



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Desenvolvimento de um *roadmap* sistemático para a concepção de uma
arquitetura de *Digital Twin* aplicado a sistemas legados

Rafael da Silva Mendonça

MANAUS-AM

2024

Rafael da Silva Mendonça

Desenvolvimento de um *roadmap* sistemático para a concepção de uma arquitetura de
Digital Twin aplicado a sistemas legados

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica na área de concentração Controle e Automação de Sistemas na linha de pesquisa Sistemas de Controle e Automação Modernos.

Orientador: Prof. Dr. Vicente Ferreira de Lucena Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Renan Landau Paiva de Medeiros

MANAUS-AM

2024

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M539d Mendonça, Rafael da Silva
Desenvolvimento de um roadmap sistemático para a concepção de uma arquitetura de Digital Twin aplicado a sistemas legados / Rafael da Silva Mendonça . 2024
127 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Vicente Ferreira de Lucena Júnior
Coorientador: Renan Landau Paiva de Medeiros
Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Amazonas.

1. metodologia. 2. retrofitting. 3. sistema legado. 4. Gêmeo digital. 5. arquitetura. I. Lucena Júnior, Vicente Ferreira de. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título



Ministério da Educação
Universidade Federal do Amazonas
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

FOLHA DE APROVAÇÃO

Poder Executivo Ministério da Educação
Universidade Federal do Amazonas
Faculdade de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Av. General Rodrigo Octávio Jordão Ramos, nº 3.000 - Campus Universitário, Setor Norte - Coroado, Pavilhão do CETELI. Fone/Fax (92) 99271-8954 Ramal:2607. E-mail: ppgee@ufam.edu.br

RAFAEL DA SILVA MENDONÇA

DESENVOLVIMENTO DE UM ROADMAP SISTEMÁTICO PARA A CONCEPÇÃO DE UMA ARQUITETURA DE DIGITAL TWIN APLICADO A SISTEMAS LEGADOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica na área de concentração Controle e Automação de Sistemas.

Aprovada em 20 de dezembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renan Landau Paiva de Medeiros- Presidente
Prof. Dr. Florindo Antônio de Carvalho Ayres Junior - Membro Titular 1 - Interno
Prof. Dr. Iury valente de Bessa - Membro Titular 2 - Interno
Prof. Dr Walter Barra Junior - Membro Titular 3 - Externo
Prof. Dr Carlos Tavares da Costa Junior - Membro Titular 4 - Externo

Documento assinado eletronicamente

Manaus, 04 de dezembro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Renan Landau Paiva de Medeiros, Professor do Magistério Superior**, em 20/12/2024, às 11:12, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Iury Valente de Bessa, Professor do Magistério Superior**, em 20/12/2024, às 14:10, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Florindo Antonio de Carvalho Ayres Júnior, Professor do Magistério Superior**, em 20/12/2024, às 15:13, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Walter Barra Junior, Usuário Externo**, em 24/01/2025, às 14:22, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Tavares da Costa Júnior, Usuário Externo**, em 24/01/2025, às 22:35, conforme horário oficial de Manaus, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufam.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2355903** e o código CRC **F10F2510**.

Av. Octávio Hamilton Botelho Mourão - Bairro Coroadó 1 Campus Universitário Senador Arthur Virgílio Filho,
Setor Norte - Telefone: (92) 3305-1181
CEP 69080-900 Manaus/AM - mestrado_engelettrica@ufam.edu.br

Referência: Processo nº 23105.050660/2024-44

SEI nº 2355903

Criado por [31183646291](#), versão 2 por [31183646291](#) em 04/12/2024 11:12:20.

Dedico este trabalho a meus pais que foram minha base e exemplo para minha vida, principalmente à minha mãe que sempre me incentivou e mostrou-me a importância dos estudos, esteve presente em todos os momentos da minha vida e sempre me auxiliou. Dedico também a meu irmão e à minha esposa que me apoiaram em muitos momentos. Estendo esta dedicação a meu Professor-Orientador e a todos os demais professores e amigos que fizeram parte desta trajetória e me ajudaram a chegar até aqui.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por ter-me dado vida, saúde, determinação, coragem, persistência, sabedoria e todas as capacidades necessárias para a realização deste trabalho. Agradeço também a meu pai (*in memoriam*) que muito contribuiu para minha formação. Agradeço à minha mãe que sempre me apoiou incondicionalmente em todos os momentos da minha vida. Agradeço, ainda, a meu irmão e à minha esposa pelo incentivo que me deram; a meus orientadores e aos demais professores e amigos que me auxiliaram nesta jornada. A todos, meus sinceros agradecimentos.

”O correr da vida embrulha tudo. A vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem.”

(Guimarães Rosa)

Resumo

Este estudo fornece uma forma de atualizar sistemas legados, que são tecnologias e arquiteturas desatualizadas que podem não ser capazes de atender aos requisitos da Indústria 4.0 devido à obsolescência. Esta abordagem utiliza principalmente a ideia do Gêmeo Digital para criar uma réplica virtual do sistema com capacidades como simulação contínua, monitoramento e controle. Neste caso, a modernização serve como uma medida de apoio, aprimorando o sistema físico para facilitar a implementação bem-sucedida do Gêmeo Digital. Este processo envolve o desenvolvimento de novos componentes e tecnologias que facilitam a coleta e interpretação dos dados necessários para o modelo digital, além do avanço de tecnologias importantes. A modernização também permite que o sistema seja atualizado mantendo a estrutura e os equipamentos existentes, o que reduz despesas. O modelo de referência RAMI 4.0 serve como base para a arquitetura proposta do Gêmeo Digital, que facilita a integração metódica, camada por camada, do modelo virtual com o sistema físico. Uma abordagem sistemática para a implementação de *retrofit* é, portanto, fornecido pelo estudo, que inclui a identificação dos requisitos e características do sistema legado, a definição de objetivos e pressupostos de modernização, e a avaliação de desempenho tanto qualitativa quanto quantitativamente antes e após a atualização. A integração do sistema melhorado na análise de maturidade do modelo RAMI também é considerada, com foco nos requisitos da fábrica inteligente. Em resumo, a principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de uma arquitetura de Gêmeo Digital especificamente projetada para sistemas legados, destacando os procedimentos essenciais necessários para modernizar a tecnologia legada e fornecendo soluções viáveis e com preços razoáveis nesta área.

Palavras-chave: metodologia, *retrofitting*, sistema legado, Gêmeo digital, arquitetura.

Abstract

This study provides a way to update legacy systems, which are outdated technologies and architectures that may not be able to meet Industry 4.0 requirements due to obsolescence. This approach mainly uses the idea of the Digital Twin to create a virtual replica of the system with capabilities like continuous simulation, monitoring, and control. In this case, retrofit serves as a support measure, enhancing the physical system to facilitate the successful implementation of the Digital Twin. This process involves the development of new components and technologies that facilitate the collection and interpretation of the data needed for the digital model, in addition to the advancement of important technologies. Modernization also allows the system to be updated while keeping the existing structure and equipment, which reduces expenses. The RAMI 4.0 reference model serves as the foundation for the proposed Digital Twin architecture, which facilitates the methodical, layer-by-layer integration of the virtual model with the physical system. A systematic framework for retrofit implementation is thus provided by the study, which includes identifying the requirements and features of the legacy system, setting modernization objectives and assumptions, and assessing performance both qualitatively and quantitatively prior to and following the upgrade. Integration of the improved system into the RAMI model maturity analysis is also considered, with a focus on smart factory requirements. In summary, the main contribution of this work is the development of a Digital Twin architecture specifically designed for legacy systems, highlighting the essential procedures needed to modernize legacy technology and providing workable and reasonably priced solutions in this area.

Keywords: methodology, retrofitting, legacy system, digital twin, architecture.

Lista de Figuras

2.1	Características da <i>Big Data</i> . Adaptado de Atat et al. (2018)	11
2.2	Características da Computação em nuvem. Adaptado de Bajic et al. (2020)	13
2.3	Características da Inteligência Artificial. Adaptado de Ong and Gupta (2019)	14
2.4	Características do <i>Digital Twin</i> . Adaptado de Wu and Lu (2019)	16
2.5	Características do CPS. Adaptado de You and Feng (2020)	18
2.6	Requisitos gerais para aplicação do <i>Retrofit</i> . Adaptado de Contreras Pérez et al. (2018)	23
2.7	Eixos do modelo de RAMI. Adaptado de Bader et al. (2020)	31
4.1	Arquitetura <i>Digital Twin</i>	44
4.2	Níveis de maturidade RAMI. Adaptado de (Bastos et al., 2021)	48
4.3	Procedimento de avaliação da Maturidade de RAMI 4.0	50
4.4	Maturidade de RAMI 4.0: Critérios de fábrica e produto inteligentes e seus parâmetros	51
4.5	Níveis do parâmetro de fábrica inteligente	53
4.6	Fases e etapas do parâmetro de fábrica inteligente	54
4.7	Etapas do parâmetro de produto inteligente	55
4.8	Etapas de aplicação da metodologia <i>Retrofit</i>	57
4.9	Etapas 1 de aplicação da metodologia <i>Retrofit</i>	58
4.10	Etapas 2 de aplicação da metodologia <i>Retrofit</i>	60
4.11	Etapas 3 de aplicação da metodologia <i>Retrofit</i>	61
4.12	Etapas 4 de aplicação da metodologia <i>Retrofit</i>	62
4.13	Etapas 5 de aplicação da metodologia <i>Retrofit</i>	63
4.14	Resultados esperados do sistema atualizado. Adaptado de Contreras Pérez et al. (2018)	65

5.1	Planta MPS - Esboço	69
5.2	Comunicação vertical e horizontal	74
5.3	<i>EasyPort</i>	77
5.4	Comunicação <i>EasyPort</i>	78
6.1	Módulo transportador, Prensa e Tampador	82
6.2	Esteira e outros componentes deteriorados	83
6.3	Braço Robótico e Estoque	84
6.4	Diagrama de funcionamento	85
6.5	MPS atualizado - Módulos M1, M2 e M3	88
6.6	Atualização da CPU do módulo do CLP	89
6.7	Módulo CANopen	90
6.8	Monitoramento Web	90
6.9	Resultado final obtido após a aplicação da metodologia <i>retrofit</i> visando ao <i>Digital Twin</i>	92
6.10	Comunicação e integração com o <i>Digital Twin</i>	94
6.11	<i>Digital Twin</i> da plataforma MPS - sincronização gêmeo físico e virtual. Acessível no link: https://drive.google.com/drive/folders/1o7QbwguQelfzMn2xN6GUocben	
6.12	Gráfico teia de aranha do Sistema Legado X Sistema Atualizado	100

Lista de Tabelas

2.1	Normas IEC do modelo RAMI	28
5.1	Comparativo entre o <i>retrofit</i> da plataforma MPS e aquisição da plataforma CP Lab	80
6.1	Avaliação do critério de maturidade da fábrica inteligente	101

Lista de Abreviaturas e Siglas

AR/VR	<i>Augmented Reality / Virtual Reality</i>
BD	<i>Big Data</i>
CLP	<i>Programmable logic controller</i>
CPS	<i>Cyber-Physical Systems</i>
DT	<i>Digital Twin</i>
EC	<i>Edge Computing</i>
GUI	<i>Interface Gráfica de Usuário</i>
I4.0	<i>Industry 4.0</i>
IA/ AI	<i>Inteligência Artificial / Artificial Intelligence</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IIoT	<i>Industrial Internet of Things</i>
MES	<i>Manufacturing Execution Systems</i>
KPIs	<i>Indicador base de desempenho</i>
MOM	<i>Manufacturing Operations Management</i>
MPS	<i>Modular Producing System</i>
NFC	<i>Near Field Communication</i>
OEM	<i>Original Equipment Manufacturer</i>
RAMI	<i>Reference Architecture Model for Industry 4.0</i>
SGAM	<i>Smart Grid Architecture Model</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Motivação e justificativa	3
1.3	Objetivos	4
1.3.1	Objetivo geral	4
1.3.2	Objetivos específicos	4
1.4	Organização do trabalho	4
2	Background de conceitos fundamentais	6
2.1	Indústria 4.0	6
2.1.1	<i>Internet of Things - IoT</i>	8
2.1.2	<i>Cyber-Physical Systems - (CPS)</i>	9
2.1.3	<i>Big Data - (BD)</i>	11
2.1.4	<i>Edge Computing - (EC)</i>	12
2.1.5	<i>Artificial intelligence - (AI)</i>	14
2.2	<i>Digital Twin - (DT)</i>	15
2.2.1	CPS e DT	18
2.3	<i>Legacy System</i> (Sistemas Legados)	20
2.4	<i>Retrofit</i>	21
2.4.1	Requisitos para aplicação do <i>retrofit</i>	22
2.5	RAMI 4.0	25
2.5.1	Padrões e Recomendações	26
2.5.2	Regulamentações e Normas	27
2.5.3	Eixos do modelo RAMI	31

