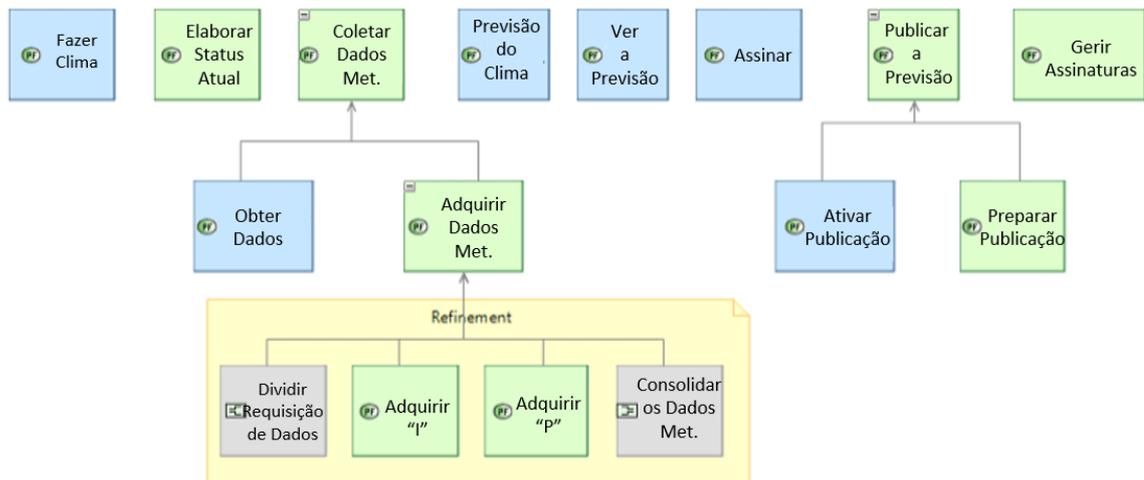
Fonte: Adaptado de Roques (2016)

- **Arquitetura Física** - A arquitetura física tem a mesma intenção da construção da arquitetura lógica, exceto que define a arquitetura "final" do sistema neste nível de engenharia. Portanto, introduz racionalização, padrões arquiteturais, novos serviços e componentes técnicos e faz a arquitetura lógica evoluir de acordo com a implementação, restrições técnicas e tecnológicas e escolhas. A mesma abordagem orientada por pontos de vista usada para a construção da arquitetura lógica é utilizada. O modelo neste ponto é considerado pronto para ser desenvolvido pelas equipes de engenharia *downstream*.

Os resultados desta fase de engenharia consistem na arquitetura física selecionada, que inclui componentes a serem produzidos, formalização de todos os pontos de vista e a maneira como são considerados no projeto dos componentes. Também são produzidos links com requisitos e cenários operacionais.

A Figura 13 apresenta um exemplo de diagrama da Arquitetura Física (PFDB) modelado com o Capella, a ferramenta que apoia o método Arcadia, e ilustra os conceitos introduzidos:

Figura 13 – Exemplo Arquitetura Física (PFDB)



Fonte: Adaptado de Roques (2016)

Alai (2019) destaca que esse método possibilita modelar de maneira altamente eficiente a arquitetura de sistemas complexos com múltiplos domínios, superando várias dificuldades de implementação em comparação com métodos baseados exclusivamente na linguagem SysML. Por exemplo, permite o mapeamento de funções e a criação de uma arquitetura funcional de forma intuitiva e simplificada. Outras vantagens associadas ao uso do Arcadia incluem:

- Captação precisa das necessidades do usuário e do sistema.
- Diagramas e sintaxe com baixa complexidade e completos.
- A ferramenta de modelagem que apoia o método, o Capella, possui código aberto e é intuitivo e possui uma boa usabilidade.
- Possibilidade de integração entre a estrutura do sistema e aspectos comportamentais do usuário.

O método Arcadia, oferece benefícios significativos que tornam a Engenharia de Sistemas Baseada em Modelos (MBSE) uma abordagem apropriada para a implementação da pesquisa. A capacidade intuitiva do Arcadia de mapear funções e criar arquiteturas funcionais, aliada à precisão na captação de necessidades, proporciona clareza e simplificação. A ferramenta de modelagem Capella, que suporta o Arcadia, mostra-se interessante por possuir código aberto e boa usabilidade. A integração entre a estrutura do sistema e aspectos

comportamentais do usuário reforça sua relevância. O próximo capítulo abordará mais detalhes sobre a ferramenta, complementando a escolha do MBSE.

3 DESENVOLVIMENTO

Esta seção tem o objetivo de identificar e validar os atributos da estrutura proposta por esta pesquisa, que servirá como um guia para a implementação de um Gêmeo Digital em um Sistema de Manufatura.

O texto será dividido em três partes. Inicialmente, será realizada uma análise detalhada do padrão ISO 23247, que constitui o principal arcabouço desse modelo. Em seguida, a validação dos atributos será conduzida por meio da comparação com outro método de referência no que diz respeito à níveis de integração e conectividade. Por último, será apresentado o *framework* a ser aplicado no estudo de caso.

3.1 Série ISO 23247

A referida norma é subdividida em quatro partes:

- ISO 23247-1: Princípios e requisitos gerais para o desenvolvimento de um Digital Twin na Manufatura
- ISO 23247-2: Arquitetura de referência com uma visão funcional
- ISO 23247-3: Lista de atributos informacionais básicos para os elementos envolvidos
- ISO 23247-4: Requisitos técnicos para o tráfego de informações entre as entidades do sistema, considerando a Arquitetura de Referência

Na primeira etapa, a norma apresenta um dicionário com os principais termos utilizados no documento. Vale a pena destacar os seguintes:

- Elemento: parte de um sistema que possui características de estado, comportamento e identificação.
- Entidade: qualquer coisa (física ou não física) que possua uma existência distinta.
- *Internet of Things* (IOT): infraestrutura composta por entidades, pessoas, sistemas e informações interconectados a serviços que processam e reagem às informações que transitam entre o mundo físico e o virtual.
- Elemento físico: algo que tenha uma existência material.
- Sensores: dispositivos que observam e medem propriedades físicas de fenômenos naturais ou processos e os convertem em um sinal.

- Processo de manufatura: conjunto de processos na manufatura que envolvem um fluxo e/ou a transformação de material, energia, informação, controle ou qualquer outro elemento dentro de uma área de manufatura.
- Elemento de manufatura observável (OME): item que possui presença física observável em um processo de manufatura. Por exemplo, trabalhadores, equipamento, material, processos, instalações, ambientes, produto e documentação de apoio.
- Apresentação: maneira de disponibilizar uma informação utilizada por seres humanos.
- Representação: maneira que uma informação é modelada para a interpretação de máquinas.
- Representação digital: dados de manufatura que representam um conjunto de propriedades dos elementos de manufatura observáveis.

Dessa forma, o *Digital Twin* na manufatura é conceituado como uma representação digital de um elemento de manufatura observável com sincronização entre esse elemento e a sua representação. Também, afirma-se que o DT pode existir durante todo o ciclo de vida do produto aproveitando-se de aspectos do ambiente virtual (alta fidelidade, fonte externa de dados e etc.), técnicas computacionais (testes virtuais, otimizações, previsões e etc.) e aspectos do ambiente físico (performance histórica, *feedback* de clientes, custos e etc.) para melhorar a performance do sistema de manufatura.

Para tanto, a norma define que alguns requisitos precisam ser atendidos pelo DT: Acurácia (fidelidade em descrever o estado de um OME correspondente); Comunicação (conexão entre OME e DT utilizando-se de protocolos que habilitam a sincronização); Aquisição de dados (coleta de dados a partir de sensores instalados nos arredores do OME); Análise de dados; Integridade dos dados; Extensibilidade (deve possibilitar a implementação de novas aplicações); Granularidade (promover insights em diferentes níveis de detalhe); Gestão de recursos; Segurança (comunicação só deve ocorrer entre recursos autorizados); Simulações; Sincronização; Perspectiva (suportar diferentes visões para atender objetivos distintos de análise).

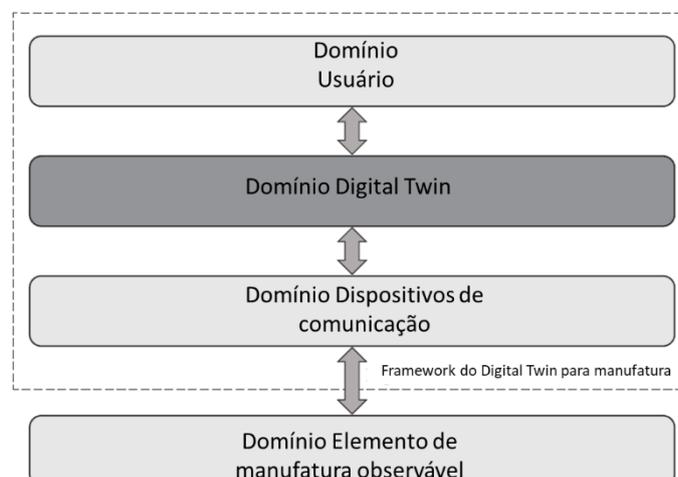
Pacificados esses entendimentos, a segunda parte do documento fornece orientações sobre como construir um gêmeo digital direcionado à manufatura. Destaca-se que o *framework*

não especifica nenhuma tecnologia de implementação. Porém, há a indicação das seguintes etapas a serem seguidas nesse processo:

1. Selecionar o OME a ser espelhado;
2. Selecionar um método para a identificação digital do OME escolhido, como por exemplo, o UUID (Identificador Único Universal);
3. Selecionar tecnologias para a coleta de dados do OME e definir um padrão para essa aplicação;
4. Selecionar tecnologias para o controle do OME e definir um padrão para essa aplicação;
5. Selecionar tecnologias para a representação digital do OME e definir um padrão para essa aplicação;
6. Selecionar tecnologias para a comunicação entre OME, dispositivos de comunicação e DT. Também, definir um padrão para essa aplicação;
7. Selecionar tecnologias para a comunicação com a interface do usuário e definir um padrão para essa aplicação.

Nesse modelo tem-se quatro domínios que podem ser entendidos como áreas do DT que possuem funcionalidades afins. Essas camadas são a do usuário, do *Digital Twin* propriamente dito, dos dispositivos de comunicação e dos OMEs. Considera-se que os três primeiros integram o *framework*, já os últimos são elementos externos que o apoiam. A Figura 14 demonstra a ideia:

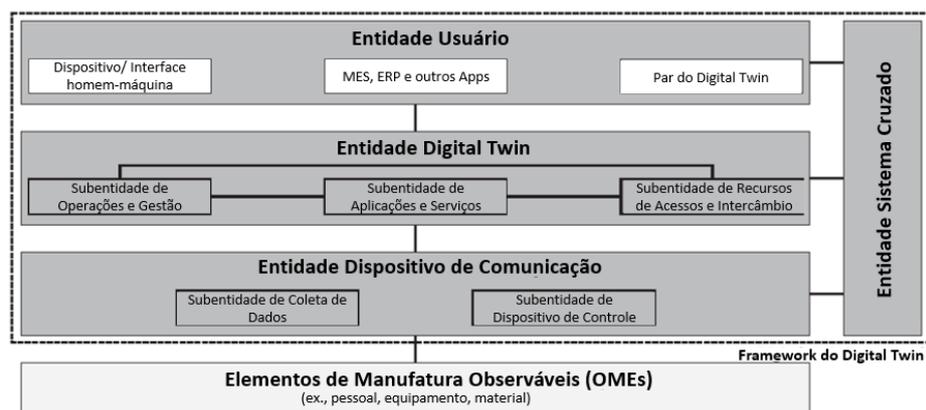
Figura 14 – Modelo de Referência baseado em domínios



O domínio OME consiste nos recursos dos elementos de manufatura observáveis, como pessoal, equipamento, material, processos e ambiente que são monitorados pelo domínio de dispositivos de comunicação. Esse domínio é composto por sensores que coletam dados externos, conectando os OMEs ao domínio do *Digital Twin* que possui aplicações e serviços como simulação e análise. Por fim, após o processamento de dados no DT, retorna-se o seu estado ao domínio do usuário onde há aplicações que interpretam os modelos do gêmeo e os traduzem para leitura humana e/ou de sistemas.

A norma aprofunda-se e introduz uma abordagem mais detalhada, ao indicar que cada domínio performa tarefas que são executadas por entidades, essas o dividem em sistemas e subsistemas. Ou seja, a implementação das entidades define a funcionalidade de cada domínio. O *framework* baseado nessa abordagem possui a configuração sugerida na Figura 15.

Figura 15 – Modelo de Referência baseado em entidades



Fonte: ISO 23271(2021)

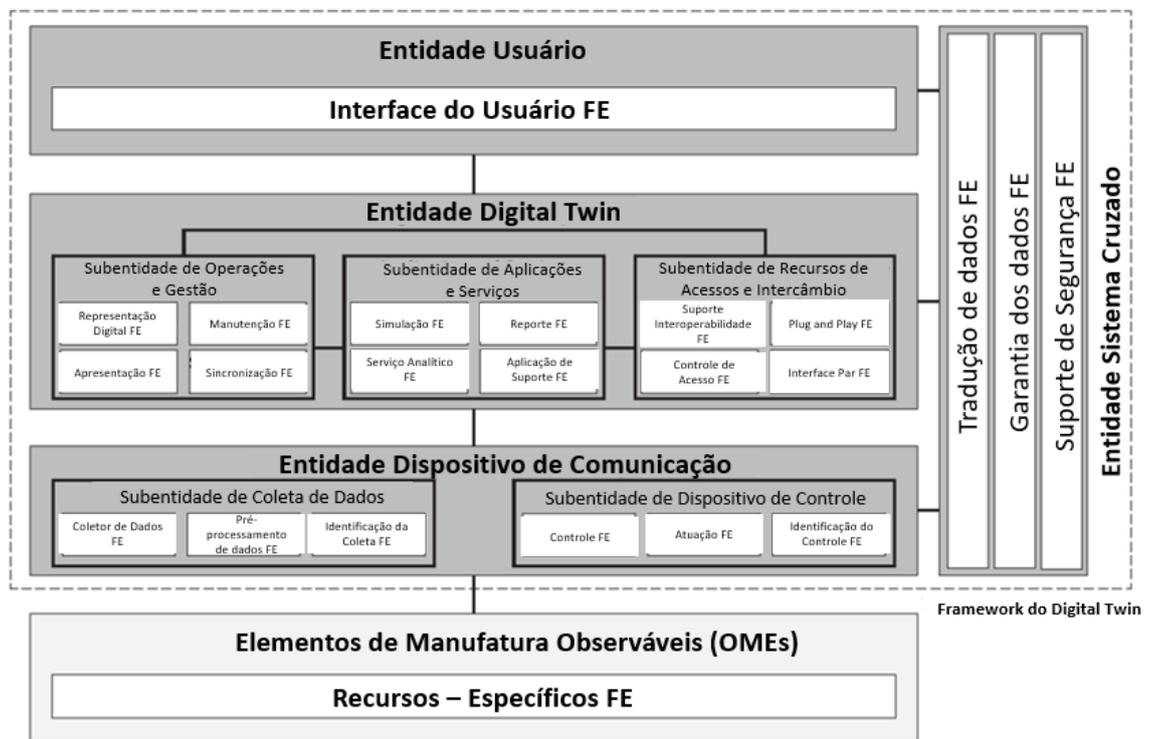
A entidade Dispositivo de Comunicação possui duas subentidades responsáveis por coletar dados dos OMEs e por controlá-los, como máquinas de controle numérico computadorizado (CNC). Esses dados são sincronizados à entidade do *Digital Twin*.

A entidade do DT pode ser dividida em quatro partes: Operação e Gestão; Aplicações e Serviços; Recursos de Acessos; e Intercâmbio. A primeira subentidade opera e gerencia o DT, armazenando informações sobre os OMEs. Inclui funcionalidades como modelagem digital, representação e sincronização, garantindo a interoperabilidade entre manufatura e sistemas como CAD/CAM. A segunda subentidade possui aplicações e serviços relacionados à simulação, análise dos dados capturados dos OMEs e o reporte do status da produção. Já a terceira subentidade é responsável por conceder acesso à entidade gêmeo para a entidade de usuário que por sua vez, hospeda os aplicativos do *framework*. A última entidade, chamada de

Sistema Cruzado, disponibiliza funcionalidades comuns às outras como tradução e garantia de dados, além de suporte de segurança.

Com o objetivo de facilitar a implementação do modelo de referência baseado em entidades, além de garantir o comportamento esperado de cada núcleo, a norma apresenta uma visão que detalha os atributos de cada uma delas, com a indicação das chamadas entidades funcionais (FE), como indicado na Figura 16.

Figura 16 – Visão Funcional: ISO 23271(2021)



Fonte: ISO 23271(2021)

Quadro 2 – Descrição funcional das entidades

Entidade	Subentidade	FE	Descrição
Dispositivos de Comunicação	Coleta de dados	Coleta	Coleta de dados dos OMEs
		Pré-processamento	Ex.: Filtragem e agregação de dados
		Identificação de Coleta	Dados necessários dos OMEs
	Dispositivo de Controle	Controle	Controle dos OMEs a partir de linguagem compatível
		Atuação	Atuação sob os OMEs, a partir de uma requisição ou da entidade usuário ou DT
		Identificação de Controle	Identificação dos elementos OMEs
<i>Digital Twin</i>	Operações e Gestão	Sincronização	Sincronização entre os status do DT e seu correspondente OME
		Apresentação	Apresentação de informação (texto, imagem, tabela, vídeo ou áudio) capaz de ser processada por interface homem-máquina
		Representação Digital	Modelo informacional que representa características físicas, status e etc. do OME
		Manutenção	Mantém o DT operante, com o monitoramento de resultados, identificação de erros e reparação de anomalias
	Aplicações e Serviços	Simulação	Previsão sobre o comportamento do OME
		Serviço Analítico	Análise dos dados coletados e dos resultados das simulações do OME
		Reporte	Relatórios sobre os resultados da produção/análise de dados e das previsões de simulação
		Aplicação de Suporte	Serviços para a implementação da manutenção preditiva e/ou

			reativa e aplicações em looping
	Recursos de Acessos e Intercâmbio	Suporte Interoperabilidade	Permite a integração entre o DT e outros sistemas, como ERP e PLM
		Controle de Acesso	Controla os acessos, em conjunto com a FE Suporte de Segurança, desde a entidade usuário até o OME
		Suporte Plug and Play	Permite uma conexão dinâmica entre o DT e o OME
		Interface Par	Permite, em conjunto com a FE Suporte Interoperabilidade, a interface com outros DTs
Sistema Cruzado	Sistema Cruzado	Tradução de Dados	Suporte na transação de dados entre as entidades de forma a converter protocolos, adaptar sintaxe e semântica, se necessário
		Garantia de Dados	Garante a acurácia e integridade dos dados transacionados
		Suporte de Segurança	Garante segurança incluindo protocolos de autenticação, autorização, confidencialidade integridade

Fonte: ISO 23271(2021)

A terceira parte do documento (ISO 23247-3) evidencia aspectos sobre a representação digital dos elementos de manufatura, mais especificamente, sobre o modelo informacional digital que representa as principais propriedades do OME. O objetivo dessa seção é apresentar os padrões e os atributos desses dados que podem ser estáticos ou dinâmicos. O primeiro caso, atributos estáticos, refere-se às informações que não se alteram durante o processo de manufatura, como o número de série de uma peça. Já no segundo caso, atributos dinâmicos alteram-se e um exemplo seria o formato de um material durante a produção.

Os atributos informacionais estão ligados às especificidades dos OMEs e a norma indica alguns exemplos. Entretanto, eles podem ser customizados de acordo com o contexto. Além disso, podem ser classificados como obrigatórios ou opcionais. A Tabela 2 detalha melhor o assunto:

Quadro 3 – Atributo Informacional OME

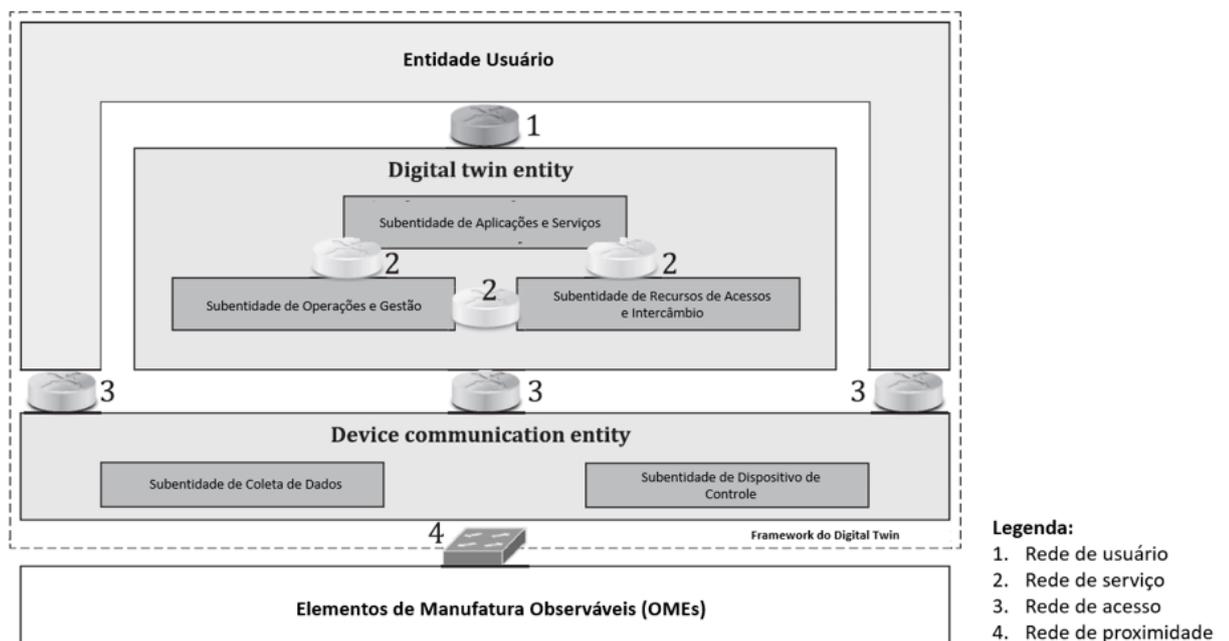
Atributo Informacional	Descrição	Exigência
Identificador	Um valor único, conforme descrito na ISO 8000-115, utilizado para especificar um OME. Por exemplo: — UUID — URL — OID	Obrigatório
Características	Uma característica típica ou marcante do OME. Essas classificações podem ser descritas segundo os padrões: —B2MML — eCl@ss —PLIB	Opcional
Cronograma	Representação do tempo vinculado ao processo de fabricação. — ISO 8601 series — start/stop	Opcional
Status	Condição de um OME durante o processo de manufatura que pode ser indicado de acordo com: — VDMA 24582	Opcional
Localização	Localização geográfica de um OME que pode ser apontada a partir: — GPS — Código postal — Localização relativa	Opcional
Reporte	Descrição de atividades realizadas por um OME ou nele. Pode-se utilizar os seguintes padrões: — QIF — MTConnect	Opcional
Relacionamento	Informação sobre a conexão entre dois ou mais OMEs	Opcional

Fonte: ISO 23271(2021)

Cada um desses atributos pode ser aplicado a qualquer tipo de OME, seja pessoa, equipamento, material, processo, instalação, ambiente, produto ou documento de suporte. O que irá diferir é a sua descrição que será de acordo com a sua categoria. Por exemplo, os OMEs equipamento, pessoa e documento poderiam apresentar os seguintes status, respectivamente: equipamento a 60°C (temperatura), pessoa trabalhando e documento completo. Também, destaca-se que o padrão para cada um desses campos irá variar a depender do tipo de elemento observável. Porém, uma forma bem aceita de se apresentar essas descrições é através da linguagem XML como exemplificado no Anexo I.