3	Estado da Arte	33
3.1	Trabalhos relacionados	33
3.1.1	Revisões sistemáticas	34
3.1.2	Sistemas Legados e tecnologias da Indústria 4.0	35
3.1.3	Sistemas <i>Brownfield</i>	37
3.1.4	Estrutura educacional	38
3.1.5	Manutenção preditiva e detecção de falhas	39
3.1.6	Controlador <i>retrofit</i>	40
3.2	Importância da aplicação da metodologia	41
4	Desenvolvimento da arquitetura de <i>Digital Twin</i> aplicado a sistemas legados	43
4.1	Arquitetura <i>Digital Twin</i>	44
4.1.1	Análise de maturidade do modelo de RAMI	47
4.1.1.1	Critério de fábrica inteligente	51
4.1.1.2	Critério de produto inteligente	54
4.2	<i>Roadmap</i> para implementação da metodologia <i>Retrofit</i>	56
4.2.1	Critério de avaliação	64
4.3	Resumo da proposta de aplicação da arquitetura de <i>Digital Twin</i> em sistemas legados	66
5	Estudo de caso: Descrição do sistema legado e aplicação do <i>Retrofit</i>	68
5.1	Sistema Modular de Produção (MPS)	68
5.1.1	<i>Hardware</i>	70
5.1.2	<i>Software</i>	72
5.2	Aplicação do <i>retrofit</i> na plataforma MPS	72
5.2.1	Atualização para <i>CANopen</i> e OPC-UA	73
5.2.2	Integração usando <i>EasyPort</i>	76
5.3	Estimativa de Investimento	78
6	Resultados do desenvolvimento do <i>Digital Twin</i> e <i>roadmap</i> da aplicação	81
6.1	Etapa 1 - Levantamento e limitações de funcionamento da Planta	82
6.2	Etapa 2 - Definição dos objetivos	86
6.3	Etapa 3 - Seleção de componentes e tecnologias a serem atualizados	87

6.4	Etapa 4 - Integração de novos componentes e tecnologias	91
6.5	Etapa 5 - Teste e validação de novos componentes e tecnologias	92
6.6	<i>Digital Twin</i> da plataforma MPS	93
6.7	Nível de Maturidade e critérios de fábrica e produto inteligentes	96
7	Considerações finais	102
7.1	Conclusão	102
7.2	Publicações realizadas em periódicos e conferências	103
	Referências Bibliográficas	105

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

A Indústria 4.0 (I4.0) é uma abordagem que visa aumentar a eficiência e flexibilidade dos processos industriais por meio da utilização de diversas tecnologias. Bajic et al. (2021) e Ahmed et al. (2022) definem as principais tecnologias, características e implementações relacionadas a I4.0. Adicionalmente, definem que a principal finalidade é conectar todos os aspectos do processo produtivo e criar um sistema integrado, adaptável e autônomo.

A I4.0 inclui uma série de tecnologias-chave, como a Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem (CC), sistemas ciberfísicos (CPS), *Big Data* (BD), dentre outras. Em particular, tem-se o *Digital Twin* (DT), que é uma representação virtual de um objeto ou processo físico, que permite simular e reproduzir o comportamento do sistema real. Ele é construído com base nos dados coletados do sistema real e pode ser usado para o desenvolvimento de simulações, monitoramento, previsões e otimizações. Assim, o DT é amplamente utilizado na I4.0, pois permite que o processo físico e seus componentes sejam monitorados e gerenciados em tempo real, possibilitando identificar possíveis problemas e oportunidades antes que eles ocorram, de forma a melhorar a tomada de decisão.

Mihai et al. (2022) conceitua DT como um sistema físico que pode emular o ciclo de vida de um processo industrial, refletir comportamentos, de forma sincronizada, entre o gêmeo físico e o virtual; e, por fim, permitir a integração entre os mundos virtual e físico. A representação do ciclo de vida do produto é composta por ações que acontecem no mundo físico e são simuladas no mundo virtual. Tais informações contêm dados do funcionamento, de atuadores e sensores presentes no sistema.

Em resumo, o DT pode reproduzir o estado do sistema e atualizar dados em tempo real, possibilitando a melhoria contínua dos modelos virtuais, com base nas atualizações provenientes dos ativos físicos. Dentro das diversas aplicações DT possíveis, temos cenários promissores para investigações relacionadas a aplicações e conceitos da I4.0, atualizações de sistemas legados, desenvolvimento de sistemas inteligentes, dentre outras possibilidades.

Nesse contexto, o cenário escolhido foi o de atualizações de sistemas legados, que são aqueles sistemas que foram projetados e implementados em tecnologias e arquiteturas antigas, e que, devido à sua idade, podem não atender mais às necessidades atuais, principalmente às demandas relacionadas à indústria moderna (Indústria 4.0).

Dessa forma, Tran et al. (2022) apresenta a ideia de *retrofit* para um sistema legado, que pode ser definido como o processo de atualização ou modernização de um sistema, geralmente, com a finalidade básica de melhorar o seu desempenho, segurança ou funcionalidade. Portanto, existem várias razões pelas quais é interessante o cenário de aplicação do *retrofit* em um sistema legado. Por exemplo, pode ser que o sistema legado não seja compatível com novos dispositivos ou tecnologias, ou que não atenda mais às necessidades atuais do processo. Além disso, o sistema legado pode ser vulnerável a ameaças de segurança, ou não atender às normas ou regulamentações atuais.

Com base no que foi exposto, a estratégia de atualizar um sistema legado na manufatura busca, de forma eficiente e econômica, integrar tecnologias avançadas que beneficiem o processo produtivo no contexto moderno. O DT emerge como uma ferramenta central nessa transformação, permitindo, por exemplo, a simulação e o monitoramento do sistema.

A meta principal é monitorar, atuar e supervisionar a tomada de decisão por meio da virtualização do sistema. Apesar da importância do *retrofit*, sua utilização aqui é secundária, atuando como um método para preparar o sistema físico para uma implementação eficiente do *Digital Twin*. Assim, o *retrofit* permite a atualização necessária para a total integração do *Digital Twin*, assegurando aprimoramentos na eficiência e funcionalidade do sistema.

1.2 Motivação e justificativa

É importante notar que o *retrofit* de um sistema legado pode ser um processo complexo e caro, pois pode exigir a reescrita de parte ou de todo o código existente, além de envolver muitas etapas de testes e validações, a fim de garantir que a aplicação da atualização atenda aos requisitos atuais e futuros do processo produtivo.

Neste contexto, com base em informações da literatura, este trabalho contribui no desenvolvimento de uma metodologia que destaca o *Digital Twin*, empregando o *retrofit* como um recurso de suporte. A meta é desenvolver um modelo virtual do sistema (estudo de caso), iniciando com a identificação dos requisitos do sistema antigo e a análise de suas qualidades e restrições.

Nesta abordagem, o *retrofit* será empregado para proporcionar a atualização das tecnologias fundamentais a serem implementadas no sistema legado. Isso assegurará a definição da estrutura básica de coleta de dados do sistema físico, possibilitando a junção e o processamento desses dados para alimentar o modelo virtual. A fusão das informações do sistema real com o modelo digital permitirá a supervisão e controle constantes, dentre outras, do rendimento do sistema. Os resultados alcançados serão examinados e confrontados com as metas definidas, garantindo que o DT proporcione percepções úteis para a melhoria do sistema.

O *retrofit* envolve a atualização para componentes mais recentes e avançados. Inclui também a adição de novas tecnologias para integração, melhoria da eficiência e flexibilização do processo. Isso resulta em um melhor desempenho e interoperabilidade do sistema. Além disso, fornece uma solução econômica que permite aproveitar as instalações e equipamentos já existentes, reduzindo os custos de investimento.

A arquitetura *Digital Twin*, que será proposta no decorrer do trabalho, é baseada no modelo de camadas da arquitetura de referência RAMI 4.0. Ela tem como objetivo obter o modelo virtualizado do sistema, sincronização do modelo físico e virtual, monitoramento contínuo do sistema e possíveis reduções no tempo de processo.

O passo a passo para implementação do *retrofit* visa a fornecer um método sistemático e estruturado para atualizar sistemas legados de forma a identificar os requisitos necessários para a atualização, definição dos objetivos e premissas cruciais para o seu desenvolvimento. Por conseguinte, o desempenho do sistema será avaliado usando métodos qualitativos e quantitativos, análise esta realizada antes e depois do processo de atualização. Ademais,

a maturidade do sistema será determinada de acordo com o enquadramento dos níveis da maturidade do modelo de RAMI, nos seus critérios de fábrica inteligente.

Em síntese, a principal contribuição deste estudo é o desenvolvimento de uma arquitetura de *Digital Twin* aplicada a sistemas legados. Em seguida, descrever os passos necessários para a modernização de um sistema antigo, visando à criação de uma representação virtual do sistema através da implementação da arquitetura *Digital Twin* proposta. O enfoque fundamental é incorporar tecnologias que tornem o sistema antigo suficientemente avançado tecnologicamente para interagir com sistemas modernos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver um *roadmap* sistemático para a criação e o desenvolvimento de uma arquitetura de *Digital Twin* aplicada a sistemas legados, com o intuito de incorporar tecnologias que possibilitem a interação com sistemas modernos.

1.3.2 Objetivos específicos

- Desenvolver uma metodologia de *retrofit* aplicado a sistemas legados;
- Avaliar qualitativa e quantitativamente o grau de maturidade de um processo produtivo utilizando como base o modelo de RAMI 4.0;
- Desenvolver a estrutura de hardware necessária para o adequado monitoramento e supervisão do sistema físico;
- Desenvolver um modelo virtualizado do processo produtivo possibilitando a sua adequada representação;
- Integrar de forma eficiente o sistema físico com o sistema virtualizado desenvolvido;

1.4 Organização do trabalho

Os demais capítulos deste trabalho estão dispostos na seguinte estrutura:

-
- Capítulo 2 - Estado da Arte: Trabalhos Relacionados e Técnicas de *Retrofit* na Literatura;
 - Capítulo 3 - Fundamentos da Indústria 4.0: Tecnologias, Sistemas Legados, RAMI 4.0 e *Retrofit*;
 - Capítulo 4 - Metodologia Proposta: Desenvolvimento do *Digital Twin* com suporte do *Retrofit*;
 - Capítulo 5 - Estudo de Caso: Implementação do *Retrofit* e atualizações necessárias;
 - Capítulo 6 - Resultados: Aplicação da Metodologia, Avaliação e Validação;
 - Capítulo 7 - Conclusão: Análise dos Resultados Finais e Considerações Finais.

Capítulo 2

Background de conceitos fundamentais

2.1 Indústria 4.0

O desenvolvimento da indústria é impulsionado por diversos fatores que proporcionam avanços na tecnologia, aumento na produção de bens, mudanças de paradigmas e desenvolvimento de forma geral. Assim, surgem as revoluções industriais que chegam como forma de classificar o desenvolvimento da indústria ao longo da história. Vários autores, entre eles pode-se citar Vinitha et al. (2020); Culot et al. (2020), que detalham cada uma das fases da evolução da indústria na sociedade, iniciando pela Primeira Revolução Industrial (século XVIII), que foi marcada pelo uso da máquina a vapor e pelo surgimento das fábricas. Ela foi responsável por importantes avanços na produção em massa e pelo aumento da eficiência e da produtividade.

Segunda Revolução Industrial (século XIX) foi marcada pelo uso de novas fontes de energia, como, por exemplo, o petróleo e o gás, e pelo surgimento de novas tecnologias, como a linha de produção e a máquina a vapor. Emerge, em seguida, a Terceira Revolução Industrial (século XX), que foi marcada pelo surgimento da informática e da automação, que levaram à introdução de robôs e sistemas de produção mais eficientes.

Atualmente, temos a Quarta Revolução Industrial (século XXI), fase em que uma parte dos processos mencionados estão inseridos. Esta Revolução é marcada pelo surgimento de diversas tecnologias, como, por exemplo: Internet das coisas, Inteligência artificial, robótica avançada, entre outras tecnologias. Estas tecnologias estão mudando

radicalmente a maneira como as empresas produzem e distribuem bens e serviços.

Atualmente, muitas empresas de manufatura esperam que o conceito de Indústria 4.0 (I4.0) tenha um impacto significativo em suas cadeias de suprimento, operações e modelos de negócios. No entanto, é preciso compreender que a implementação de tecnologias da I4.0 é complexa. De acordo com Wagire et al. (2021), a I4.0 visa a tornar os processos de produção mais eficientes e flexíveis, permitindo que as empresas se adaptem rapidamente a mudanças do mercado e ofereçam produtos personalizados em pequena escala. Alguns dos principais aspectos da I4.0 incluem a digitalização de processos de produção, a integração de sistemas de informação e operações, a automação avançada e a colaboração entre sistemas e máquinas.

Portanto, Rikalovic et al. (2022) explica que a indústria é caracterizada por rápidas mudanças tecnológicas em resposta a novos requisitos industriais, tais como: interconexão mais flexível, sistemas de automação ágeis e inteligentes, e grande manipulação de dados. As tecnologias relacionadas à I4.0 incluem: Internet das Coisas (IoT), sistemas ciber físicos (CPS), análise de *Big Data* (BD), computação em nuvem, computação de borda e nuvem, inteligência artificial (IA), realidade aumentada e virtual (AR/VR), robótica, segurança cibernética, tecnologias da *web* semântica e manufatura aditiva (AM).