A última parte do documento (ISO 23247-4) identifica os requisitos técnicos para que o fluxo informacional ocorra entre as entidades apresentadas na arquitetura referência. Essas trocas ocorrem por meio de quatro tipos de redes: rede de usuário, rede de serviço, rede de acesso e rede de proximidade. A Figura 17 representa esses pontos de comunicação:

Figura 17 – Redes de Comunicação entre entidades



Fonte: ISO 23271(2021)

Essas redes podem ser conceituadas da seguinte forma:

1. A rede de usuário conecta a entidade usuário à de *Digital Twin*, ela pode ser tanto uma Internet pública, como uma intranet privada.
2. A rede de serviço conecta as subentidades de um DT, normalmente através de uma conexão cabeada que executa protocolos baseados em IP. Ressalta-se que caso o

Digital Twin seja implantado como um único sistema, então esse tipo de rede não é necessário.

3. A rede de acesso conecta o DT aos dispositivos de comunicação e à entidade usuário. Pode se apresentar como uma rede de área local (LAN), ou como uma rede de comunicação sem fio, tipo *wireless Lan* (WLAN) e rede móvel (celular). Para tanto, costuma-se adotar uma comunicação baseada em protocolos de IP.
4. A rede de proximidade conecta a entidade de dispositivos de comunicação aos OMEs. Essa comunicação pode ocorrer através de um *Ethernet* Industrial ou de uma rede proprietária com configuração especializada. Algumas redes usam protocolos diferentes do IP. No entanto, se um OME estiver fisicamente conectado ou integrado à entidade dispositivos de comunicação, a rede de proximidade não é necessária.

Como mencionado, a fim de garantir que a troca informacional entre esses pontos ocorra de forma adequada, a norma indica alguns requisitos mínimos a serem atendidos.

Quadro 4 – Requisitos para troca informacional entre Redes

Rede de Comunicação	Requisito	Descrição
Rede de usuário	Permitir uma visão geral/global	Rede deve permitir que as informações sejam trocadas de forma a aceitar aplicações e serviços como visualização, monitoramento de processo, análises estatísticas e simulação.
	Permitir provisionamento	Rede deve permitir a entrega de informações que configure o DT para um estado inicial.
	Permitir aquisição de status sob demanda	Rede deve permitir a entrega de informações que represente o atual status de um OME, conforme representado pelo <i>Digital Twin</i> . Bem como, seu estado histórico.
	Utilizar um método padronizado para a troca de informações	Rede deve utilizar métodos padronizados para a troca de informações. Por exemplo, protocolos que incluam <i>REST</i> e HTTP .

	Verificar os modelos digitais	A rede, a partir da adoção de métodos padronizados, deve incluir um que verifique a sintaxe e semântica do modelo digital, também, validar seu conteúdo.
	Garantir segurança	A rede deve manter a segurança e privacidade de um DT.
	Garantir sincronização	A rede deve garantir que os aplicativos dos modelos digitais operem de forma sincronizada.
	Permitir fluxo informacional sobre modelos digitais	A rede deve permitir troca de informações sobre a representação digital dos OMEs.
Rede de serviço	N/A	A rede de serviço é usada para transmitir informações entre as subentidades de gêmeos digitais. Como essa aplicação pode variar e é muito específica a cada entidade DT, o seu requisito não foi indicado no documento.
Rede de acesso	Garantir uma linguagem comum	Rede deve garantir que a entidade dispositivos de comunicação emita e capte comandos em uma linguagem que seja compreendida pelos OMEs.
	Garantir conectividade	Rede deve garantir a entrega de dados sobre os OMEs e Digital Twin.
	Utilizar um método padronizado para a troca de informações	Rede deve utilizar métodos padronizados de forma a entregar dados que controal os OMEs.
	Garantir sincronização	Rede deve permitir uma conexão sincronizada entre o OME e seu DT.
	Métodos de transação	A rede deve suportar qualquer um desses três métodos de transação: método puxado (DT requisita informações), empurrado (DT recebe informações) e de

		publicação (DT recebe dados publicados).
	Suportar mobilidade	Rede deve manter conectividade mesmo de ocorrer alguma mudança na localização física dos dispositivos de comunicação.
	Garantir segurança	A rede deve manter a segurança e privacidade de um DT.
Rede de proximidade	Garantir interface entre entidades	A rede deve garantir interface entre os dispositivos de comunicação e os OMEs.
	Suportar conectividade local	A rede deve conectar a entidade de comunicação do dispositivo aos OMEs usando ethernet industrial ou uma rede proprietária.
	Garantir uma linguagem comum	A rede deve suportar a adaptação dos dados recebidos dos OMEs aos dados que são compreendidos pela entidade de comunicação do dispositivo.
	Suportar grande volume de dados, transmissão eficiente e armazenamento	A rede deve suportar um grande volume de dados, possuir eficiência de transmissão e ser capaz de armazenar informações.

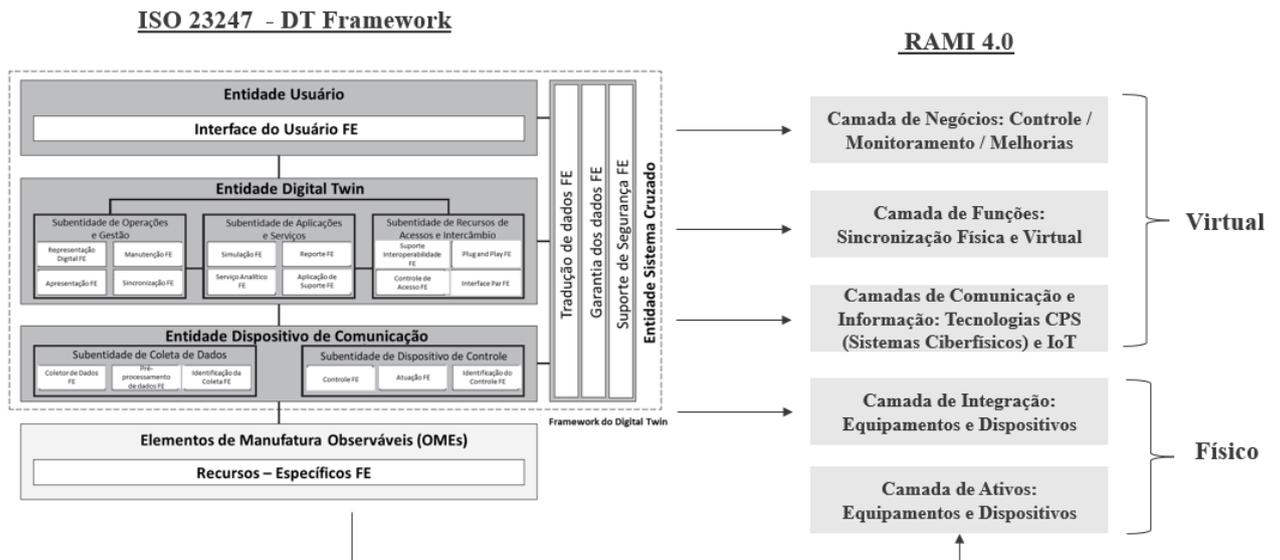
Fonte: ISO 23271(2021)

A norma desempenha um papel importante no processo de implementação de Gêmeos Digitais, ao oferecer uma série de atributos essenciais para a arquitetura dessas representações virtuais. Considerando a centralidade da norma ISO 23247 como referência principal neste estudo, é necessário validar suas propostas em comparação a um modelo arquitetônico amplamente reconhecido na literatura e que serve como guia na esfera da Indústria 4.0. Nesse contexto, o *Reference Architecture Model for Industry 4.0* (RAMI 4.0) surge como um referencial consolidado que organiza e orienta a implementação de sistemas de produção inteligentes e conectados. A comparação entre a norma e o RAMI 4.0 fornecerá *insights* valiosos para a estrutura proposta nesta pesquisa, assegurando a robustez e relevância do modelo de Gêmeo Digital em ambientes de manufatura.

3.1.1 Entidades do DT e as Camadas RAMI 4.0

Compreendendo o Digital Twin como um sistema da Quarta Revolução Industrial, faz sentido traçar um paralelo entre o Rami 4.0 e a ISO 23247 que apresenta a sua referência de arquitetura para manufatura. A Figura 18 apresenta uma relação macro entre as referências.

Figura 18 – ISO vs. RAMI



Fonte: Autora (2023)

A partir dela pode-se correlacionar as entidades propostas para um DT com as camadas de integração da seguinte forma:

1. **Camada de Objeto (*Layer of Objects*):** Esta camada inclui os objetos físicos do mundo real, como máquinas, equipamentos e produtos. Cada objeto nesta camada é associado a um Gêmeo Digital, que representa sua contraparte virtual.
2. **Camada de Integração (*Integration Layer*):** Aqui, ocorre a interconexão entre os objetos físicos e os Gêmeos Digitais da camada anterior. Esta camada facilita a comunicação e a troca de dados entre os componentes do sistema.
3. **Camada de Informação (*Information Layer*):** Esta camada lida com a interpretação e a contextualização dos dados provenientes da camada de integração. Ela fornece uma visão abstrata dos objetos físicos e digitais, transformando dados brutos em informações significativas para suportar a tomada de decisões.

4. **Camada de Serviço (*Service Layer*):** A camada de serviço oferece serviços específicos que suportam a execução e a coordenação das operações. Ela inclui, por exemplo, serviços de segurança, gerenciamento de ciclo de vida e serviços de comunicação.

Essas camadas proporcionam uma estrutura organizada para a implementação e operação de sistemas inteligentes na Indústria 4.0, garantindo uma abordagem holística e interconectada para a transformação digital na produção industrial. Portanto, infere-se a aderência entre a referida ISO com os requisitos de conectividade da RAMI 4.0.

Com a visão de entidades ratificada, é possível prosseguir com as análises para a proposta do Modelo dessa pesquisa.

3.2 O Framework

Retomando os conceitos fundamentais abordados sobre Gêmeos Digitais, as entidades e atributos propostos pela ISO 23247 para sua arquitetura e a proposta de empregar o MBSE, mais especificamente o método Arcadia, como abordagem de aplicação, este estudo propõe um framework que sintetiza as melhores práticas para guiar a implementação de um Digital Twin, independentemente do escopo, em um sistema de manufatura.