As características da I4.0 variam, contudo, de maneira geral, a I4.0 é caracterizada pelo uso de tecnologias avançadas que tornam os processos de produção melhores, principalmente, quanto à qualidade e ao tempo de produção. Bosman et al. (2019) cita algumas das principais características que regem o conceito de I4.0, como os apresentados abaixo:

- Digitalização dos processos de produção: A indústria 4.0 envolve a digitalização dos processos de produção, o que permite a coleta e o processamento de grandes quantidades de dados em tempo real. Isso pode ajudar as empresas a tomarem decisões mais precisas e a se adaptarem rapidamente a mudanças do mercado;
- Integração de sistemas de informação e operações: A I4.0 envolve a integração de sistemas de informação e operações, o que permite que as empresas tenham uma visão mais ampla e integrada de todos os aspectos da produção. Isso pode aumentar a eficiência e diminuir os erros;
- Automação avançada: A I4.0 envolve a automação avançada, o que permite que os processos de produção sejam realizados de forma mais precisa e rápida. Ela também

envolve o uso de robôs e outras tecnologias para automatizar tarefas de produção, o que aumenta a produtividade e diminui os custos;

- Realidade aumentada e virtual: Esta envolve o uso de tecnologias que permitem aos usuários visualizar e interagir com informações em um ambiente virtual, o que aumenta a eficiência e a precisão dos processos de produção;
- Análise de dados em tempo real: A análise de dados em tempo real envolve o uso de tecnologias para coletar, processar e analisar grandes quantidades de dados em tempo real;
- Colaboração entre sistemas e máquinas: A I4.0 envolve a colaboração entre sistemas e máquinas, o que permite que os sistemas de produção trabalhem de forma mais integrada e colaborativa. Isso é possível graças à tecnologia de IoT, que permite que os equipamentos e dispositivos da produção sejam conectados à internet e compartilhem dados em tempo real.

Certamente que, com a colaboração entre sistemas e máquinas, é possível automatizar tarefas, tomar decisões mais informadas e se adaptar rapidamente a mudanças no mercado. Além disso, a colaboração entre sistemas e máquinas também pode aumentar a eficiência, a precisão e a produtividade do processo.

2.1.1 *Internet of Things - IoT*

A tecnologia de IoT é um conjunto de dispositivos e objetos conectados à internet que podem coletar, enviar e receber dados. A IoT permite que esses dispositivos e objetos sejam controlados e monitorados remotamente, o que possibilita a automação e a otimização de tarefas e processos. As principais características da IoT são detalhadas em Patel et al. (2016), conforme segue:

- Conectividade: a IoT se baseia na conectividade de dispositivos e objetos, o que permite que eles troquem dados e informações. Isso é possível por meio de tecnologias de comunicação sem fio, como o *bluetooth*, o wi-Fi e tecnologia de NFC (do inglês, *Near Field Communication*);
- Sensores: a IoT inclui dispositivos e objetos que possuem sensores, que são capazes de coletar dados sobre o ambiente, como: temperatura, umidade, luminosidade,

entre outros. Isso permite que os dispositivos e objetos da IoT possam monitorar e controlar o ambiente em que estão inseridos;

- **Análise de dados:** a IoT permite a análise de dados em grande escala, o que possibilita a tomada de decisões baseadas em dados e informações. Isso é possível por meio de tecnologias de *Big Data* e análise de dados;
- **Automação:** a IoT permite a automação de tarefas e processos, significando que os dispositivos e objetos podem ser controlados e monitorados remotamente, o que ocorre por meio de técnicas de controle e automação;
- **Otimização:** a IoT permite a otimização de tarefas e processos, o que significa que os dispositivos e objetos podem ser ajustados de maneira a maximizar a eficiência e a produtividade. Isso é possível por meio de técnicas de otimização e gerenciamento de recursos.

Segundo Eldrandaly et al. (2019), a tecnologia de IoT envolve a conexão de dispositivos e equipamentos à internet, permitindo que eles colem e compartilhem dados em tempo real. A IoT é uma tecnologia-chave para a I4.0, pois permite a coleta e o processamento contínuo de dados de sensores e atuadores em máquinas, equipamentos e infraestruturas. Essa tecnologia é importante, pois permite o controle e o monitoramento remoto, o que possibilita a automação e a otimização de tarefas e processos. Além disso, de forma mais ampla, é possível a análise de dados em grande escala, o que facilita a tomada de decisões baseadas em dados e informações.

2.1.2 *Cyber-Physical Systems* - (CPS)

O Sistema ciber físico (CPS, do inglês *Cyber-Physical Systems*) é um termo que se refere a sistemas que integram tecnologias de computação e de comunicação com sistemas físicos, como: máquinas, equipamentos e infraestruturas. Hahanov et al. (2019) apresenta uma visão geral dos principais conceitos e tecnologias relacionadas a CPS e IoT, incluindo arquiteturas, protocolos de comunicação e padrões de interoperabilidade. Assim, tem-se uma tecnologia que pode ser utilizada para monitorar, controlar e automatizar processos de produção e operações em diferentes áreas, como: indústria, transporte, saúde, energia, entre outras. As principais características de um CPS são:

1. Integração de tecnologias de computação e comunicação com sistemas físicos: os CPS integram tecnologias de computação e comunicação, como: sensores, atuadores, computadores, redes de comunicação e sistemas de controle, integrados com sistemas físicos, como máquinas, equipamentos e infraestruturas;
2. Monitoramento e controle de processos: os CPS permitem monitorar e controlar os processos de produção e operação em tempo real, coletando e analisando dados de sensores e atuadores. Isso permite tomar decisões e ajustar o funcionamento dos sistemas físicos, de acordo com os objetivos da empresa ou da organização;
3. Automatização de tarefas: os CPS permitem automatizar tarefas e processos, liberando mão de obra para outras atividades e aumentando a eficiência e a produtividade da empresa ou organização;
4. Integração com outros sistemas: os CPS podem ser integrados com outros sistemas, como: sistemas de informação, sistemas de gerenciamento de produção e sistemas de gerenciamento de operações. Tais sistemas possibilitam a troca de informações e a integração de processos em uma abordagem mais ampla de gestão da empresa ou organização;
5. Flexibilidade e adaptabilidade: os CPS são sistemas flexíveis e adaptáveis, pois podem ser facilmente configurados e modificados para atender às mudanças nas necessidades da empresa ou organização;
6. Escalabilidade: os CPS podem ser facilmente expandidos e adaptados para atender a crescimentos na demanda ou para atender a novas necessidades da empresa ou da organização;
7. Segurança e confiabilidade: os CPS são sistemas seguros e confiáveis, pois utilizam medidas de segurança para proteger os dados e os processos contra ameaças externas e internas, bem como para garantir a continuidade das operações da empresa ou organização.

Em resumo, CPS refere-se a integração de elementos computacionais e físicos em vários sistemas e processos, ou seja, combinação de *hardware*, *software*, comunicação e controle, possibilitando a interação e coordenação de componentes físicos e digitais.

2.1.3 *Big Data* - (BD)

O termo denominado de *Big Data*, traduzido literalmente por "Grandes dados", é um termo usado para descrever grandes conjuntos de dados que são difíceis de serem processados e armazenados por meios tradicionais, como banco de dados relacionais. Segundo Atat et al. (2018), o potencial do *Big Data* é bem promissor e tem uma série de aplicações em CPS, dentre as quais podem-se citar o monitoramento de sistemas de energia, o gerenciamento de tráfego em redes de transporte e o gerenciamento de processos industriais. Quanto aos processos industriais, o principal foco é melhorar a eficiência, a qualidade e a segurança. Assim, como mostra a Figura 2.1, serão descritas as principais características do *Big Data*, da seguinte maneira:

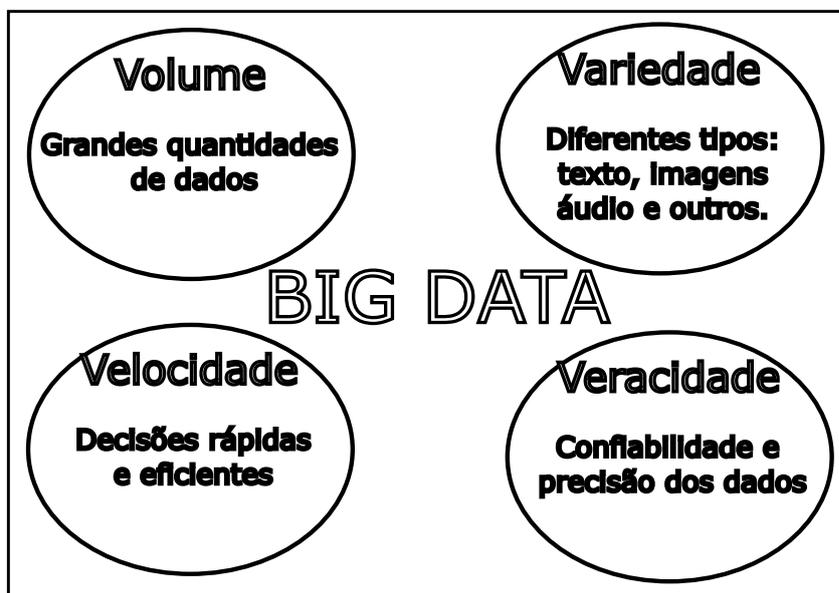


Figura 2.1: Características da *Big Data*. Adaptado de Atat et al. (2018)

1. **Volume:** *Big Data* se refere a grandes quantidades de dados, que podem ser gerados por diferentes fontes, como: dispositivos móveis, redes sociais, sensores, entre outros;
2. **Velocidade:** *Big Data* é gerado em alta velocidade, o que significa que os dados são coletados e processados em tempo real. Isso é importante para permitir a tomada de decisões rápidas e eficientes;
3. **Variedade:** *Big Data* pode ser de diferentes tipos, como: texto, imagem, áudio, vídeo, entre outros. Isso significa que o *Big Data* pode incluir dados estruturados, como dados em tabelas, e dados não estruturados, como textos e imagens;

4. **Veracidade:** *Big Data* pode ser gerado por diferentes fontes, o que pode gerar incertezas em relação à veracidade dos dados, por isso, é importante realizar uma análise de qualidade dos dados para garantir que estes são confiáveis e precisos.

Como se vê, essa tecnologia permite o armazenamento e o processamento de grandes quantidades de dados, proporcionando a análise de padrões e tendências e a tomada de decisões, baseadas em *insights* gerados a partir dos dados. Certamente, a *Big Data* é uma tecnologia importante para a I4.0, pois permite a análise dos dados coletados pelos sensores e atuadores da IoT.

De acordo com D’Alconzo et al. (2019), o tratamento de grandes volumes de dados exige tecnologias e técnicas específicas, como o processamento em paralelo, o armazenamento distribuído e a análise de dados em tempo real. Portanto, *Big Data* é importante, porque permite a análise de dados em grande escala, o que pode fornecer *insights* valiosos para a tomada de decisões. Além disso, a *Big Data* pode, ainda, ser usada para prever tendências, identificar padrões e detectar problemas de forma rápida e eficiente, dentre outras aplicações.

2.1.4 *Edge Computing* - (EC)

A computação de borda (EC, do inglês Edge computing) é uma abordagem de computação que permite que os dados sejam processados e armazenados localmente, perto do dispositivo ou sensores que coletam os dados. Segundo Bajic et al. (2020), em vez de enviar todos os dados para um centro de dados ou nuvem para processamento, a computação de borda permite que os dados sejam processados e analisados localmente, o que pode reduzir o tempo de latência e o tráfego de rede.

Tal abordagem é especialmente útil em aplicações que exigem tempo de resposta rápida ou que estão em áreas com baixa conectividade de rede. Além disso, a computação de borda permite a realização de análises de dados em tempo real, o que pode ser útil em aplicações de monitoramento e controle em tempo real.

Por ser uma tecnologia que permite o processamento de dados em dispositivos de borda, a resposta é mais rápida e tem menos latência do que o processamento em nuvem, pois os dados não precisam ser transmitidos até os centros de dados para serem processados. Algumas das principais características são como as mostradas na Figura 2.2, e segundo Bajic et al. (2020), podem ser sintetizados nos seguintes itens:

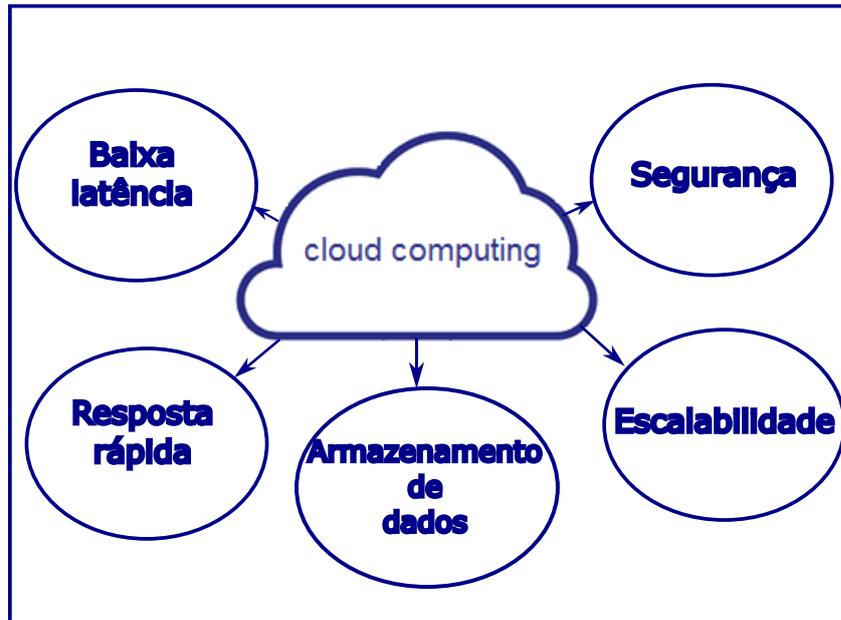


Figura 2.2: Características da Computação em nuvem. Adaptado de Bajic et al. (2020)

- **Baixa latência:** como os dados são processados localmente, a latência é menor do que no processamento em nuvem;
- **Resposta rápida:** o processamento local permite uma resposta mais rápida aos dados, o que é importante em aplicações em tempo real;
- **Armazenamento de dados:** os dispositivos de borda podem armazenar dados localmente, o que é útil em situações onde a conectividade de rede é limitada;
- **Segurança:** o processamento de dados em dispositivos de borda pode ser mais seguro do que o processamento em nuvem, pois os dados não precisam ser transmitidos para um centro de dados;
- **Escalabilidade:** o EC permite a escalabilidade horizontal, o que significa que novos dispositivos de borda podem ser adicionados facilmente às redes existentes.