Quadro 5 – Framework: Desenvolvimento de um DT através do MBSE

Ciclo de Vida	Exploração do conceito	Design preliminar	Design detalhado	Implementação	Teste	Manutenção
Esforço MBSE	Análise Operacional Análise de Sistema Arquitetura Lógica	Arquitetura Física	Modelos de Desempenho Modelos de Sistema Modelos de Ciclo de Vida	Modelos Detalhados de Ciclo de Vida Diagramas de Interface Finais	Modelos de Desempenho Finais Modelos de Sistema Modelos de Ciclo de Vida	Modelos de Ciclo de Vida Modelagem de Desempenho
Ferramentas	Capella	Capella	Ferramentas de Simulação: MapleSim; extendsim; Matlab&Simulink; DESS	Ex.: Exemplos: Controle Numérico Computadorizado (CNC); CAD/CAM/CAI; Banco de dados; API; Rede de Serviços	Ex.: Controle Numérico Computadorizado (CNC); CAD/CAM/CAI; Banco de Dados; Interface de Programação de Aplicativos (API); Rede de Serviços	Ex.: Controle Numérico Computadorizado (CNC); CAD/CAM/CAI; Banco de Dados; Interface de Programação de Aplicativos (API); Rede de Serviços
Processo de Desenvolvimento do DT	1) Identificar o Propósito Primário do DT	5) Definir Arquitetura do DT	10) Mapear os elementos de dados para sensores	14) Coletar Dados dos sensores, Verificar Operabilidade do DT	18) Coletar dados de teste	22) Integrar o DT ao Ativo Físico
	2) Identificar Algoritmos do DT	6) Identificar as fontes de dados do sistema	11) Deconvoer modelos de software para o DT	15) Desenvolver Algoritmos	19) Uso em tempo real do DT enquanto realizar os testes	23) Integrar o Gêmeo Digital com o Suporte, Comunidades Logísticas
	3) Identificar tipo de inputs de dados do DT	7) Identificar Armazenamento de Dados	12) Integrar Modelos de Gêmeos Digitais Disparatados	16) Validar modelos de desempenho e testes (T&E)	20) Reajustar Algoritmos do Gêmeo Digital conforme necessário	24) Continuar a construir conjuntos de dados do Modelo do Sistema do Gêmeo Digital
		8) Definir "Digital Thread" (Fio Digital) do DT				25) Utilizar o Gêmeo Digital para tomada de decisões relacionadas à confiabilidade, desempenho, manutenção e suporte.
4) Identificar a localização do DT	9) Integrar Requisitos do DT ao Design Físico	13) Testar o Gêmeo Digital com Dados Fictícios	17) Integrar o Gêmeo Digital com Ativos Físicos	21) Aproveitar o Gêmeo Digital para apoiar verificações de desempenho	26) Reajustar o Gêmeo Digital conforme necessário.	

Fonte: Autora (2023)

Assim, a elaboração desse modelo fundamentou-se em uma revisão abrangente da literatura, especialmente no estudo de Bickford *et al.* (2020), que estabelece uma correlação entre o ciclo de vida de um sistema e as fases para a implementação de um Gêmeo Digital. Além disso, foram consideradas as principais etapas do MBSE, em conjunto com o método Arcadia, como referência. Por fim, a série ISO 23247 foi incorporada, levando em consideração

as principais entidades funcionais propostas, requisitos de informações e algumas das tecnologias sugeridas.

Exemplificando, considerando a fase de “Exploração do Conceito” de um Processo de Desenvolvimento de Produto, indica-se que o sistema de interesse seja modelado segundo as etapas iniciais do Arcadia, a partir da ferramenta Capella. Dessa forma, será possível identificar o escopo do sistema (DT), seus algoritmos, requisitos informacionais e de projeto. Assim, tem-se condições para evoluir a uma próxima fase em que se define a arquitetura do sistema (DT). Seguindo a lógica proposta, espera-se atingir a última etapa em que o gêmeo digital se encontra devidamente implementado e testado.

Considerando o objetivo dessa pesquisa, no próximo capítulo inicia-se a aplicação do framework no caso de uma indústria modelo.

4 ESTUDO DE CASO

Esta seção tem por objetivo contextualizar a aplicação desta pesquisa, que se trata sobre a utilização da metodologia Arcadia/Capella na implementação de Gêmeos Digitais em uma fábrica-modelo. Inicialmente, será apresentada essa fábrica a partir da descrição de seu modelo de negócio, de sua infraestrutura e necessidades. Em seguida, será iniciada a aplicação do *framework* a partir da modelagem do sistema de interesse, segundo o Arcadia/Capella.

4.1 A Fábrica Modelo: O Laboratório Aberto da UnB

Um Laboratório Aberto é um ambiente que promove a inovação aberta, possibilitando a conexão de organizações com comunidades externas para acessar uma variedade de recursos de conhecimento. Esses laboratórios facilitam a colaboração, representando uma evolução das comunidades de prática tradicionais (SANTOS; JORGE; KIECKBUSCH, 2023).

Esta tendência também se manifesta na esfera educacional, onde a aprendizagem baseada em problemas nas universidades e os *makerspaces* acadêmicos se destacam. *Makerspaces* são ambientes colaborativos onde a comunidade se reúne para criar, projetar e compartilhar dispositivos inovadores, promovendo a criatividade e a inovação através da participação ativa, troca de conhecimentos e colaboração usando ferramentas e tecnologias de forma criativa (WILCZYNSKI, 2015). Esses espaços oferecem recursos e equipamentos para desenvolvimento e fabricação de projetos, geralmente organizados de forma colaborativa pela própria comunidade.

Ambos, aprendizagem baseada em problemas e *makerspaces*, são impulsionados pela interação com empresas e têm como foco a resolução de problemas práticos (CHESBROUGH; BOGERS, 2014).

A implementação dos Laboratórios Abertos no Brasil teve início em 2015, com o objetivo de apoiar empresas nascentes, desenvolver a indústria e promover a geração de empregos no país. Já o Laboratório Aberto de Brasília (LAB) surgiu em 2017 como um programa de extensão da Universidade de Brasília (UnB) em parceria com a Finatec e o Senai. Seus principais objetivos incluem promover metodologias ativas de ensino, formar profissionais em fabricação digital e oferecer serviços à comunidade para o desenvolvimento de protótipos (ZIMMERMANN, 2018).

Em operação desde 2018, o LAB está localizado no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, mais especificamente na Faculdade de Tecnologia. Seu espaço físico conta com três áreas principais: a marcenaria, o espaço *maker* com as impressoras 3D e a célula eletrônica. A Figura 19 mostra as instalações atualizadas do laboratório:

Figura 19 – Instalações do LAB



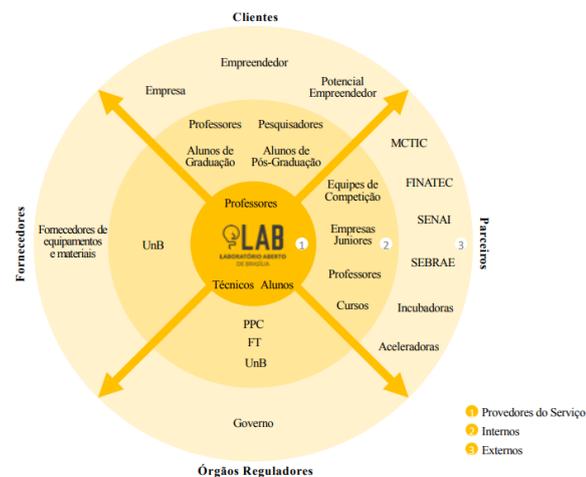
Fonte: Santos; Jorge; Kieckbusch (2023)

Essa infraestrutura visa apoiar a sua atuação como:

- i) um agente que promove as metodologias ativas de ensino
- ii) um formador de profissionais com experiência em I3D
- iii) um prestador de serviços para a comunidade.

A Figura 20 detalha os principais stakeholders e clientes do LAB, portanto, os atores e entidades envolvidos e/ou atendidos pela Estrutura.

Figura 20 – Stakeholders e Clientes do LAB



Fonte: Zimmermann (2018)

Sobre os serviços prestados, o LAB atua com o desenvolvimento de projetos, também, fornece ferramentas para geração de protótipos, principalmente, através da Impressão 3D, dado que a tecnologia chave do laboratório é a Manufatura Aditiva.

Para tanto utiliza-se em sua maioria, da tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*) e de polímeros como matéria-prima. Vale frisar que o laboratório atende desde alunos e professores da própria UnB, como à empresários e demais instituições que desejam desenvolver um novo produto ou protótipo.

A célula de impressão 3D é a área da fábrica-modelo que foi mapeada e é a de interesse para esta pesquisa, portanto, vale detalhar alguns aspectos sobre ela, como o tipo de maquinário, as atividades envolvidas e as suas dores.

Atualmente, o LAB conta com três tipos de impressoras: Cartesianas (semelhante ao modelo Prusa), Delta TEVO e Stratasys Objet30 Pro. E os métodos de impressão envolvidos podem ser, o já mencionado FDM ou o SLS (laser sintetizador seletivo). O que irá impactar nas matérias-primas utilizadas, podendo ser polímeros (pla, petg,abs...) no caso do primeiro método, ou resina (VeroWhite) no segundo.

Esse setor conta majoritariamente com a atuação de duas equipes internas do LAB: gestão e operações. A primeira, é responsável por gerir os pedidos (ordens de serviço), validar orçamentos, garantir a governança dos dados da operação, coordenar a produção e demais tarefas administrativas. Já a segunda, possui uma participação mais técnica ao executar as ordens de serviço, realizando a manufatura das peças e todos os processos correlatos envolvidos. Além disso, acompanham as principais métricas de produção e produto.

Existe a necessidade por um maior controle da produção e do informacional da fábrica, também, de um dimensionamento mais preciso do time e estoque, além da definição de um processo otimizado para a manutenção dos maquinários. Sendo um ecossistema mergulhado nos avanços da Indústria 4.0, já existem projetos no Laboratório para o desenvolvimento de gêmeos digitais das impressoras. O que atende parcialmente as dores levantadas neste estudo. Por esse motivo e considerando um nível de abstração maior, objetiva-se implementar um DT de todo esse chão de fábrica.

A partir dessa definição, inicia-se a modelagem do sistema com a ferramenta Capella que apoia o método MBSE Arcadia.

4.2 A ferramenta Capella

De acordo com o site oficial da ferramenta Capella (2023), a plataforma, que implementa o método Arcadia, foi desenvolvida pelo Grupo Thales em 2008, após alguns anos

de experiência com soluções baseadas em perfil para UML/SysML. Atualmente, está amplamente implantada em projetos operacionais em todos os domínios da Thales em todo o mundo (defesa, aeroespacial, espaço, transporte, identidade e segurança, etc.).

A aplicação oferece tanto uma Linguagem de Modelagem Específica de Domínio (DSML) quanto um conjunto de ferramentas dedicadas. Uma característica muito interessante do Capella é um navegador de metodologia incorporado, que lembra aos usuários os princípios do Arcadia e oferece orientação metodológica eficiente. Este navegador de atividades oferece acesso metodológico a todas as principais atividades do Capella e, portanto, à criação de todos os principais diagramas, nível por nível. É o principal ponto de entrada para um modelo e é destinado tanto a iniciantes quanto a usuários avançados.

Como as representações gráficas dos elementos desempenham um papel fundamental na modelagem com o Capella ele utiliza-se de um esquema de cores para facilitar a sua compreensão por parte de todos os envolvidos (arquitetos, engenheiros especializados, gestores, etc.): os elementos relacionados a funções são representados em verde, enquanto os elementos relacionados a componentes são azuis.