Por fim, o trabalho de Douch et al. (2022) mostra que a Computação de Borda está emergindo como uma alternativa inovadora à computação em nuvem, trazendo-a mais próxima dos usuários. A EC consiste na transferência de poder de computação e inteligência da nuvem central para a borda da rede, permitindo o processamento e armazenamento em *cache* de dados na borda, diminuindo a congestão e latência da rede.

2.1.5 *Artificial intelligence* - (AI)

A Inteligência Artificial (IA) é um conjunto de técnicas e tecnologias que permite aos computadores realizar tarefas que normalmente exigem inteligência humana, como: o raciocínio, o aprendizado, a percepção, a linguagem e a criação de soluções para problemas. Segundo Ong and Gupta (2019), em sua pesquisa, descreve os cinco pilares fundamentais da pesquisa em Inteligência Artificial (IA), sendo: aprendizado de máquina, linguagem natural, visão computacional, robótica, raciocínio e planejamento. E, em seguida, cita as principais características da IA, como as mostradas abaixo, na Figura 2.3:

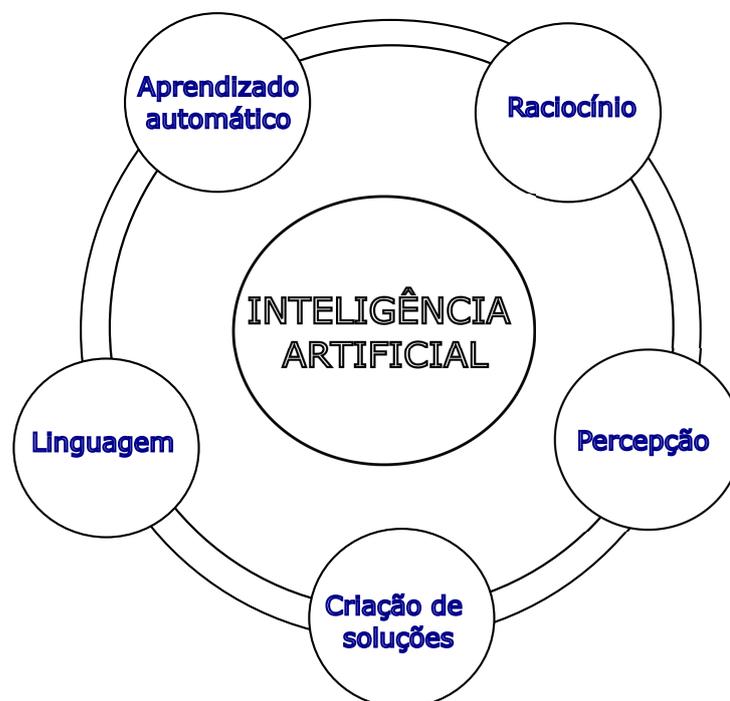


Figura 2.3: Características da Inteligência Artificial. Adaptado de Ong and Gupta (2019)

- **Aprendizado automático:** a IA é capaz de aprender por si mesma, sem a necessidade de serem explicitamente programadas para realizar uma tarefa. Isso é possível por meio de técnicas de aprendizado automático, como o aprendizado supervisionado, o aprendizado não-supervisionado e o aprendizado por reforço;
- **Raciocínio:** a IA é capaz de raciocinar e tomar decisões com base em dados e informações. Isso se dá por meio de técnicas de raciocínio lógico e probabilístico;
- **Linguagem:** a IA é capaz de entender e produzir linguagem humana, o que inclui o texto, o áudio e o vídeo, o que se torna possível por meio de técnicas de processamento de linguagem natural;

- **Percepção:** a IA é capaz de perceber o mundo ao seu redor por meio de sensores e câmeras, o que inclui a percepção dos sentidos humanos da visão, do tato, do olfato e do ouvido. Isso se dá por meio de técnicas de processamento de sinais e imagens;
- **Criação de soluções para problemas:** a IA é capaz de criar soluções para problemas complexos por meio de técnicas de otimização, como o algoritmo genético e a busca heurística.

Vê-se, assim, que a IA permite que computadores realizem tarefas que requerem inteligência humana, como: aprendizado, raciocínio e adaptação. A IA é, ainda, uma tecnologia importante para a I4.0, pois permite a automação de tarefas e processos, bem como a tomada de decisões em tempo real. Através dos computadores, que realizam tarefas de maneira mais rápida e precisa do que os seres humanos, é possível sua utilização para automatizar processos, tomar decisões complexas e prever tendências.

Em resumo, a IA envolve o uso de algoritmos de aprendizado de máquina para analisar grandes quantidades de dados e tomar decisões por conta própria. Isso pode aumentar a eficiência e a precisão dos processos de produção, de forma que, segundo Schrettenbrunnner (2020), a IA pode ser uma ferramenta valiosa para a tomada de decisões para a automação de tarefas rotineiras e a análise de dados, entre outras aplicações, sempre observando as vantagens e desvantagens que envolvem a tecnologia.

2.2 *Digital Twin* - (DT)

Um desenvolvimento-chave na tecnologia de simulação, durante as últimas fases da indústria, é o conceito de DT ou gêmeos digitais. Assim, de acordo com Kritzinger et al. (2018), um gêmeo digital pode ser definido como uma representação virtual de um sistema físico que está integrado nos dados reais do processo. Ele é criado capturando dados de sensores e outras fontes e, com o uso desses dados, cria um modelo virtual do objeto ou sistema.

Portanto, o DT é uma representação digital de um sistema, processo ou produto físico, que permite simular e analisar o comportamento desse sistema, processo ou produto. De acordo com Mihai et al. (2022), o DT é criado com base em dados coletados de sensores e outros dispositivos de medição presentes no sistema, processo ou produto físico. Algumas

das principais características são mostradas na Figura 2.4; são detalhadas por Wu and Lu (2019), e podem ser encontradas sumarizadas abaixo:

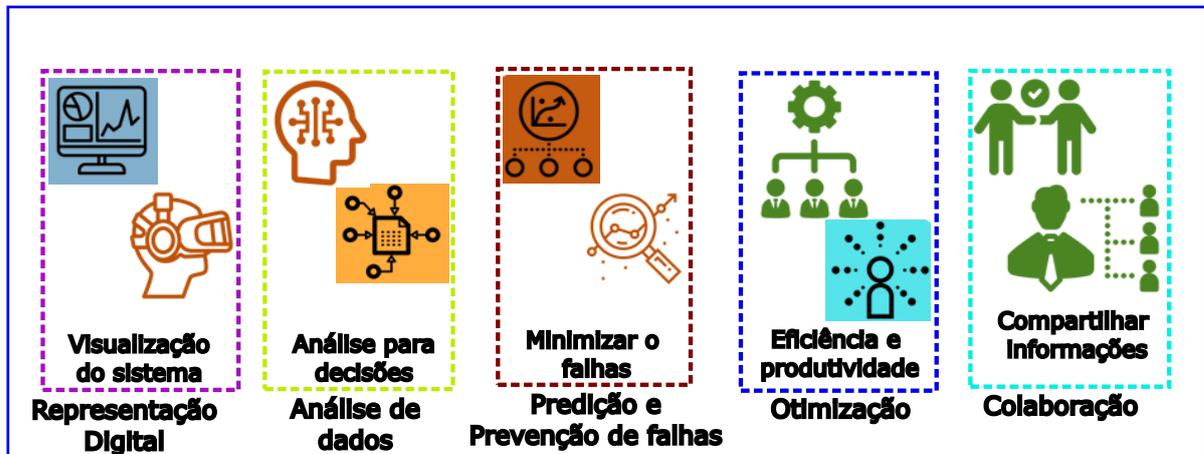


Figura 2.4: Características do *Digital Twin*. Adaptado de Wu and Lu (2019)

- **Representação digital:** o DT é uma representação digital de um sistema, processo ou produto físico, que permite simular e analisar o comportamento deste sistema, processo ou produto;
- **Análise de dados:** o DT permite a análise de dados em tempo real, o que possibilita a tomada de decisões, baseadas em dados e informações. Além disso, o DT pode ser usado para prever o comportamento futuro do sistema, processo ou produto;
- **Predição e prevenção de falhas:** o DT pode ser usado para prever falhas no sistema, processo ou produto, o que permite tomar medidas preventivas para evitar ou minimizar o impacto das falhas;
- **Otimização:** o DT pode ser usado para otimizar o desempenho do sistema, processo ou produto, o que significa que é possível ajustar os parâmetros de operação para maximizar a eficiência e a produtividade;
- **Colaboração:** o DT permite a colaboração entre equipes e departamentos, o que significa que é possível compartilhar informações e trabalhar em conjunto para resolver problemas e tomar decisões.

De acordo com o que foi descrito sobre a Figura 2.4, pode-se observar que o DT é importante porque permite simular e analisar o comportamento de um sistema, processo

ou produto, o que possibilita a tomada de decisões, baseadas em dados e informações. Além disso, ele permite prever falhas e otimizar o desempenho do sistema, processo ou produto e possibilita ainda a colaboração entre equipes e departamentos.

O DT pode então ser usado para uma variedade de propósitos: prever como o objeto ou sistema se comportará sob diferentes condições, otimizar seu desempenho ou simular seu comportamento. Essa tecnologia é usada também em uma ampla gama de indústrias, incluindo desenvolvimento de produtos, indústria aeroespacial e biomédica.

Outra descrição de DT proposta por Li et al. (2020) é referente a uma reprodução de *software*, quase em tempo real, do estado de um conjunto concebido de equipamentos. Para que tal fato seja possível, é necessário que os bens possam se comunicar entre si e trocar dados com redes internas e externas. Uma simulação voltada para sistemas inteligentes da manufatura fornecerá os meios necessários para implementar outras ferramentas de ciência de dados, tais como modelos analíticos de dados preemptivos, e decisão automatizada em tempo real, baseada em Inteligência Artificial.

Em Bastos et al. (2021), são detalhadas as principais características da arquitetura, focando na camada de *software*, que é responsável pela representação virtual, o que permite reações e previsões de forma incomparável. O tempo de resposta é drasticamente reduzido e, com isso, o impacto negativo de ocorrências indesejadas pode ser completamente evitado ou exponencialmente reduzido.

Em síntese, um DT é um conjunto de objetos virtuais que pode simular o comportamento do sistema real no ambiente implementado, e inclui as características, condição e comportamento do sistema real através de recursos virtuais acessíveis, como modelos e dados. Segundo Haag and Anderl (2018), para aplicar o DT, é necessário ter uma estrutura de suporte que inclua os seguintes elementos:

- **Hardware e software:** é necessário ter equipamentos e sistemas de computação para coletar, armazenar, processar e analisar os dados do DT. Isso inclui sensores, computadores, servidores e plataformas de análise de dados;
- **Equipe de tecnologia da informação:** é necessário ter uma equipe de profissionais de TI para gerenciar o *hardware* e o *software* do DT, bem como para desenvolver e implementar soluções de tecnologia da informação para suportar o DT;
- **Equipe de especialistas:** é importante ter uma equipe de especialistas que enten-

dam os processos de produção e possam ajudar a identificar os indicadores-chave de desempenho (KPIs) a serem monitorados pelo DT;

- **Processos e procedimentos:** é conveniente estabelecer processos e procedimentos para coletar, armazenar, processar e analisar os dados do DT, bem como para utilizar esses dados para tomar decisões e gerar *insights* para a empresa;
- **Governança de dados:** é útil ter uma estratégia de governança de dados para garantir a qualidade, a integridade e a segurança dos dados do DT.

2.2.1 CPS e DT

Em You and Feng (2020) é proposto, como mostra a Figura 2.5, um quadro conceitual para a integração do CPS e DT e outras tecnologias relacionadas à indústria e esboçam as etapas para desenvolver a ideia. Essas etapas são essenciais para a implementação de sistemas de processamento ciber-físico, que são usados em uma variedade de setores, incluindo manufatura, automação industrial, saúde, transporte e muitos outros, para melhorar o monitoramento, controle e eficiência de sistemas físicos complexos.

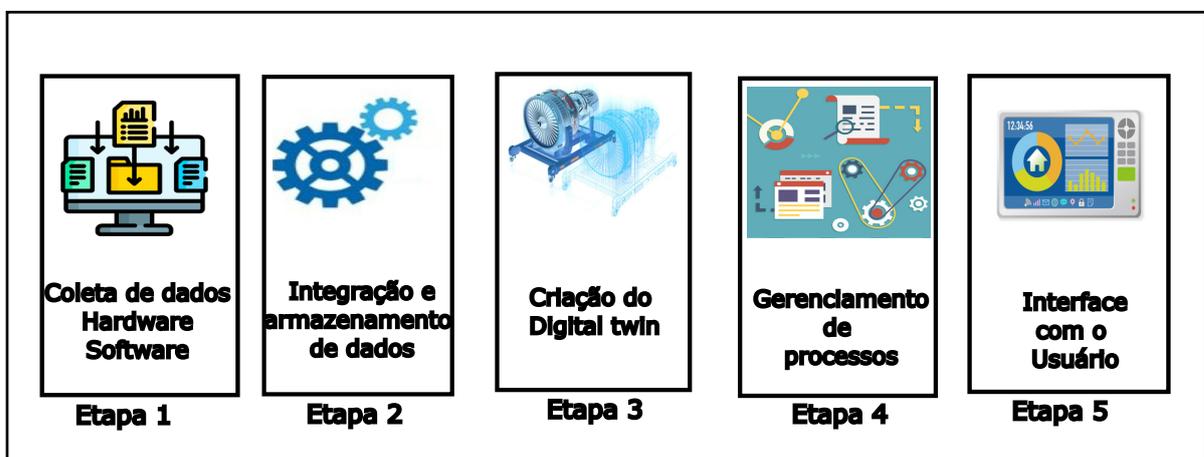


Figura 2.5: Características do CPS. Adaptado de You and Feng (2020)

Coleta de dados (Etapa 1): Nesta etapa, sensores e outros dispositivos de medição são instalados nos sistemas físicos que se deseja monitorar ou controlar. Esses sensores são responsáveis por coletar dados e informações relevantes sobre o sistema, como temperatura, pressão, umidade, velocidade, etc. Os sensores coletam continuamente dados do sistema físico, que podem incluir informações sobre o estado atual, o ambiente e as condições de operação. Os dados coletados pelos sensores podem ser analógicos (como

sinais de voltagem) ou digitais, e a escolha dos sensores depende das especificidades do sistema e das variáveis que precisam ser monitoradas.

Integração de dados (Etapa 2): Os dados coletados pelos sensores e dispositivos de medição são então integrados e armazenados em um sistema de banco de dados. Esta etapa envolve a organização dos dados para facilitar o acesso e análise posterior. Um sistema de banco de dados é utilizado para armazenar essas informações de forma estruturada. A integração dos dados envolve a organização, a estruturação e a catalogação para facilitar o acesso e a recuperação. Os dados podem ser armazenados em formatos tabulares, bancos de dados relacionais ou sistemas de armazenamento de dados distribuídos, dependendo da escala e complexidade do sistema.

Criação do *Digital Twin* (Etapa 3): Com base nos dados coletados e armazenados, cria-se o Digital Twin (DT) do sistema físico. Ele permite simular o comportamento do sistema físico em tempo real ou em cenários virtuais. O DT fornece uma visão abrangente do sistema físico, incluindo suas características, operações e interações com o ambiente. Isso permite análises avançadas, previsões e testes de cenários.

Gerenciamento de processos (Etapa 4): As informações fornecidas pelo DT são usadas para gerenciar os processos de negócio relacionados ao sistema físico. Isso inclui a automação de processos, otimização de operações e tomada de decisões informadas. A tomada de decisões é aprimorada, uma vez que os dados e as análises do DT são usados para apoiar decisões estratégicas e operacionais.

Interface do usuário (Etapa 5): Nesta etapa, é importante fornecer aos usuários uma interface através da qual eles possam acessar as informações e funcionalidades disponíveis no CPS. Isso pode ser uma interface gráfica de usuário (GUI) ou outra forma de interação, como um painel de controle, aplicativo móvel, ou até mesmo comandos de voz, dependendo das necessidades do usuário. A interface do usuário pode ser projetada para atender às necessidades específicas dos diferentes usuários, fornecendo informações relevantes e funcionalidades adequadas para diferentes funções, como operadores, gerentes, engenheiros e tomadores de decisão.

2.3 *Legacy System* (Sistemas Legados)

Um Sistema Legado é um sistema defasado tecnologicamente, tanto em *software* e/ou *hardware*, geralmente herdado de uma empresa anterior ou de uma tecnologia obsoleta, que ainda é utilizado por uma empresa ou organização. Esses sistemas podem ser complexos e difíceis de gerenciar e atualizar, e podem ser difíceis de integrar considerando as novas tecnologias e tendências.

Em geral, as empresas optam por manter os sistemas legados, porque eles ainda são importantes para o negócio e possuem dados valiosos, mas isso também pode ser um obstáculo para a inovação e a eficiência. Estrategicamente, algumas empresas optam por modernizar ou substituir sistemas legados por sistemas mais atualizados, enquanto outras optam por mantê-los e gerenciá-los da melhor maneira possível.

Segundo Tran et al. (2022), sistemas legados, geralmente, foram desenvolvidos com tecnologias mais antigas e podem ser difíceis de manter ou atualizar. Dessa forma, é possível listar algumas características desse tipo de sistema:

1. **Tecnologias antigas:** Sistemas legados geralmente foram desenvolvidos com tecnologias antigas, como linguagens de programação ou sistemas operacionais que não são mais amplamente usados. Isso pode dificultar a integração, manutenção ou a atualização do sistema;
2. **Código complexo:** Sistemas legados podem ter código complexo, pois foram desenvolvidos há muito tempo e podem ter sido modificados várias vezes ao longo dos anos. Isso pode dificultar a compreensão do sistema e a realização de alterações e/ou melhorias;
3. **Integração com outros sistemas:** Sistemas legados geralmente estão integrados com outros sistemas de negócios, o que pode tornar difícil a substituição ou a atualização do sistema sem afetar os outros sistemas;
4. **Dificuldade de atualização:** Sistemas legados podem ser difíceis de atualizar, pois podem depender de componentes ou tecnologias antigas que não são mais disponíveis ou são difíceis de obter. Isso pode aumentar os custos de manutenção e de atualização do sistema;

5. **Baixa flexibilidade:** Sistemas legados podem ser menos flexíveis do que os sistemas modernos, pois foram desenvolvidos com tecnologias antigas e podem não ter sido projetados para se adaptar facilmente a novas necessidades ou mudanças no mercado;
6. **Baixa segurança:** Sistemas legados podem ter menos medidas de segurança do que os sistemas modernos, pois foram desenvolvidos há muito tempo e podem não ter sido projetados para proteger contra ameaças de segurança atuais;
7. **Dificuldade de treinamento:** Sistemas legados podem ser difíceis de treinar, pois podem ter interfaces complicadas ou requerer conhecimento de tecnologias antigas. Isso pode aumentar o tempo e os custos de treinamento do pessoal.

2.4 *Retrofit*

Retrofitting, também conhecido como *retrofit*, é o processo de adicionar novas tecnologias ou melhorias a um sistema ou equipamento existente. Isso pode ser feito para aumentar a eficiência, adicionar novas funcionalidades ou atualizar para atender a novas regulamentações ou padrões.

Na indústria, ao abordar o processo de *retrofit*, emprega-se o termo "*Brownfield*" para descrever aprimoramentos nos sistemas legados. Conforme mencionado em Etz et al. (2020), essa terminologia é utilizada quando o resultado do projeto é concebido para se integrar a algo já existente. Isso ocorre em situações em que já existem instalações e facilidades às quais o processo de *retrofit* do projeto será incorporado.

O termo *Brownfield* se aplica especificamente à atualização de sistemas ou processos produtivos que já estão em funcionamento, enquanto que o termo *Greenfield* se aplica à construção de um novo sistema ou processo produtivo.

Para realizar o *retrofit* ou o *Brownfield*, são necessários alguns pré-requisitos específicos. Primeiramente, a identificação dos objetivos e metas da atualização para definir a estratégia e o plano de ação adequados. Em seguida, análise do sistema ou processo atual, com a finalidade de identificar os problemas e pontos fortes, bem como os requisitos e restrições da atualização.

Posteriormente, deve-se selecionar os componentes e tecnologias a serem atualizados; procedimento cuja finalidade é a adequação e alinhamento quanto aos objetivos e metas

da atualização, ou seja, buscar atender aos requisitos e restrições do sistema ou processo atual.

Segundo Zhang et al. (2018), o *retrofit* pode ser feito em uma ampla gama de sistemas e equipamentos, incluindo edifícios, veículos, máquinas industriais e sistemas de informação. Algumas das razões comuns para realizar *retrofit* incluem a necessidade de atualizar tecnologias obsoletas, reduzir custos operacionais, melhorar a segurança ou a eficiência energética e atender a novas regulamentações ou padrões de desempenho.

A abordagem de *retrofit* oferece uma maneira de aprimorar o desempenho de sistemas legados sem a necessidade de construir um sistema completamente novo. Enquanto isso, a arquitetura de gêmeos digitais possibilita a criação de um modelo digital, em tempo real, de um sistema físico, permitindo que engenheiros de controle simulem o comportamento do sistema em diversas condições. Isso, por sua vez, contribui para a otimização do desempenho e a redução de custos.

Por certo, a integração do *retrofit* e da arquitetura de gêmeos digitais oferece uma oportunidade significativa de melhorar a eficiência e a segurança de sistemas existentes. Além disso, o *retrofit* pode ser empregado para atualizar componentes ou subsistemas específicos, enquanto a arquitetura de gêmeos digitais viabiliza a simulação e o monitoramento do sistema como um todo em tempo real.

2.4.1 Requisitos para aplicação do *retrofit*

Alguns requisitos gerais, para realizar um *retrofit*, são apresentados por Contreras Pérez et al. (2018) e mostrados, de forma adaptada, na Figura 2.6. Elas estão detalhadas abaixo, de forma a garantir que o *retrofit* seja realizado com eficiência e sucesso, resultando em melhorias substanciais nos sistemas ou equipamentos existentes.

1. Identificação do sistema ou equipamento e definição de objetivos: O primeiro passo é identificar o sistema ou equipamento que requer a atualização (*retrofit*) e estabelecer os objetivos claros do projeto. Estes objetivos podem incluir o aumento da eficiência, a incorporação de novas funcionalidades, ou a adequação do sistema às regulamentações e padrões atuais.
2. Avaliação detalhada do sistema atual: Realizar uma avaliação minuciosa do sistema ou equipamento existente é crucial. Isso envolve uma análise profunda para

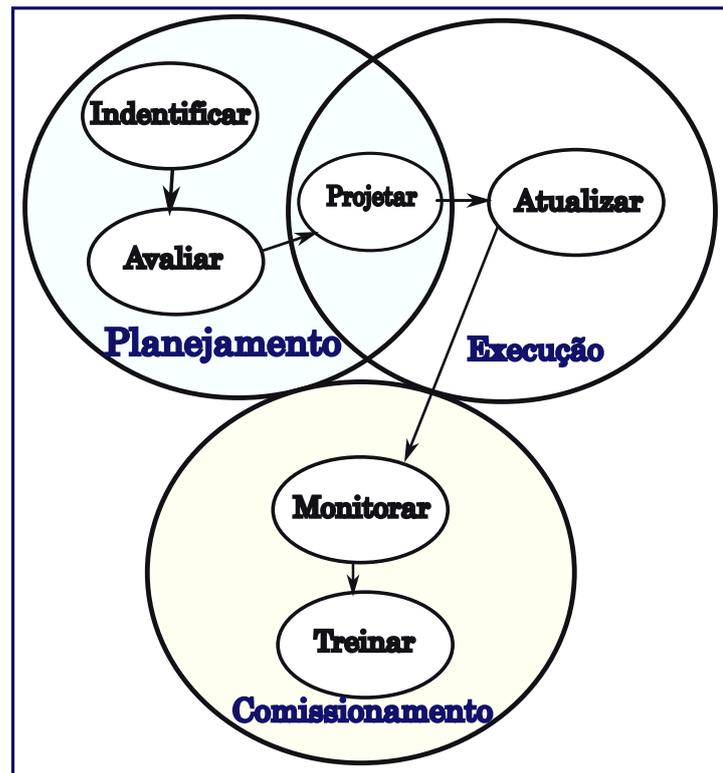


Figura 2.6: Requisitos gerais para aplicação do *Retrofit*. Adaptado de Contreras Pérez et al. (2018)

identificar quais componentes estão obsoletos ou necessitam de atualização. Uma compreensão completa do sistema é fundamental para determinar os próximos passos.

3. *Design* das melhorias ou atualizações: Com base na avaliação, deve-se projetar as melhorias ou atualizações necessárias. Isso inclui a seleção de novas tecnologias ou componentes que irão substituir ou complementar os antigos. O *design* deve ser cuidadoso e preciso.
4. Obtenção de aprovações e licenças: Antes de prosseguir com o *retrofit*, é essencial garantir que todas as aprovações e licenças necessárias sejam obtidas. Isso inclui aprovações regulatórias, permissões de construção ou outras autorizações necessárias.
5. Desligamento e remoção dos componentes antigos: O próximo passo envolve desligar o sistema ou equipamento e remover todos os componentes obsoletos ou que serão substituídos, o que requer atenção à segurança e também pode envolver procedimentos de desmontagem específicos.

6. Instalação das novas tecnologias ou componentes: Uma vez que os componentes antigos tenham sido removidos, deve-se instalar as novas tecnologias ou componentes conforme projetado. Isso requer habilidades técnicas e precisão para garantir que tudo seja integrado corretamente.
7. Teste e verificação do sistema: Após a instalação, é crucial testar o sistema ou equipamento para garantir que funcione corretamente. Isso inclui verificações abrangentes e testes de desempenho para assegurar que as metas do *retrofit* estejam sendo atendidas.
8. Monitoramento do desempenho pós-*retrofit*: Após a conclusão, o sistema ou equipamento deve ser monitorado de perto para garantir que ele atinja e mantenha os objetivos estabelecidos pelo *retrofit*. Isso pode envolver a coleta contínua de dados e análise de desempenho.
9. Treinamento do pessoal: Por fim, é importante fornecer treinamento para o pessoal responsável pelo sistema ou equipamento atualizado, o que inclui orientação sobre como operar e manter as novas tecnologias ou componentes, garantindo a utilização eficaz do sistema.