Castro (2023) consolida todas as etapas de modelagem e os principais artefatos utilizados nos diagramas de cada uma, na matriz da Figura 21:

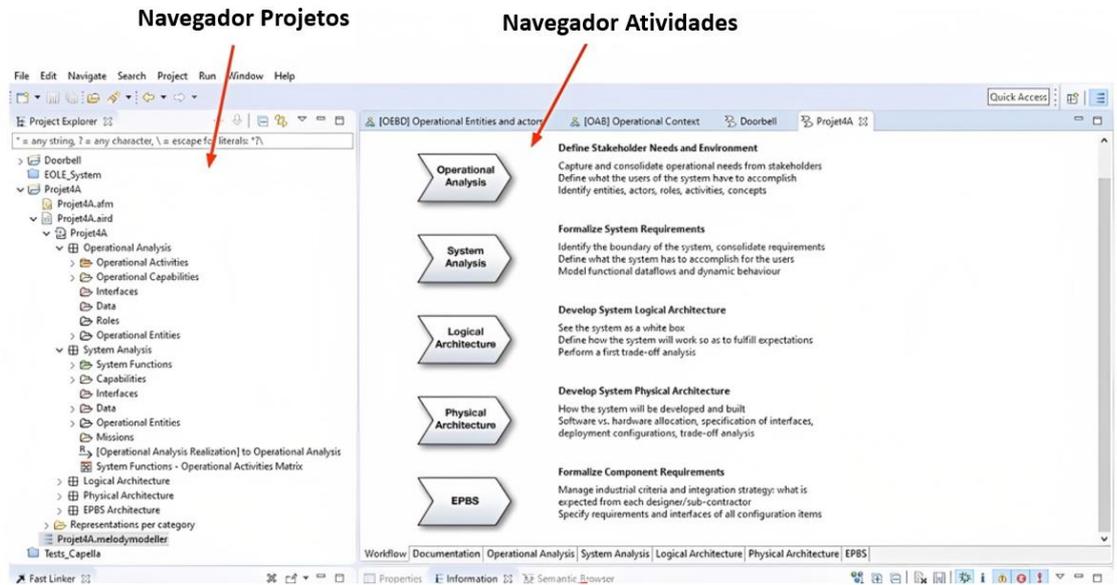
Figura 21 – Matriz de atividades MBSE com Capella

	Requisitos	Capacidade	Funcionalidade	Estrutura	Modos e Status	Interface	Dados
	R-OA	OA1	OA2	OA3	OA4	OA5	OA6
Análise Operacional							
	R-SA	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5	SA6
Análise de Sistema							
	R-LA	LA1	LA2	LA3	LA4	LA5	LA6
Análise Lógica							
	R-PA	PA1	PA2	PA3	PA4	PA5	PA6
Análise Física							

Fonte: Adaptado Castro (2023)

Outra característica do Capella é possibilitar a navegação dentro dos elementos do modelo (independentemente dos diagramas) por meio de um navegador semântico contextual. A Figura 22 ilustra a interface inicial da ferramenta:

Figura 22 – Navegador Semântico do Capella



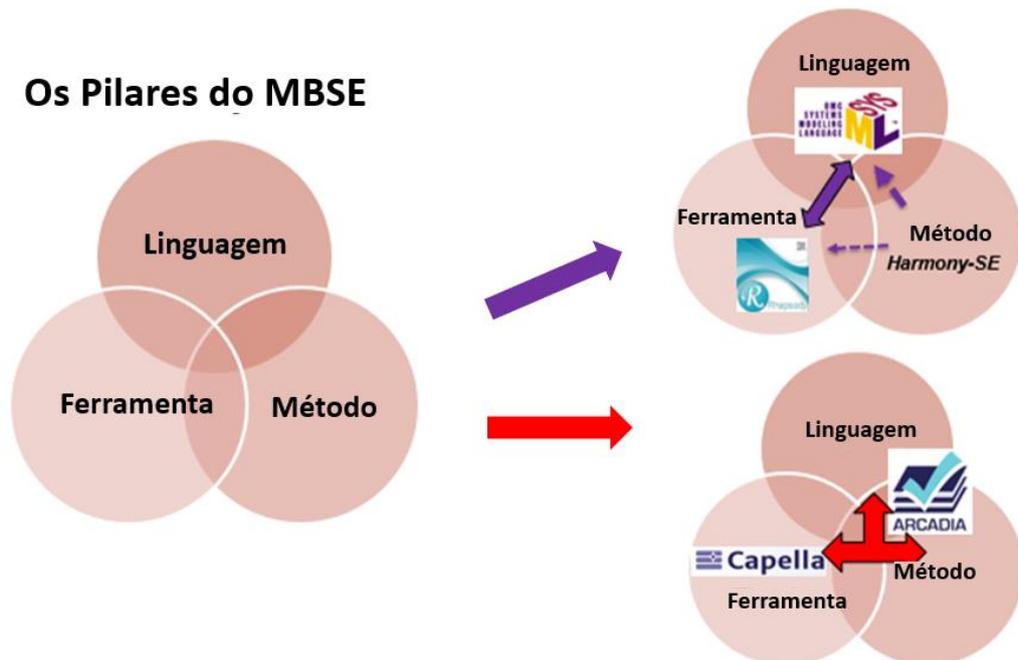
Fonte: Autora (2023)

O Capella vai além das ferramentas de modelagem tradicionais devido ao seu sólido alinhamento com o método Arcadia. Como resultado, organiza regras de verificação do modelo em várias categorias: integridade, design, completude, rastreabilidade, entre outras. Sempre que possível, as soluções oferecem correções rápidas e automatizadas. Além dessas vantagens, pode-se listar os seguintes benefícios da ferramenta:

- **Simplificações Gráficas:** é permitida a troca de informações entre funções de níveis mais baixos que podem ser exibidas automaticamente em funções de níveis mais altos, oferecendo uma representação mais simplificada do modelo.
- **Diagramas Automatizados:** um conteúdo é automaticamente atualizado de acordo com elementos do modelo pré-selecionados e regras semânticas predefinidas.
- **Filtros:** permitem ao usuário mostrar visualizações simplificadas de um diagrama específico selecionando opções de exibição e ocultando/ mostrando elementos específicos do modelo.

Roques (2016) destaca o principal benefício da ferramenta, sendo sua Linguagem de Modelagem Específica de Domínio (DSML), que facilita a compreensão do vocabulário por todas as partes interessadas. O autor compara o SysML e uma ferramenta comercial estabelecida, o Rhapsody, e identifica várias diferenças significativas. Ambos são fundamentados no UML, o que representa uma desvantagem para os engenheiros de sistemas que não estão familiarizados com conceitos orientados a objetos (como operações, generalização/especialização em diagramas de blocos, fluxos e nós de objeto em diagramas de atividades). Esses aspectos são claramente um obstáculo para a aceitação por parte de profissionais que não têm experiência no desenvolvimento de software. Além disso, outra questão importante é que o SysML é apenas uma linguagem, o que requer que cada empresa elabore uma estratégia de modelagem personalizada. Essa necessidade de ensinar o método para uma ferramenta de modelagem é um desafio significativo. A Figura 23 sumariza os pontos levantados no trabalho mencionado:

Figura 23 – Comparação pilares de implementação

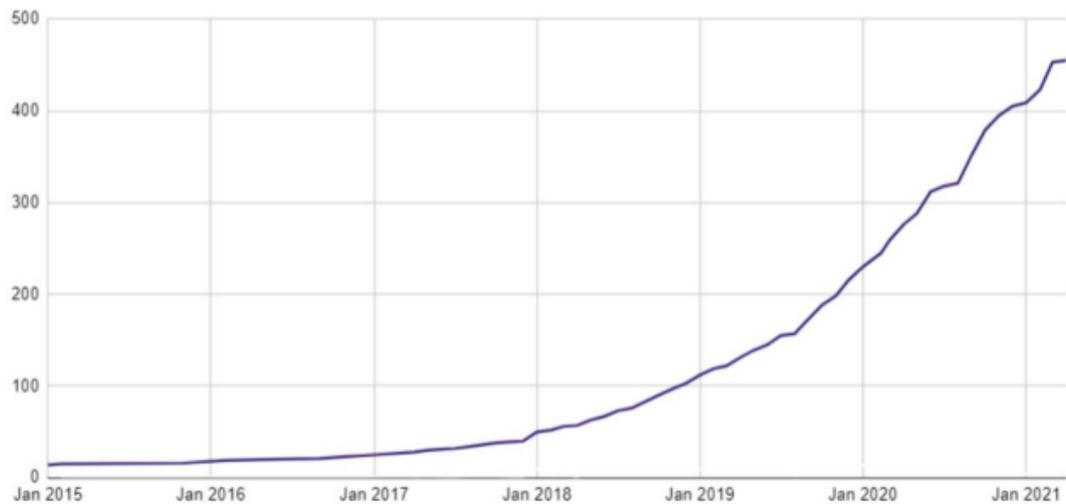


Fonte: Adaptado de Roques (2016)

Baron *et al.* (2023) através de sua pesquisa sistemática levantaram a importância da adoção do MBSE nos Sistemas de Manufatura, dado o aumento da complexidade dos projetos atualmente. E também apontam o Arcadia/Capella como uma melhor alternativa frente a outras abordagens, por motivos similares aos já expostos nesse trabalho.

Os autores sugerem que tantas vantagens podem ter contribuído para a disseminação do método/ferramenta, já que identificaram um aumento exponencial do número de empresas adeptas ao redor do mundo ao longo dos últimos anos, como indicado na Figura 24.

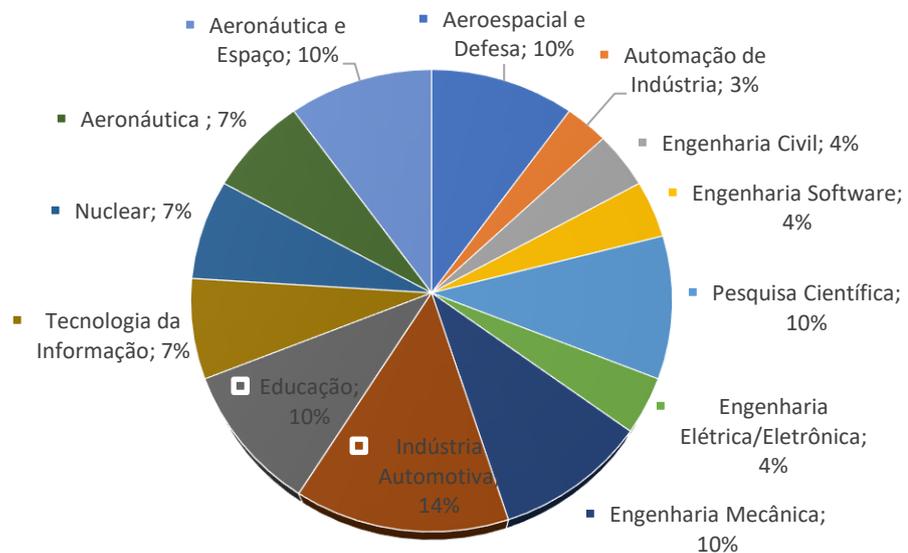
Figura 24 – Adoção do Capella por empresas



Fonte: Baron *et al.* (2023)

Identificou-se que o Arcadia/Capella é utilizado em diferentes áreas de aplicação, como ferrovias (Bombardier, SNCF), aviação (Rolls-Royce), aeroespacial (ArianeGroup), automotivo (Continental) e energia (Framatome). A Figura 25 mostra essa distribuição de usuários identificados do Capella de acordo com as linhas de negócios. Ela dá uma ideia do impacto do Capella na engenharia, pois não há um setor específico que utiliza esse software.

Figura 25 – Linhas de Negócio dos usuários Capella



Fonte: Adaptado Baron *et al.* (2023)

Embora o referido trabalho não aprofunde as principais aplicações do Capella, com base nos conceitos apresentados até o momento, é possível resumir os casos de uso do MBSE da seguinte forma: auxiliar na definição e decomposição de requisitos, analisar os modelos para verificar se uma arquitetura atende aos requisitos estabelecidos, e utilizar modelos ao longo de todo o ciclo de vida do sistema para garantir sua saúde, confiabilidade, manutenção e desempenho.