No entanto, para implementar as tecnologias associadas ao conceito da I4.0 é de suma importância considerar quais métodos e técnicas podem ser empregados, bem como quais tecnologias são relevantes para a aplicação. Isso é alcançado por meio da análise dos requisitos do sistema descrito anteriormente. Além disso, abrange a formulação de uma estratégia para alcançar os objetivos preestabelecidos. Exige também, a definição de etapas que compreendem desde a identificação e caracterização do problema, a coleta de dados e a análise de dados e a interpretação dos resultados.

Por conseguinte, a implementação do *retrofit* pode ser mesmo desafiadora devido a diversos problemas que podem surgir, e essas dificuldades podem ser sumarizadas da seguinte maneira:

- Compatibilidade de tecnologias: Uma das principais barreiras no processo de *retrofit* é a compatibilidade entre as tecnologias antigas e as novas. Sistemas legados podem não ser facilmente integrados com as tecnologias mais avançadas, usadas no *retrofit*, o que pode dificultar a implementação da metodologia. Isso requer um planejamento cuidadoso para garantir que as tecnologias se harmonizem.

- Falta de recursos: O *retrofit* pode ser um empreendimento dispendioso, exigindo recursos significativos, o que pode incluir alocação de tempo, mão de obra especializada e a adoção de tecnologias avançadas. A aquisição desses recursos extras pode ser um desafio, especialmente em termos de custo e disponibilidade.
- Mudanças nos processos: A introdução do *retrofit* muitas vezes requer mudanças nos processos de produção existentes. Essas alterações podem ser difíceis de implementar e, em alguns casos, podem causar interrupções na produção. É necessário um planejamento cuidadoso para minimizar o impacto nas operações existentes.
- Dificuldade de monitoramento: Monitorar e gerenciar máquinas e equipamentos que passaram por *retrofit* pode ser uma tarefa desafiadora, especialmente se esses equipamentos estiverem dispersos geograficamente ou se houver problemas de conectividade. Garantir que esses sistemas estejam funcionando de forma ideal exige soluções de monitoramento eficazes.
- Falta de treinamento: Garantir que os usuários do sistema estejam devidamente treinados para operar e manter o equipamento atualizado é essencial. A falta de treinamento adequado pode resultar em subutilização do sistema e em dificuldades na manutenção.

Portanto, para alcançar o *retrofit* bem-sucedido, é fundamental reconhecer que limitações tecnológicas e de implementação podem surgir, especialmente quando se lidam com sistemas muito antigos que não podem ser facilmente atualizados. Ademais, é crucial realizar uma avaliação completa e coletar todos os requisitos do sistema legado; planejar cuidadosamente a implementação e garantir a disponibilidade dos recursos necessários, para superar essas dificuldades e alcançar o sucesso do *retrofit*.

2.5 RAMI 4.0

A arquitetura RAMI, também conhecida como arquitetura RAMI 4.0, é um modelo de arquitetura de sistemas que é usado para ajudar as empresas a introduzir a I4.0. De acordo com Quatromoni (2018), o acrônimo RAMI significa "Reference Architecture Model for Industry 4.0" que traduzindo fica "Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0". É um modelo de referência para a implementação de sistemas de produção

flexíveis e eficientes, baseados em tecnologias avançadas relacionadas a I4.0, como: IoT, IA, automação avançada, entre outras tecnologias.

2.5.1 Padrões e Recomendações

O modelo RAMI 4.0 tem sua base no modelo SGAM (*Smart Grid Architecture Model*) para cumprir os requerimentos da I4.0, ou seja, a integração vertical e horizontal, integração de engenharia e ciclo de vida do produto. Assim, o modelo integra diferentes perspectivas e fornece uma maneira simples de ver as tecnologias da I4.0, e inclui vários padrões e recomendações para sua implementação. Em Hankel and Rexroth (2015), são apresentadas algumas recomendações, conforme segue:

1. **Padrões de comunicação:** A arquitetura RAMI recomenda o uso de padrões de comunicação abertos e interoperáveis, para permitir que os sistemas de produção se comuniquem uns com os outros e com sistemas externos, como sistemas de gestão de negócios;
2. **Padrões de interoperabilidade:** A arquitetura RAMI recomenda o uso de padrões de interoperabilidade, para permitir que os sistemas de produção se integrem facilmente uns com os outros, bem como com sistemas externos;
3. **Padrões de segurança:** A arquitetura RAMI recomenda o uso de padrões de segurança, para garantir a proteção dos dados e sistemas de produção contra ameaças cibernéticas;
4. **Padrões de qualidade:** A arquitetura RAMI recomenda o uso de padrões de qualidade, a fim de garantir que os sistemas de produção atendam aos requisitos de qualidade e desempenho;
5. **Padrões de gerenciamento de dados:** A arquitetura RAMI recomenda o uso de padrões de gerenciamento de dados, para garantir que os dados gerados pelos sistemas de produção sejam armazenados, processados e compartilhados de forma consistente;

Dessa forma, esses padrões e recomendações, são projetados para ajudar as empresas a implementar sistemas de produção 4.0, de maneira eficiente e consistente, permitindo a integração e a interoperabilidade entre os sistemas de produção.

2.5.2 Regulamentações e Normas

As normas e regulações do RAMI 4.0 incluem:

- RAMI 4.0 *Core*: é a norma principal do RAMI 4.0, que define os conceitos, as terminologias e as recomendações para a implementação da I4.0;
- RAMI 4.0 *Technical System View*: é a norma que define os aspectos técnicos da implementação da I4.0, incluindo a arquitetura e a integração de sistemas, a interoperabilidade, a segurança, entre outros;
- RAMI 4.0 *Business Process View*: é a norma que define os aspectos de negócio da implementação da I4.0, incluindo os processos e os modelos de negócio, a governança, a gestão de projetos, entre outros;
- RAMI 4.0 *Data View*: é a norma que define os aspectos de dados da implementação da I4.0, incluindo a modelagem, a integração e a governança de dados, entre outros;
- RAMI 4.0 *Security View*: é a norma que define os aspectos de segurança da implementação da I4.0, incluindo a segurança da informação, a segurança da comunicação, a segurança da operação, entre outros.

Com base nas normas e regulamentações citadas, a *International Electrotechnical Commission* (IEC), que é uma organização internacional, é responsável por desenvolver e promover padrões e normas técnicas, no campo da eletricidade e da eletrônica. De acordo com ISO (2022), a IEC foi criada em 1906 e é composta por membros de mais de 170 países, incluindo governos, instituições de normatização, fabricantes, instituições de ensino e outros. A IEC é importante por vários motivos, os quais serão citados abaixo:

1. Padrões e normas técnicas: A IEC desenvolve e promove padrões e normas técnicas para os campos da eletricidade e da eletrônica, o que promove a interoperabilidade, a segurança e a qualidade dos produtos e sistemas eletrônicos;
2. Harmonização internacional: A IEC trabalha para harmonizar os padrões e normas técnicas internacionalmente, o que facilita o comércio e a colaboração entre os diferentes países e regiões do mundo;

Tabela 2.1: Normas IEC do modelo RAMI

Normas IEC para I4.0	
IEC 61512	Controle de Batelada – Processos Produtivos em Lote
IEC 62264	Integração de Sistemas de Produção na Empresa (MES/MOM)
IEC 62890	Gerenciamento do Ciclo de Vida para Produtos e Sistemas
IEC 63031	Terminologia
IEC 63032	Requisitos de Segurança
IEC 63033	Governança e Gestão
IEC 63034	Estrutura de Dados
IEC 63035	Arquitetura de Sistemas
IEC 63036	Infraestrutura de Comunicação
IEC 63037	Processo de Desenvolvimento
IEC 63038	Integração de Sistemas
IEC 63039	Sistemas de Produção
IEC 63040	Manufatura Aditiva
IEC 63041	Manutenção Preditiva
IEC 63042	Gestão da Qualidade
IEC 63043	Segurança da Informação
IEC 63044	Sistemas de Logística

3. Conhecimento técnico: A IEC reúne e promove o conhecimento técnico e científico nas áreas de eletricidade e eletrônica, através de publicações, seminários, conferências e outros eventos;
4. Inovação: A IEC promove a inovação tecnológica nas áreas de eletricidade e eletrônica, por meio de projetos de pesquisa e desenvolvimento e de colaboração com outras instituições e organizações.

As normas da IEC, utilizadas no modelo RAMI 4.0, são importantes, pois definem os padrões e as recomendações para a interoperabilidade, a segurança e a qualidade dos produtos e sistemas eletrônicos. Além disso, harmoniza os padrões e normas técnicas internacionais, reúne e promove o conhecimento técnico e científico nas áreas de eletricidade e eletrônica e promove a inovação tecnológica naquelas áreas.

As principais normas são apresentadas na Tabela 2.1, das quais serão detalhadas algumas normas da produção inteligente; ao gerenciamento do ciclo de vida do processo; à integração de sistemas de produção e de processos produtivos em lote.

1. A IEC 63088 (*Intelligent Production – Reference Model and Architecture for Industry 4.0*) é uma norma que define um modelo e uma arquitetura de referência para a

implementação da I4.0, de forma que, é baseada no modelo RAMI 4.0 e é desenvolvida como uma norma internacional, para ser aplicada em diferentes países e regiões do mundo. A IEC 63088 define os seguintes elementos do modelo e da arquitetura de referência para a I4.0:

- Conceitos fundamentais da I4.0, incluindo IoT, BD, a IA, a Robótica e a Realidade Aumentada (RA);
- Modelo de referência para a I4.0, que define os componentes, os processos e as interações que compõem o sistema de produção inteligente;
- Arquitetura de referência para a I4.0, que define as camadas de abstração, os componentes e os serviços que compõem o sistema de produção inteligente;
- Recomendações para a implementação da I4.0, incluindo os requisitos de interoperabilidade, de segurança e de gestão de dados.

Como se vê, a IEC 63088 é uma norma importante para a implementação da I4.0, pois define os padrões e as recomendações para a integração e a interoperabilidade de sistemas e componentes, bem como para a segurança e a gestão de dados.

2. A IEC 62890 (*Life Cycle Management for Products and Systems*) é uma norma IEC que define os requisitos e as recomendações para o gerenciamento do ciclo de vida de produtos e sistemas. Ela define os seguintes elementos do gerenciamento do ciclo de vida para produtos e sistemas:

- Conceitos fundamentais do gerenciamento do ciclo de vida, incluindo neste, os principais objetivos e os benefícios do gerenciamento do ciclo de vida;
- Requisitos para o gerenciamento do ciclo de vida, incluindo os requisitos para a gestão, para a avaliação e para a comunicação do ciclo de vida, entre outros;
- Recomendações para o gerenciamento do ciclo de vida, incluindo as recomendações para a implementação do gerenciamento, para a avaliação e para a comunicação do ciclo de vida, entre outros;
- Exemplos de aplicação do gerenciamento do ciclo de vida, incluindo exemplos de processos, de métodos, de ferramentas e de técnicas de gerenciamento deste.

Em suma, a IEC 62890 é uma norma importante para o gerenciamento do ciclo de vida de produtos e sistemas, pois define os padrões e as recomendações para a gestão dos aspectos ambientais, sociais e econômicos ao longo da vida útil dos produtos e sistemas.

3. A IEC 62264 (*Integration of Production Systems in the Enterprise* (MES/MOM)) é uma norma IEC que define os requisitos e as recomendações para a integração de sistemas de produção na empresa. Ela define os seguintes elementos da integração de sistemas de produção na empresa:

- Conceitos fundamentais da integração de sistemas de produção, incluindo o sistema de gerenciamento de produção (MES), o sistema de gerenciamento de operações (MOM) e a integração dos sistemas de produção com os sistemas de negócio;
- Requisitos para a integração de sistemas de produção, incluindo os requisitos para a arquitetura de sistemas, para a integração de dados, para a interoperabilidade, para a segurança, entre outros;
- Recomendações para a integração de sistemas de produção, incluindo as recomendações para a implementação da integração de sistemas de produção, para a gestão dos projetos de integração, para a governança da integração, entre outros;
- Exemplos de aplicação da integração de sistemas de produção, incluindo exemplos de processos, de métodos, de ferramentas e de técnicas de integração de sistemas de produção.

A IEC 62264 portanto, é uma norma importante para a integração de sistemas de produção na empresa, pois define os padrões e as recomendações para a integração e a interoperabilidade dos sistemas de produção com os sistemas de negócio, bem como para a segurança e a gestão dos projetos de integração.

4. A IEC 61512 (*Batch Control – Production of Batches*) é uma norma IEC que define os requisitos e as recomendações para o controle de batelada em processos produtivos em lote. Ela é aplicável a qualquer tipo de processo produtivo em lote e define os seguintes elementos do controle de batelada em processos produtivos em lote:

- Conceitos fundamentais do controle de batelada, incluindo a batelada, o processo produtivo em lote, o controle e as etapas do ciclo de vida da batelada;
- Requisitos para o controle de batelada, incluindo os requisitos para a arquitetura de sistemas de controle, para a integração de dados, para a interoperabilidade e para a segurança, entre outros;
- Recomendações para o controle de batelada, incluindo as recomendações para a implementação do controle de batelada, para a gestão dos projetos de controle de batelada, para a governança do controle de batelada, entre outros;
- Exemplos de aplicação do controle de batelada, incluindo exemplos de processos, de métodos, de ferramentas e de técnicas de controle de batelada.

A IEC 61512 enfim, é uma norma importante para o controle de batelada em processos produtivos em lote, pois define os padrões e as recomendações para o controle e a gestão dos processos produtivos em lote, bem como para a interoperabilidade e a segurança dos sistemas de controle de batelada.

2.5.3 Eixos do modelo RAMI

O modelo RAMI é dividido em 3 eixos ou níveis principais: hierarquia, arquitetura e ciclo de vida. Bader et al. (2020) detalha e explica cada um dos eixos, e as informações são simplificadas e apresentadas na Figura 2.7.

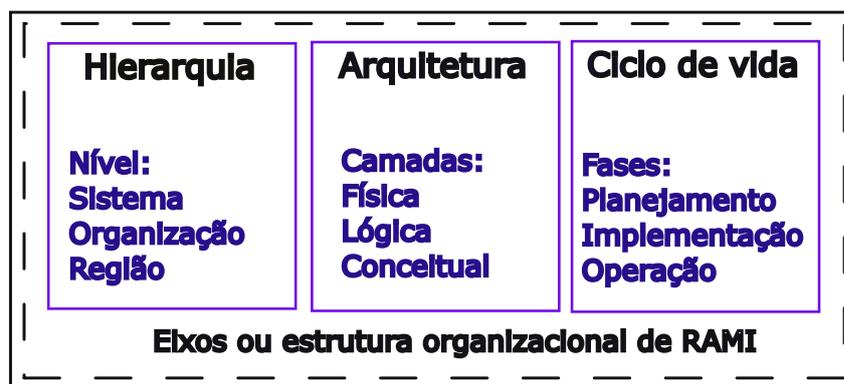


Figura 2.7: Eixos do modelo de RAMI. Adaptado de Bader et al. (2020)

- O eixo da hierarquia se refere à estrutura organizacional de um sistema de produção, desde o nível estratégico até o nível operacional. Essa estrutura é representada por diferentes camadas, cada uma com funções e responsabilidades específicas;

- (ii) O eixo da arquitetura se refere à organização funcional dos componentes de um sistema de produção, incluindo a definição dos interfaces de comunicação entre eles. Ele descreve a arquitetura técnica necessária para implementar as funções específicas de cada camada do sistema;
- (iii) O eixo do ciclo de vida se refere às fases de desenvolvimento e operação de um sistema de produção, desde o *design* até a manutenção e a retirada de operação. Esse eixo leva em consideração a importância da gestão do ciclo de vida do sistema para garantir a sua eficiência, flexibilidade e adaptação ao longo do tempo.

O ciclo de vida do modelo RAMI é dividido em três fases: planejamento, implementação e operação. Esses ciclos são melhor detalhados e discutidos em Hankel and Rexroth (2015).

- (a) **Planejamento:** Na fase de planejamento, são definidos os objetivos e metas da implementação da I4.0, bem como a estratégia e o plano de ação para alcançá-los. Também são identificados os requisitos e restrições da implementação, bem como os recursos e meios necessários;
- (b) **Implementação:** Na fase de implementação, os componentes físicos e tecnológicos da I4.0 são adquiridos e instalados, assim como os sistemas de informação e de gerenciamento são configurados e integrados. Também são realizados os testes e a validação da implementação;
- (c) **Operação:** Na fase de operação, o sistema ou processo da I4.0 está em pleno funcionamento e é utilizado para produzir bens ou serviços. Nesta fase, são realizadas atividades de manutenção e suporte, como também são coletados e analisados dados para otimização e melhoria contínua.

Em resumo, o eixo de hierarquia define as camadas de um sistema de produção, desde a camada inicial (onde ocorre a aquisição de dados) até a camada final (onde ocorrem as decisões estratégicas). O eixo de arquitetura define os elementos que compõem cada camada e como eles se relacionam entre si. Já o eixo de ciclo de vida estabelece as fases do processo de produção.

Capítulo 3

Estado da Arte

O *retrofitting* é uma prática cada vez mais comum na indústria, pois permite a atualização de sistemas e equipamentos para aproveitar as vantagens de tecnologias mais recentes e aumentar a eficiência e competitividade da empresa ou de um processo.

Esta sessão busca analisar e compilar os trabalhos existentes sobre o tema base *retrofit*. Isso inclui a análise de trabalhos anteriores, relacionados ao tópico, para obter *insights* sobre o conhecimento, conceitos e métodos existentes, utilizados neste campo.

O objetivo é obter uma compreensão do estado atual deste tópico e suas tendências de desenvolvimento. Ao examinar pesquisas anteriores sobre este assunto, este estudo tem como objetivo identificar lacunas ou áreas de interesse e, por fim, posicionar sua nova contribuição.

3.1 Trabalhos relacionados

A Indústria 4.0 está mudando a forma como o *retrofit* é aplicado. Segundo Oztemel and Gursev (2020), o aumento do uso de tecnologias de manufatura aditiva e simulação digital buscam projetar e testar novas soluções inclusive, o *retrofit*. Atualmente, existem várias abordagens e tecnologias disponíveis para a implementação das técnicas de *retrofit*, como o uso de controladores programáveis, redes de comunicação industriais, sistemas de automação, tecnologias de Internet das coisas (IoT), entre outros. As pesquisas listadas a seguir estão relacionadas à I4.0 e suas tecnologias.

3.1.1 Revisões sistemáticas

Jaspert et al. (2021) propõe uma revisão sistemática da literatura que analisa os estudos científicos sobre a aplicação de tecnologias inteligentes (*smart*) em processos de modernização e atualização de fábricas e sistemas de manufatura existentes (aplicação de *retrofitting*).

A revisão apresenta um panorama dos principais tipos de tecnologias utilizadas, bem como dos desafios e oportunidades enfrentados pelas empresas, na implementação dessas tecnologias. O autor apresenta uma discussão sobre os benefícios potenciais que podem ser obtidos como a melhoria da eficiência operacional, a redução de custos e o aumento da qualidade.

Em Alqoud et al. (2022), é proposto um estudo sobre a modernização e atualização de sistemas de fabricação existentes, conhecidos como sistemas legados, para atender a alguns dos requisitos da I4.0. A Indústria 4.0 é caracterizada por sistemas conectados, automatizados e inteligentes, e o objetivo é mostrar como essas características podem ser adicionadas e integradas a sistemas mais antigos por meio do *retrofit*.

O autor apresenta as principais tendências e desafios na implementação do *retrofit* de sistemas legados, incluindo a necessidade de lidar com a falta de compatibilidade entre as tecnologias antigas e novas, a falta de recursos para a implementação e a complexidade da implementação. É destacada também, a importância da colaboração entre empresas, fornecedores e clientes para maximizar os benefícios da I4.0.

Em Mendonça et al. (2022), é feita uma revisão dos desafios e aplicações de modelos digitais em tempo real de sistemas físicos, também conhecidos como "gêmeos digitais". Os desafios relacionados ao uso de gêmeos digitais, como modelagem e simulação, integração com sistemas físicos, gerenciamento de dados e segurança, são discutidos em detalhes.

O autor destaca o papel da Inteligência Artificial e da análise de dados avançada no desenvolvimento de *Digital Twins* mais sofisticados e eficazes, de forma que, a análise de dados pode ser usada para melhorar a precisão dos modelos, e para mostrar como a inteligência artificial pode ser usada para otimizar o desempenho do sistema físico.

O objetivo do estudo é apresentar uma visão geral do estado atual do conhecimento sobre *Digital Twin* e identificar as principais tendências e desafios na implementação dessa tecnologia, bem como os desafios e tendências atuais enfrentados. Visa, também à possibilidade de atualizar sistemas legados, por meio do uso de técnicas e metodologias

de *retrofitting*.

3.1.2 Sistemas Legados e tecnologias da Indústria 4.0

Em Givehchi et al. (2017), é apresentada uma abordagem para alcançar interoperabilidade em sistemas ciber físicos industriais, especialmente em sistemas legados, que muitas vezes não foram projetados para ter tal característica. A interoperabilidade é a capacidade de diferentes sistemas, dispositivos ou componentes funcionarem, juntos de forma compatível.

O autor elenca os principais desafios na implementação de sistemas ciber físicos, incluindo a diversidade de dispositivos e de protocolos, a falta de padronização e a necessidade de integração com sistemas legados. A abordagem apresenta uma arquitetura de referência, baseada em serviços *web* e a implementação de um *middleware*, para garantir a comunicação entre os sistemas.

A abordagem proposta também utiliza *gateways* que tem como objetivo a comunicação entre sistemas existentes, permitindo que os dados coletados pelos sistemas antigos sejam compartilhados e acessados por sistemas modernos, e que, os sistemas antigos possam se beneficiar das capacidades dos sistemas modernos. Além disso, sistemas mais antigos podem aproveitar as capacidades de sistemas modernos conectando-se por meio destes *gateways*.

Em Nakakaze et al. (2022), é discutida a aplicação da tecnologia *WebAssembly* (*Wasm*) para modernizar e atualizar sistemas de produção industriais legados, tornando-os mais eficientes e seguros. A ideia é usar a tecnologia *WebAssembly* para executar código em dispositivos na borda da rede, o que reduz o tempo de latência e aumenta a velocidade de processamento, e conectar esses dispositivos às máquinas antigas. Ademais, isso permitirá que os dados coletados pelas máquinas antigas sejam processados e transmitidos em tempo real, possibilitando, assim, o monitoramento e o controle das operações industriais.

Um estudo de caso é apresentado na tecnologia *Wasm*, que foi usada para melhorar a eficiência de um sistema de produção de automóveis. O estudo de caso mostra como o *Wasm* foi utilizado para executar o processamento de dados diretamente na máquina, sem a necessidade de recursos adicionais de computação em nuvem. Por conseguinte, são detalhados exemplos do uso da tecnologia *WebAssembly* para a realização de *retrofit*

(modernização) de máquinas industriais antigas. Esse detalhamento se dá no decorrer do texto e são discutidas as vantagens de se usar essa abordagem, como a capacidade de processar grandes volumes de dados e a possibilidade de se desenvolver aplicações de manutenção preditiva e soluções de segurança.

Já Zambetti et al. (2020) aborda a questão da servitização no contexto da I4.0 e como as empresas podem adaptar seus sistemas de manufatura legados para fornecer serviços inovadores. O termo do inglês *servitization*, é o processo pelo qual as empresas passam a oferecer não apenas produtos, mas também serviços relacionados a esses produtos, como manutenção, monitoramento e suporte.

Em síntese, o trabalho explora como sistemas de fabricação legados podem ser atualizados para oferecer serviços inovadores além de seus produtos principais. Essa abordagem ajuda as empresas a se manterem competitivas no cenário em constante evolução da I4.0. O trabalho apresenta um estudo de caso de uma empresa que implementou com sucesso a servitização em seu sistema de fabricação legado, bem como uma lista de verificação para empresas que desejam adotar a servitização.

De acordo com Kolla et al. (2022), IIoT é caracterizada pela conexão de dispositivos e máquinas para coletar e compartilhar dados em tempo real, permitindo uma melhor monitoração e controle das operações industriais. Assim, é apresentada uma visão geral sobre a aplicação de *Industrial Internet of Things* (IIoT) e o *retrofitting* de máquinas legadas (do inglês, *legacy machines*), discutindo suas vantagens, desafios e potencial impacto na eficiência operacional das empresas.

O autor aborda o *retrofitting* de máquinas legadas, de forma que, ao atualizar equipamentos antigos, permite que eles se tornem compatíveis com as tecnologias modernas. O artigo destaca, ainda, a importância do *retrofitting* para a implementação bem-sucedida da IIoT, uma vez que muitas empresas possuem equipamentos antigos e, por vezes obsoletos, que precisam ser atualizados para se beneficiarem da IIoT.

Em Lins and Oliveira (2020), é discutida a atualização de sistemas de produção tradicionais para sistemas de produção ciber físicos (CPS) na I4.0. Seguidamente, ele apresenta o conceito de I4.0 e sua relação com a digitalização e a automação da produção industrial, focando na integração de tecnologias da informação e comunicação com os sistemas de produção, com a finalidade de melhorar a eficiência e a qualidade dos processos.

O autor detalha que os CPS combinam tecnologias digitais e físicas para criar sistemas

flexíveis e inteligentes que podem se adaptar rapidamente às necessidades do cliente. São discutidos os desafios enfrentados ao tentar realizar o *retrofit* de sistemas tradicionais para CPS, principalmente, em relação à falta de compatibilidade entre as tecnologias e a necessidade de mudar as estruturas internas das empresas.

É também apresentado um estudo de caso que ilustra a aplicação do *retrofitting* em um sistema de produção ciber físico. O autor destaca as vantagens do *retrofit*, incluindo uma melhoria na eficiência e na qualidade dos processos, ao mesmo tempo em que observa os desafios enfrentados pela empresa durante o processo.

Em Ooi et al. (2020), é proposta a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina para analisar vibrações de máquinas e identificar possíveis problemas de manutenção. O objetivo é usar essa solução em máquinas antigas que não possuem parâmetros precisos disponíveis. A proposta permite que engenheiros de manutenção tomem decisões mais precisas, melhorando assim o desempenho do processo. A solução pode detectar anomalias na máquina, e a análise de vibração pode ser usada para monitorar o desempenho da máquina ao longo do tempo.