Com relação as principais limitações do Capella, pode-se citar a baixa interoperabilidade com outras ferramentas de engenharia, a ausência de controle de fluxo entre funções e a incapacidade de realizar análise de parâmetros.

4.2.1 Utilizando o Capella para modelar a Fábrica Modelo – LAB

Considerando as necessidades levantadas, iniciou-se o projeto de implementação do DT da célula de impressão 3D. A primeira etapa do projeto, consiste na modelagem macro desse sistema de manufatura, segundo o método Arcádia e utilizando-se da ferramenta Capella. Para isso, envolveu-se as seguintes atividades:

- i) levantamento de dados, informações e materiais sobre os principais processos da área;
- ii) mapeamento do fluxo “Processamento Ordem de Serviço – Impressão 3D” através da ferramenta Bizagi Process Modeler (Anexo II);

iii) iii) modelagem do sistema segundo um alto nível de abstração no Capella.

A ferramenta Capella está em total conformidade com o método Arcadia, o que resulta na similaridade de suas etapas de modelagem. Segue abaixo, resumidamente, os objetivos de cada uma dessas fases.

1. Na etapa de **Análise Operacional** (*Operational Analysis*), são definidas as necessidades das partes interessadas e o contexto do sistema da seguinte maneira:
 - Capturando e consolidando as necessidades operacionais dos stakeholders.
 - Identificando entidades, atores, papéis, atividades e conceitos do sistema.
 - Definindo as tarefas dos usuários do sistema.

2. Na etapa de **Análise do Sistema** (*System Analysis*), os requisitos do sistema são formalizados da seguinte maneira:
 - Identificando o limite do sistema e consolidando os seus requisitos.
 - Definindo o que o sistema deve realizar para os usuários.
 - Modelando fluxos de dados funcionais e o comportamento do sistema.

3. Na etapa da **Arquitetura Lógica** (*Logical Architecture*), define-se a arquitetura do sistema, seus componentes e funções da seguinte maneira:
 - Estabelecendo como o sistema funcionará para atender às expectativas previamente formalizadas.
 - Realizando uma primeira análise de compensação.

4. Na etapa da **Arquitetura Física** (*Physical Architecture*), define-se os componentes físicos que atendem a lógica previamente definida, para a efetiva construção do sistema.

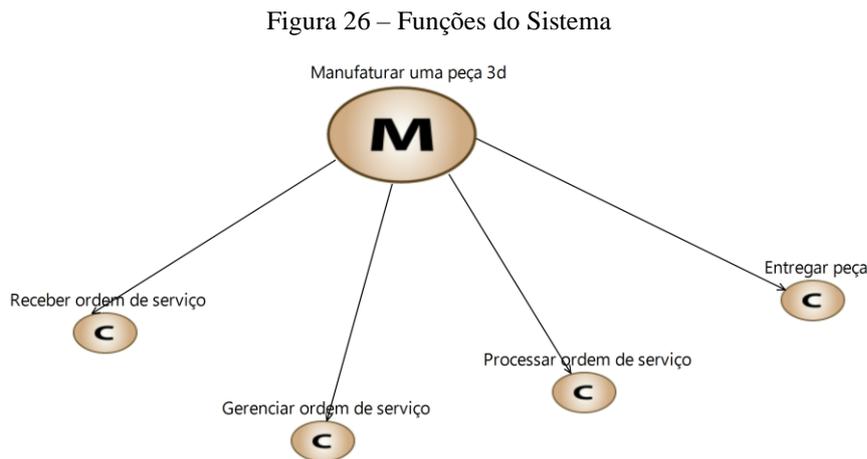
A presente pesquisa propôs-se a modelar o sistema LAB até o nível da Análise de Sistemas, a qual, como resultado, define a Arquitetura Geral desse sistema.

4.2.1.1. Análise Operacional - Sistema LAB

Como já mencionado, essa etapa evidencia as necessidades do sistema e dos *stakeholders*. Como resultado, tem-se um diagrama que representa as interações, em alto nível,

entre os atores, entidades e as funcionalidades do sistema. A seguir, detalha-se os processos executados nessa fase:

1. Definição dos Atores do sistema: Cliente e áreas internas do LAB (Gestão e Operação)
2. Definição das Entidades do sistema: E-mail, Planilha Eletrônica, Software Fatiamento, Arquivo Gcode, Teams e Impressora
3. Criação de estrutura do Capella: OEBD *Operational Entities and Actors*
4. Definição das *Operational Capabilities (OC)*: a Missão do sistema é manufaturar peças 3D de forma a atender pedidos dos clientes do LAB, então as funcionalidades do sistema (OC) devem contribuir para isso.
5. Criação de diagrama no Capella: [OCB] *Operational Capabilities Diagram* representada na Figura 26



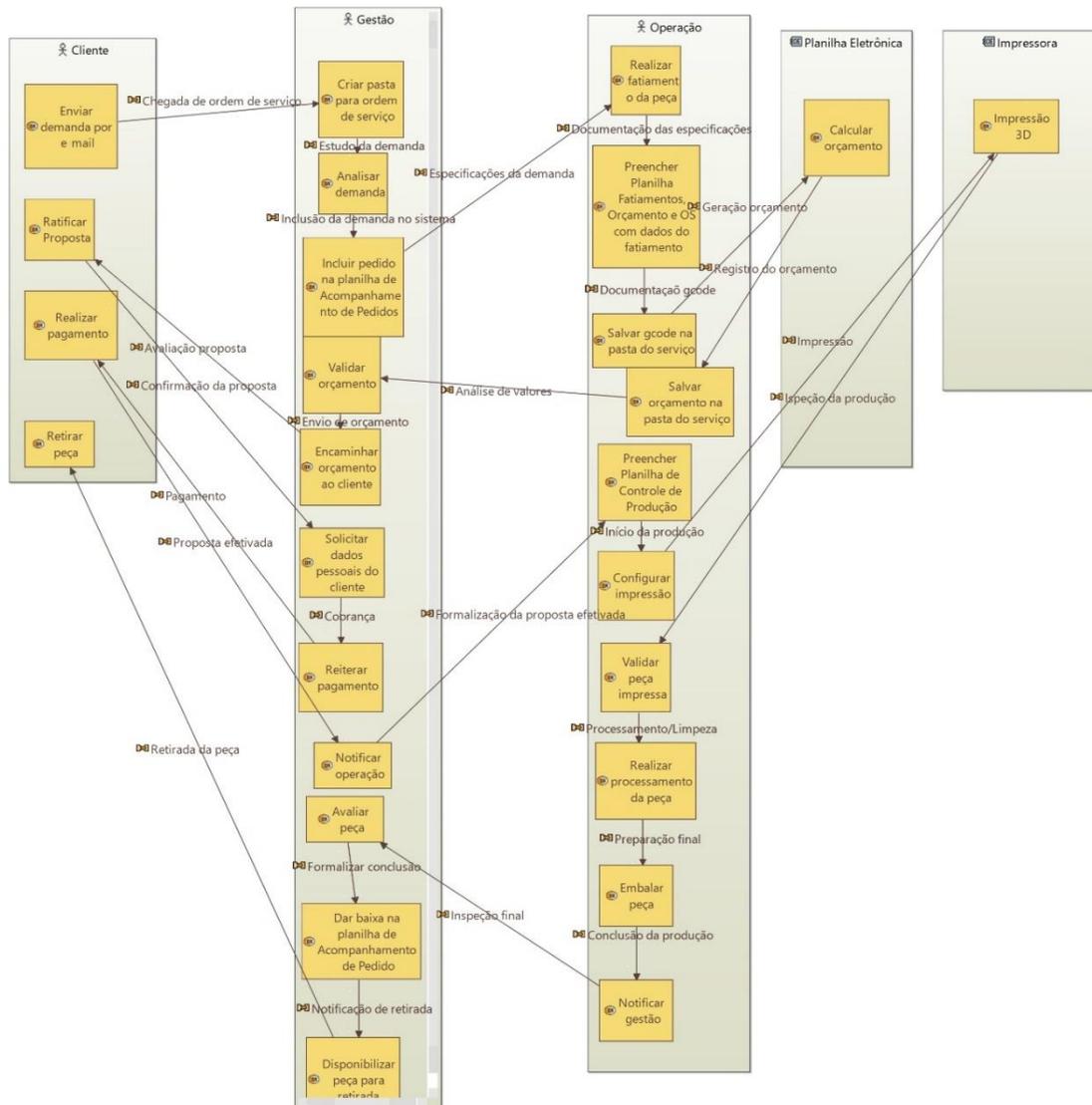
Fonte: Autora (2023)

6. Configuração da Arquitetura Operacional que emula um cenário com as funcionalidades do sistema (OC): associando cada OC a pelo menos um cenário, a fim de explicar um caso de uso do sistema (manufatura de uma peça 3D).
 - a. Cenário 1 - fluxo ideal do processo: Pedidos chegam através do e-mail do LAB, são analisados pelo time “Gestão”, encaminhados ao time “Operação” para o seu processamento (impressão) e disponibilizados ao cliente.
7. Definição das principais atividades do cenário 1 (único modelado):
 - a. *Enviar demanda por e-mail*
 - b. *- Criar pasta para serviço*

- c. - *Analisar demanda*
 - d. - *Incluir pedido na planilha de Acompanhamento de Pedidos*
 - e. - *Realizar fatiamento da peça*
 - f. - *Preencher Planilha Fatiamentos, Orçamento e OS com dados do fatiamento*
 - g. - *Salvar gcode na pasta do serviço*
 - h. - *Calcular orçamento*
 - i. - *Salvar orçamento na pasta do serviço*
 - j. - *Validar orçamento*
 - k. - *Encaminhar orçamento ao cliente*
 - l. - *Ratificar proposta*
 - m. - *Gerar orçamento final*
 - n. - *Solicitar dados pessoais do cliente*
 - o. - *Reiterar pagamento*
 - p. - *Realizar pagamento*
 - q. - *Notificar operação*
 - r. - *Preencher Planilha de Controle de Produção*
 - s. - *Configurar impressão*
 - t. - *Realizar Impressão 3D*
 - u. - *Validar peça impressa*
 - v. - *Realizar processamento da peça*
 - w. - *Embalar peça*
 - x. - *Notificar gestão*
 - y. - *Avaliar peça*
 - z. - *Dar baixa na planilha de Acompanhamento de Pedido*
 - aa. - *Disponibilizar peça para retirada*
 - bb. - *Retirar peça*
8. Criação de diagrama no Capella: [OAB] *Operational Architecture diagram*
 9. Inclusão das atividades e sua sequência lógica no diagrama OAB
 10. Criação de diagrama no Capella: [OAIB] *Operational Activity Interaction diagram*
 11. Definição dos processos operacionais no diagrama OAIB, a partir das atividades mencionadas no item 9

12. Inclusão dos processos operacionais no diagrama OAB: Figura 27 representa o resultado

Figura 27 – Diagrama Arquitetura Operacional



Fonte: Autora (2023)

4.2.1.2. Análise do Sistema

Essa etapa consolida todos os requisitos do sistema e esclarece como os elementos envolvidos se relacionam. Ao final, tem-se uma visão macro e inicial de sua arquitetura, ou seja, define-se o que o sistema deve fazer mesmo que ainda sem uma clareza de como (design). Para tanto, os seguintes processos devem ser seguidos:

1. Contextualização dos Atores do sistema: os atores e entidades criados na fase anterior, são inseridos nesse frame
2. Criação de estrutura no Capella: [CSA] *Contextual System Actors diagram*
3. Inclusão das OCs no diagrama CSA
4. Detalhamento das missões dos atores [MB] *Missions*
5. Indicação da relação entre as missões dos atores e as funcionalidades do sistema (OCs) [MCB] *Capabilities*
6. Inclusão de nova missões no MCB
 - a) Receber ordem de serviço
 - b) Gerenciar ordem de serviço
 - c) Processar ordem de serviço
 - d) Entregar peça
7. Criação diagrama no Capella: [SAB] *System Architecture diagram*
8. Importação das atividades do cenário 1 no SAB
9. Criação de novas atividades de forma a conferir um maior nível de detalhe do sistema
 - a) Enviar demanda
 - b) Entregar demanda
 - c) Criar pasta para serviço
 - d) Armazenar pasta ordem de serviço
 - e) Analisar demanda
 - f) Registrar ordem de serviço
 - g) Armazenar dados da ordem de serviço
 - h) Notificar operação da ordem de serviço
 - i) Realizar fatiamento da peça
 - j) Gerar especificações e código da peça
 - k) Registrar dados do fatiamento
 - l) Armazenar dados do fatiamento
 - m) Salvar código da peça na pasta do serviço
 - n) Armazenar código pasta ordem de serviço
 - o) Gerar orçamento a partir dos dados do fatiamento
 - p) Salvar orçamento na pasta do serviço
 - q) Armazenar orçamento na pasta do serviço
 - r) Notificar gestão sobre orçamento
 - s) Validar orçamento

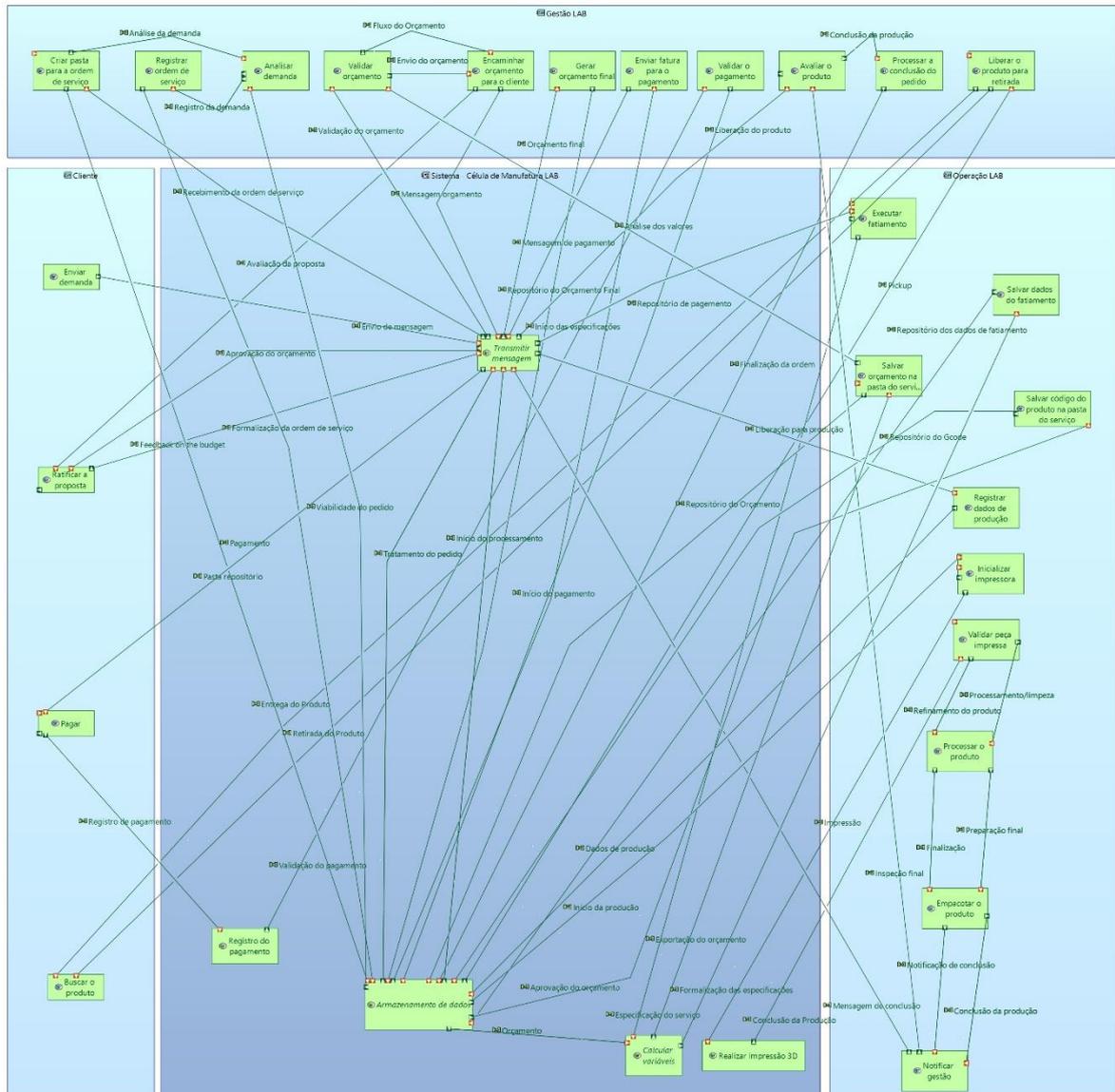
- t) Encaminhar orçamento ao cliente
- u) Entregar mensagem com orçamento
- v) Ratificar proposta
- w) Entregar resposta sobre o orçamento
- x) Gerar orçamento final
- y) Armazenar orçamento final
- z) Enviar cobrança para pagamento
- aa) Entregar ordem de pagamento
- bb) Realizar pagamento
- cc) Sensibilizar pagamento
- dd) Validar pagamento
- ee) Armazenar dados do pagamento
- ff) Notificar operação sobre pagamento
- gg) Preencher dados sobre produção
- hh) Armazenar dados sobre produção
- ii) Configurar impressão
- jj) Executar a impressão
- kk) Validar peça impressa
- ll) Realizar processamento da peça
- mm) Embalar peça
- nn) Notificar gestão
- oo) Entregar notificação à gestão
- pp) Avaliar peça
- qq) Dar baixa do pedido
- rr) Armazenar baixa do pedido em acompanhamento
- ss) Disponibilizar peça para retirada
- tt) Retirar peça

10. Criação de estrutura no Capella: [ES] *Exchange Scenario* que relaciona as funções do sistema aos atores e às suas ações
11. Criação de estrutura no Capella: [SDFB] *Root System Function – Chains* em que se detalha a interação das funções do sistema, considerando o cenário 1
12. Criação de estrutura no Capella: [SFBD] *Root System Function – Breakdown* para o agrupamento das funções

- a) Função cliente
- b) Função gestão
- c) Função operação
- d) Função do sistema de transmitir mensagem
- e) Função do sistema de armazenar dados
- f) Função do sistema de calcular variáveis
- g) Função do sistema de sensibilizar pagamento
- h) Função do sistema de executar impressão

13. Conclusão da Arquitetura do Sistema LAB (SAB), contendo a representação de todos atores, principal entidade, suas funções (combinação das missões, atividades dos atores e OCs) e as interações entre os elementos, considerando o cenário 1 do sistema “Célula de Manufatura - LAB”. A Figura 28 representa o último estágio modelado nessa pesquisa.

Figura 28 – Representação Sistêmica da Célula de Impressão 3D



Fonte: Autora (2023)

Essa última visão, traz as funções do sistema alocadas a seus responsáveis e interligadas pelas interações que ocorrem. Considerando um nível mais alto de abstração, pode-se categorizar que o sistema “célula de impressão 3D” do LAB possui as seguintes funcionalidades:

- Transmissão de mensagens – o sistema deve possuir um canal de comunicação interno (time da fábrica modelo) e externo (clientes e fornecedores)
- Armazenamento de dados – o sistema deve possuir um banco de dados capaz de armazenar todos os dados gerados no processo, desde o recebimento de um pedido até a entrega da peça manufaturada ao cliente

- Cálculo de variáveis – o sistema deve processar os dados armazenados e gerar informações ou resultados com base nos *inputs*. Por exemplo: cálculo do orçamento de um pedido, informações sobre o fluxo de caixa e indicadores de produção, como estoque, especificações da peça, *lead time*, sucesso e perdas.
- Impressão 3D – a partir de matérias-primas, especificações da peça e configurações da impressora, o sistema deve realizar a manufatura aditiva conforme ordem de serviço

Também, materializa uma das vantagens em se realizar as modelagens através de ferramentas como o Capella: contar com repositório robusto de documentações sobre o sistema.

Com relação as duas últimas fases do processo de modelagem, destaca-se que elas indicam como o sistema funcionará e como ele será construído. No contexto deste trabalho, faz sentido relacionar essas etapas à definição da arquitetura final do DT. Dessa forma, foge do escopo desta pesquisa e por esse motivo, pode ser considerada como uma oportunidade de trabalho futuro.

Também como próximos passos, seria interessante explorar a viabilidade de integrações com a ferramenta Capella que fossem capazes de trazer inteligência aos modelos. Por exemplo, simuladores, coletores de dados, bases e ferramentas de gestão. O que foi levantado até o momento, indica certa limitação na interoperabilidade do Capella entre outros sistemas. Entretanto, algumas possibilidades já são viáveis como:

- A extensão de simulação DESS (Dynamic Execution and System Simulation) da Pu Gou Mountain;
- A extensão SysML bridge da OBEO;
- A extensão Python4Capella da OBEO.

Esses exemplos demonstram que certas integrações já poderiam ser feitas de forma direta ou indiretamente, a fim de garantir uma modelagem mais completa dos sistemas e dessa forma, viabilizar a implementação do DT referido neste projeto.

Aprofundando no contexto do LAB, foi possível, por meio da modelagem no Capella, definir o escopo do DT e as necessidades de monitoramento de dados. Como resultado, esse sistema precisa emular os seguintes processos: receber pedidos de trabalho (solicitação de fabricação), gerenciar pedidos de trabalho, processar pedidos de trabalho (processo de

fabricação) e gerenciar a entrega do produto. Em relação às necessidades de informação, os seguintes itens foram identificados:

- Rastreamento de pedidos: ID do pedido; dados do cliente; detalhes do pedido; prazo do pedido; dados de cotação; informações de pagamento; status de entrega.
- Controle de produção: Dados de inventário; tempo de produção; dados sobre o processo de fabricação; ID do operador; dados de erro.

Para especificar as etapas restantes do processo de desenvolvimento do DT, é necessário aprofundar-se na arquitetura desse sistema e na identificação das tecnologias associadas

5 CONCLUSÃO

Com base neste estudo, identificou-se a necessidade do LAB implementar um gêmeo digital do seu chão de fábrica. Isso surge do desejo de aprimorar o controle sobre o sistema de fabricação, coletar dados em tempo real, aplicar simulações para melhorar a gestão de inventário e recursos, e também aprimorar a qualidade das peças produzidas.

Considerando a complexidade envolvida no processo de desenvolvimento de um Gêmeo Digital e a relativa novidade do nível de abstração abordado nesta pesquisa, buscamos basear-nos na abordagem MBSE, bem como na ISO 23247, para desenvolver a proposta de um *framework* que oriente o processo.

Apoiando o modelo proposto, é possível identificar a compatibilidade entre esse modelo e os níveis de integração do RAMI 4.0, uma referência em conectividade. Portanto, considera-se que o principal objetivo do estudo foi alcançado, pois existe uma proposta plausível para atender à necessidade da fábrica-modelo.

Para prosseguir com a implementação, é necessário explorar outros aspectos deste *framework* em trabalhos futuros, incluindo a arquitetura do sistema, as tecnologias envolvidas em sua implementação e os requisitos informacional necessários.

Uma outra questão importante e que deve ser investigada em trabalhos futuros, são os Fatores Humanos envolvidos. Pela natureza do sistema de interesse, torna-se mais complicado definir o escopo do DT, bem como, seus requisitos informacionais e por conseqüências, as fontes de dado. Pessoas fazem parte do OME e são responsáveis por executar ou apoiar certas funções do sistema então é preciso considerar como serão monitoradas e alimentarão a representação digital desse grande sistema.

Além disso, é importante conduzir uma investigação mais aprofundada sobre a ferramenta Capella, escolhida para apoiar o processo de modelagem do DT, pois este estudo permanece inconclusivo em confirmar sua adequação. Isso se deve à sua limitação significativa na integração com outros sistemas/tecnologias e à falta de um módulo nativo de simulação.

Em resumo, a partir deste estudo há um plano para entender os impactos dos fatores humanos no projeto do DT, modelar/analisar o sistema de fabricação em níveis mais baixos, explorar outras ferramentas para modelagem de sistemas complexos, pesquisar ferramentas que possibilitem a construção do gêmeo digital e verificar a sua compatibilidade com a ferramenta escolhida, o Capella, ou outro software análogo que atenda melhor aos requisitos.

REFERÊNCIAS

- Alai, S. (2019). Evaluating arcadia/capella vs. oosem/sysml for system architecture development (Doctoral dissertation, Purdue University Graduate School).
- Anderton, B. Challenges and Benefits of Implementing a Digital Twin in Composites Manufacturing. **CGTech's VERICUT Composite Applications: Irvine, CA, USA**, 2020.
- Arcadia. 2023. "Introduction to Arcadia" <https://mbse-capella.org/arcadia.html>
- Attaran, M; Celik, B. G. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. **Decision Analytics Journal**, p. 100165, 2023.
- Baron, C. et al. Using the ARCADIA/Capella Systems Engineering Method and Tool to Design Manufacturing Systems—Case Study and Industrial Feedback. **Systems**, v. 11, n. 8, p. 429, 2023.
- Berger, R. (2014). Industry 4.0 – The new industrial revolution. Strategy Consultants. Disponível em: https://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_TAB_Industry_4_0_20140403.pdf. Acesso em: 20 de junho de 2023
- Berczuk, S., Appleton, B., & Konieczka, S. (2012). Agile in a safety-critical project: An experience report. *IEEE Software*, 29(1), 77–85.
- Bickford, J, Van, B, Douglas, L, Beery, P, Pollman, A. (2020). Operationalizing digital twins through model based systems engineering methods. *Systems Engineering*, (), sys.21559–. doi:10.1002/sys.21559
- Bonnet, S, Voirin, J, Exertier, D, Normand, V. (2016). [IEEE 2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon) - Orlando, FL, USA (2016.4.18-2016.4.21)] 2016 Annual IEEE Systems Conference (SysCon) - Not (strictly) relying on SysML for MBSE: Language, tooling and development perspectives: The Arcadia/Capella rationale. , (), 1–6. doi:10.1109/syscon.2016.7490559
- Bonnet, S. et al. Modeling system modes, states, configurations with Arcadia and Capella: method and tool perspectives. In: **INCOSE International Symposium**. 2017. p. 548-562.
- Capella. 2023. "Capella website" <https://mbse-capella.org/arcadia.html>
- Castro, H. (2023). MBSE with Arcadia method step-by-step: Operational Analysis. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/mbse-arcadia-method-step-by-step-helder-castro/>. Acesso em: 25 jun.2023.
- Chen, Y. (2017). Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and Enablers, *Engineering*, vol. 3, pp. 588–595.
- Chesbrough, H.; Bogers, M. (2014). Explicando a inovação aberta: a compreensão, adoção e aplicação da inovação aberta. Porto Alegre: Bookman
- Chuang, A. (2016). Discuss the standard of Industry 4.0. Department of Industrial Engineering and Engineering Management, National Tsing Hua University, Taiwan.
- Delligatti L. SysML distilled: a brief guide to the systems modeling language. Addison-Wesley; 2013.
- Estefan, J. (2007). Survey of model-based systems engineering (MBSE) methodologies. *IncoSE MBSE Focus Group* ;25(8):1–12
- Fuller, A, Fan, D, Day, C, Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, (), 1–1. doi:10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- Glaessgen, E, Stargel D. (2012) The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. 53rd AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA 1818.
- Godoy, A. Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades. **Revista de administração de empresas**, v. 35, p. 57-63, 1995.
- Gotze, J. (2016). Reference Architecture for Industry 4.0. Qualiware- Center of Excellence.
- Grieves, M. (2005). Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*, 2(1/2), 71–. doi:10.1504/ijpd.2005.006669.
- Hankel, M.; Rexroth, B. (2015). The reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0). *Zvei*, 2(2), 4-9.
- Huldt, T.; Stenius, I. (2018). *State-of-practice survey of model-based systems engineering*. *Systems Engineering*, (), -. doi:10.1002/sys.21466
- Huynh, T.; Osmundson, J. (2006). A systems engineering methodology for analyzing systems of systems using the systems modeling language (SysML). Department of Systems Engineering, Naval Postgraduate School, Monterey.
- IncoSE, in *Systems Engineering Handbook—A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*. (2007). C. Haskins, K. Forsberg, and M. Krueger, Eds. San Diego, CA: Int. Council Syst. Eng.
- INCOSE. (2012). *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*, version 3.2.2.
- INCOSE. (2020). International Council on Systems Engineering Website. Available from: <https://www.incoSE.org/>

- ISO 23247 (series). (2021). Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing
- Jones, D, Snider, C, Nassehi, A, Yon, J, Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, (), S1755581720300110–.doi:10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
- Liu, J. et al. Construction method of shop-floor digital twin based on MBSE. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 60, p. 93-118, 2021.
- Liu, M, Fang, S, Dong, H, Xu, C. (2020). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, (), S0278612520301072–. doi:10.1016/j.jmsy.2020.06.017.
- Lu, Y. (2017). *Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues*. *Journal of Industrial Information Integration*, (), S2452414X17300043–. doi:10.1016/j.jii.2017.04.005
- Liu, Z, Meyendorf, N, and Mrad, N. (2018). The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin. *Annual Review Of Progress In Quantitative Nondestructive Evaluation*, (Provo, Utah, USA), p. 020023.
- Lopez, V; Akundi, A. A conceptual model-based systems engineering (mbse) approach to develop digital twins. In: **2022 IEEE International Systems Conference (Syscon)**. IEEE, 2022. p. 1-5.
- Madni, A, Sievers, M. (2018). *Model-based systems engineering: Motivation, current status, and research opportunities*. *Systems Engineering*, (), –. doi:10.1002/sys.21438
- Madni, A, Madni, C, and Lucero, C. (2019). Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering. *Systems*, vol. 7, p. 7, Jan.
- Marconi, M, Lakato, M. *Fundamentos da Metodologia Científica*. São Paulo: Editora Atlas, 2003
- Moreno, A, Velez, G, Ardanza, A, Barandiaran, I, Infante, A, R, Chopitea, R. (2016). Virtualisation Process of a Sheet Metal Punching Machine within the Industry 4.0 Vision, *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, vol.11, no.2, pp.1-9. May2. doi: 10.1007/s12008-016-0319-2
- Negri, E.; Fumagalli, L.; Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS- based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, v. 11, n. Junho, p. 939–948, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>>.
- Obtiko, M.; Jirkovsky, V. (2015). Big Data Semantics in Industry 4.0. *Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*. Praga, República Tcheca: Springer International Publisher, p. 217 – 229
- Ramos, A.L.; Ferreira, J.V.; Barcelo, J. (2012). Model-Based Systems Engineering: An Emerging Approach for Modern Systems. , 42(1), 101–111. doi:10.1109/tsmcc.2011.2106495
- Roques, P. MBSE with the ARCADIA Method and the Capella Tool. In: **8th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems (ERTS 2016)**. 2016.
- Roques, Pascal. **Systems architecture modeling with the Arcadia method: a practical guide to Capella**. Elsevier, 2017.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P. and Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston consulting group*, 9(1), pp.54-89.
- Schroeder, G et al. (2016). Visualising the digital twin using web services and augmented reality, 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Poitiers, pp. 522-527. doi: 10.1109/INDIN.2016.7819217.
- Santos, A.C, Jorge, J.M, Kieckbusch, R.E. (2023). Educação em engenharia: as competências na formação do engenheiro. / Adriana Maria Tonini (org.). – 1ª ed. – Goiânia : Editora Alta Performance, [E-book] 352p. : il.
- Shao, G et al. Use case scenarios for digital twin implementation based on iso 23247. **National institute of standards: Gaithersburg, MD, USA**, 2021.
- Stark, R., Damerau, T. (2019) *Digital Twin*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg: 1–8. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1.
- Stark, R, Fresemann, C, Lindow K. (2019) Development and operation of Digital Twins for technical systems and services. *CIRP Ann Manuf Technol* 2019;68:129–32. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.024>.
- Tao, F.; Cheng, J.; Qi, Q.; Zhang, M.; Zhang, H.; Sui, F. (2017). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (), –. doi:10.1007/s00170-017-0233-1
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. (2018). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on industrial informatics*, 15(4), 2405-2415.
- Wymore, A. (1993). *Model-Based Systems Engineering: An Introduction to the Mathematical Theory of Discrete Systems and to the Tricotyledon Theory of System Design*. Boca Raton: CRC Press.
- Y.Fu,G.Zhu,M.Zhu,etal.,Digitaltwinforintegrationofdesignmanufacturingmaintenance:Anoverview,Chin.J.Mech. Eng.35(80)(2022)<http://dx.doi.org/10.1186/s10033022-00760-x>,2022.
- Zimmermann, A. (2018). *Proposição de ambiente de aprendizagem ativa: Laboratório Aberto de Brasília*. 2018. 155 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) - Universidade de Brasília, Brasília.

ANEXO I – XML DESCRIÇÃO OME

Exemplo utilizando XML para descrever o OME equipamento, de acordo com a ISO 23247-3:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<EquipmentInformation>
  <MandatoryInformationAttribute>
    <UUID>e88561dc-2401-4f9a-961c-e90e6424b1dd </UUID>
  </MandatoryInformationAttribute>

  <OptionalInformationAttributes>

    <EquipmentCharacteristics>
      <Functionality>milling</Functionality>
    </EquipmentCharacteristics>

    <EquipmentSchedule>
      <value>Maintenance for Machine #1 is scheduled on every Sunday</value>
    </EquipmentSchedule>

    <EquipmentStatus>

      <status>energy</status>
      <value>10</value>
      <unit>kWh</unit>
    </EquipmentStatus>

    <EquipmentLocation>
      <name>relative</name>
      <value>Machine #2: Work Unit #2 in Room #3</value>
      <gps>
        <longitude>35.5357326</longitude>
        <latitude>129.3800283</latitude>
        <altitude>17</altitude>
      </gps>
    </EquipmentLocation>

    <EquipmentReport>
      <MaintenanceReport timestamp="2019-05-15T18:10:35.153141">
        <startdate>2020-05-14T09:00:10Z</startdate>
        <enddate>2020-05-14T18:00:10Z</enddate>
      </MaintenanceReport>
    </EquipmentReport>

    <EquipmentRelationship>
      <value>WorkUnit #3 must have at least 4 persons for safety reasons</value>
    </EquipmentRelationship>

  </OptionalInformationAttributes>
</EquipmentInformation>
```


ANEXO III – MAPEAMENTO LAB

Fluxo “Impressão 3D”