3.1.3 Sistemas *Brownfield*

O termo "*Brownfield*" se aplica especificamente à atualização de sistemas ou processos de produção que já estão em operação, enquanto o termo "*Greenfield*" se aplica à construção de um novo sistema ou processo de produção.

Na indústria, ao se referir a um produto, o termo "*Brownfield*" é usado para o processo de atualização de sistemas legados. De acordo com Etz et al. (2020), o termo é aplicado quando o produto de um projeto é arquitetado para complementar algo que já existe em situações em que já há instalações e equipamentos, nos quais o produto do projeto será incorporado.

Em Etz et al. (2020), é abordado o desafio de implementar tecnologias de manufatura inteligente em sistemas *Brownfield*. É também oferecida uma metodologia para atualizar sistemas antigos e torná-los inteligentes, facilitando a transformação do sistema legado para o conceito da I4.0.

O autor apresenta uma abordagem de *retrofit* baseada em três estágios: (1) identificação dos requisitos de *retrofit*, (2) seleção de tecnologias apropriadas e (3) implementação das tecnologias selecionadas. Nesse trabalho, é discutido um estudo de caso de

uma empresa de fabricação de peças de aeronaves, que modernizou seus sistemas legados por meio da implementação de tecnologias de manufatura inteligente. O estudo de caso ilustra como a modernização de sistemas legados pode melhorar significativamente a eficiência de produção e reduzir custos.

Em Tran et al. (2022), é apresentada uma abordagem baseada em *retrofitting* para o desenvolvimento de soluções da I4.0 em processos existentes, referidos no texto como *Brownfield*. Esse termo se refere a uma instalação de produção existente que precisa ser adaptada a novas tecnologias. O artigo apresenta uma metodologia para a atualização de equipamentos, a fim de torná-los capazes de se comunicar com outros equipamentos e sistemas dentro da empresa, visando a aprimorar a eficiência e reduzir custos.

O autor inclui, ainda, uma análise de viabilidade técnica e financeira, a definição de requisitos para a integração de equipamentos legados com tecnologias da I4.0 e a seleção das soluções de *hardware* e *software* mais adequadas para o *retrofit*. São apresentados exemplos de como essa abordagem foi aplicada, e são discutidos os desafios e benefícios do uso da metodologia.

A proposta apresentada por Tran et al. (2022) compreende seis estágios fundamentais, como 1) avaliação da situação atual, 2) definição de metas e objetivos, 3) seleção e integração de tecnologia, 4) projeto do sistema, 5) implementação e 6) operação e manutenção. Além disso, o artigo fornece detalhes sobre o *retrofit* de fábricas *Brownfield*, abrangendo aspectos de cibersegurança e escalabilidade. E fim, esses estágios podem ser empregados como uma estratégia de *retrofit*.

3.1.4 Estrutura educacional

Ruppert et al. (2022) apresenta uma pesquisa sobre a estrutura educacional e uma proposta de criação de um laboratório chamado Operador 4.0. Esse estudo busca preparar os estudantes para o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias da Indústria; por isso, o foco desse estudo é na didática e no ensino, com o intuito de implementar soluções de *retrofit* e vivenciar a I4.0.

O laboratório é projetado para fornecer uma plataforma de treinamento para estudantes e profissionais, onde eles podem fazer experimentos e aprender sobre as tecnologias e fornecer oportunidades para desenvolver habilidades práticas em modernização de sistemas legados e soluções do operador 4.0.

O laboratório apresenta quatro áreas principais: modernização de máquinas legadas, manufatura aditiva, robótica colaborativa e soluções do operador 4.0. Lá, são usadas tecnologias como IoT, sensores, computação em nuvem e análise de dados para implementar soluções inteligentes de fabricação em sistemas legados. Dessa forma, o autor descreve as principais características de cada uma das áreas do laboratório, incluindo exemplos de equipamentos e tecnologias utilizadas.

3.1.5 Manutenção preditiva e detecção de falhas

Wöstmann et al. (2019) aborda a importância da manutenção preditiva na indústria e propõe uma abordagem de *retrofit* para aplicá-la em equipamentos industriais legados. A manutenção preditiva é um processo que consiste em usar dados de monitoramento e análise para identificar falhas potenciais antes que elas ocorram, permitindo que as manutenções sejam programadas com antecedência, maximizando a disponibilidade dos equipamentos.

O autor discute uma abordagem de *retrofit* que consiste em instalar sensores em equipamentos legados e conectá-los a uma plataforma de monitoramento e análise de dados baseada em nuvem. Dessa forma, apresenta um estudo de caso em que a abordagem de *retrofit* foi aplicada em um sistema de transporte em uma fábrica de automóveis. Os resultados mostraram que a abordagem proposta foi capaz de identificar falhas em tempo hábil e reduzir o tempo de inatividade não programado.

O estudo apresenta exemplos de uso da abordagem proposta e destaca os benefícios da manutenção preditiva, incluindo aumento de disponibilidade dos equipamentos e redução de custos de manutenção. São discutidos os desafios enfrentados ao implementar essa abordagem e a complexidade da implementação.

Em García et al. (2022), é proposta uma abordagem de *retrofit* não-intrusiva para a manutenção colaborativa em uma indústria tradicional, no contexto da I4.0. A abordagem proposta consiste em um estudo de caso de uma fábrica de componentes eletrônicos que implementou a abordagem de *retrofitting*. Esta abordagem consiste em instalar sensores de vibração em máquinas críticas, para monitorar seu desempenho.

O estudo descreve a arquitetura proposta e mostra como ela pode ser usada para melhorar a manutenção preditiva e a segurança do trabalho. São discutidos os desafios enfrentados ao implementar uma abordagem não-intrusiva e a falta de recursos para a

implementação. A abordagem apresentada não afetou negativamente a produção existente e pode ser facilmente adaptada a outras fábricas tradicionais.

Em Nsiah et al. (2018), é descrito o desenvolvimento de uma plataforma de código aberto para a monitorização de equipamentos industriais e detecção de falhas. A plataforma proposta tem como objetivo permitir a adaptação de equipamentos legados para torná-los compatíveis com os requisitos da I4.0.

Dessa forma, a plataforma utiliza tecnologias de sensores, comunicação sem fio e processamento de dados, em tempo real, para monitorar as condições de operação de equipamentos industriais e detectar anomalias que possam indicar falhas em potencial. O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma ferramenta de fácil utilização para auxiliar os desenvolvedores e engenheiros a implementar soluções de sensores e monitoramento em sistemas antigos.

Em resumo, a ferramenta apresentada no artigo é uma *toolkit* aberta (*open-source*), que inclui um *software* para gerenciamento de dados, o qual permite visualizar, monitorar e gerenciar os dados coletados. Sua principal contribuição está relacionada ao fato de ela ser eficaz e econômica para a implementação de sistemas de monitorização de equipamentos na indústria.

3.1.6 Controlador *retrofit*

Sasahara et al. (2022) apresenta uma metodologia para o projeto de controladores de *retrofit* aplicados em sistemas dinâmicos, ou seja, uma parametrização de controladores de *retrofit* retificadores de saída (output-rectifying) para sistemas de controle não-lineares.

O objetivo é projetar controladores adicionais, chamados de *retrofit controllers*, que possam garantir a estabilidade e melhorar o desempenho de sistemas já existentes. Os controladores de *retrofit* retificadores de saída são usados para melhorar o desempenho de sistemas de controle não-lineares que são difíceis de controlar.

O autor propõe uma solução para esse desafio, apresentando uma metodologia que usa funções de transferência para definir parâmetros de controladores de *retrofit*. Essas funções de transferência são calculadas a partir de uma equação diferencial parcial, que descreve o comportamento do sistema não-linear. O resultado é uma formulação matemática para o projeto do controlador que pode ser facilmente adaptada para diferentes sistemas.

3.2 Importância da aplicação da metodologia

A metodologia *retrofit*, descrita nos capítulos seguintes deste trabalho, pode ser usada para atualizar e melhorar o desempenho de sistemas já existentes por meio da adição de novas tecnologias ou melhorias a um sistema ou equipamento existente (sistema legado). A arquitetura de *Digital Twin* permite criar um modelo digital em tempo real de um sistema físico, que nesse caso foi atualizado através do *retrofit*.

A metodologia de *retrofit* e a arquitetura de *Digital Twin* podem ser usadas para melhorar significativamente o desempenho dos sistemas existentes e torná-los mais eficientes e seguros, de forma que, atendam novas regulamentações ou padrões naturais no processo de desenvolvimento da indústria. A metodologia pode ser usada para atualizar componentes ou subsistemas específicos, enquanto a arquitetura pode ser usada para simular e monitorar todo o sistema em tempo real.

Para atingir o âmbito das tecnologias empregadas no conceito de Indústria 4.0, é imprescindível considerar a metodologia e a arquitetura. É necessário analisar quais métodos e técnicas podem ser aplicados, bem como identificar as tecnologias relevantes para a implementação. Esse processo começa com a coleta de requisitos do sistema, o que inclui a definição de uma estratégia para alcançar os objetivos estabelecidos. A seguir, estabelecem-se etapas que vão desde a caracterização do problema, passando pela coleta e análise de dados até a interpretação dos resultados.

Deste modo, pode-se identificar algumas dificuldades na implementação, sendo estas sumarizadas abaixo:

- Compatibilidade de tecnologias: As tecnologias antigas podem não ser compatíveis com as novas tecnologias usadas para a aplicação do *retrofit*, o que pode dificultar a implementação da metodologia;
- Falta de recursos: A implementação de *retrofit* pode ser dispendiosa e pode requerer recursos adicionais, como: tempo, mão de obra especializada e tecnologias avançadas. Tais recursos podem ser de difícil obtenção;
- Mudanças nos processos: O *retrofit* pode exigir mudanças nos processos existentes, o que pode ser difícil de implementar e pode causar interrupções no processo produtivo;

- Dificuldade de monitoramento: Pode ser difícil monitorar e gerenciar as máquinas e equipamentos nos quais foram implementadas metodologias de *retrofit*, especialmente se eles estiverem distantes ou se houver problemas de conectividade;
- Falta de treinamento: Pode ser difícil garantir que os usuários do sistema estejam treinados e capacitados para operar e manter os equipamentos atualizados.

É crucial adotar uma metodologia que garanta a condução de um processo consistente e lógico, e que assegure a validade e confiabilidade dos resultados obtidos. A metodologia utilizada é classificada como experimental e descritiva. Ao se aplicar a metodologia de *retrofit* e adicionar funcionalidades relacionadas à arquitetura de DT, pode-se enfrentar algumas dificuldades, como aumento da complexidade e surgimento de problemas, tais como:

- Complexidade de criação de DT: Criar um DT preciso e detalhado de um sistema legado pode ser desafiador e requerer muito tempo e esforço;
- Inconsistência de dados: Os dados coletados dos sensores podem ser inconsistentes ou incompletos, o que pode afetar a precisão e/ou acurácia do DT;
- Falta de interoperabilidade: Pode ser difícil fazer com que o DT seja interoperável com outros sistemas e dispositivos, o que pode limitar suas capacidades;
- Dificuldade de monitoramento: Pode ser difícil monitorar e/ou gerenciar as máquinas e equipamentos atualizados por metodologias de *retrofit* usando o DT, especialmente se eles estiverem distantes ou se houver problemas de conectividade;
- Custo: Criar e manter um DT pode ser caro e requerer recursos adicionais;
- Dificuldade de manutenção: O processo de manutenção de um sistema de DT é complexo e necessita de de uma mão de obra especializada e capacitada, especialmente se ele contiver componentes ou tecnologias avançadas e complexas.

Capítulo 4

Desenvolvimento da arquitetura de *Digital Twin* aplicado a sistemas legados

O foco deste capítulo é mostrar a proposta de desenvolvimento de uma arquitetura de Digital Twin especificamente aplicada a sistemas legados. O objetivo é criar uma réplica digital que permita funcionalidades avançadas, como monitoramento em tempo real, simulação de cenários e análise prévias.

Para alcançar o desenvolvimento eficaz do *Digital Twin*, o *retrofit* será utilizado como uma ferramenta habilitadora essencial. Este processo envolve a atualização do sistema legado através da incorporação de tecnologias atuais da Indústria 4.0, criando a infraestrutura necessária para suportar a arquitetura do *Digital Twin*. O *retrofit* do sistema legado incluiu a atualização e substituição de sensores e dispositivos, visando melhorias significativas no processo.

A implementação da arquitetura de *Digital Twin*, habilitada pelo *retrofit*, transforma o sistema legado em um ativo digital. Isso não apenas moderniza o sistema legado, mas também a alinha com as demandas atuais (I4.0), permitindo que este interaja com tecnologias modernas. A arquitetura proposta oferece um caminho claro para esse objetivo, garantindo que o sistema legado possa evoluir e se adaptar às necessidades futuras. Portanto, esse capítulo apresenta a proposta de desenvolvimento da arquitetura DT e como o *retrofit* pode ser estrategicamente utilizado para habilitar a criação de um DT, proporcionando uma solução robusta e eficiente para a modernização de sistemas legados.

4.1 Arquitetura *Digital Twin*

A arquitetura baseada em Digital Twin (DT) é um modelo que utiliza uma representação virtual verossímil do sistema real. O DT é um pré-requisito essencial para o desenvolvimento de um Sistema Ciberfísico (CPS), pois permite a integração e o gerenciamento de sistemas físicos e de informação em uma plataforma única. Como representação do sistema físico, o DT fornece informações detalhadas sobre o comportamento do sistema, possibilitando simulações, análises, otimizações e até mesmo a manutenção preditiva.

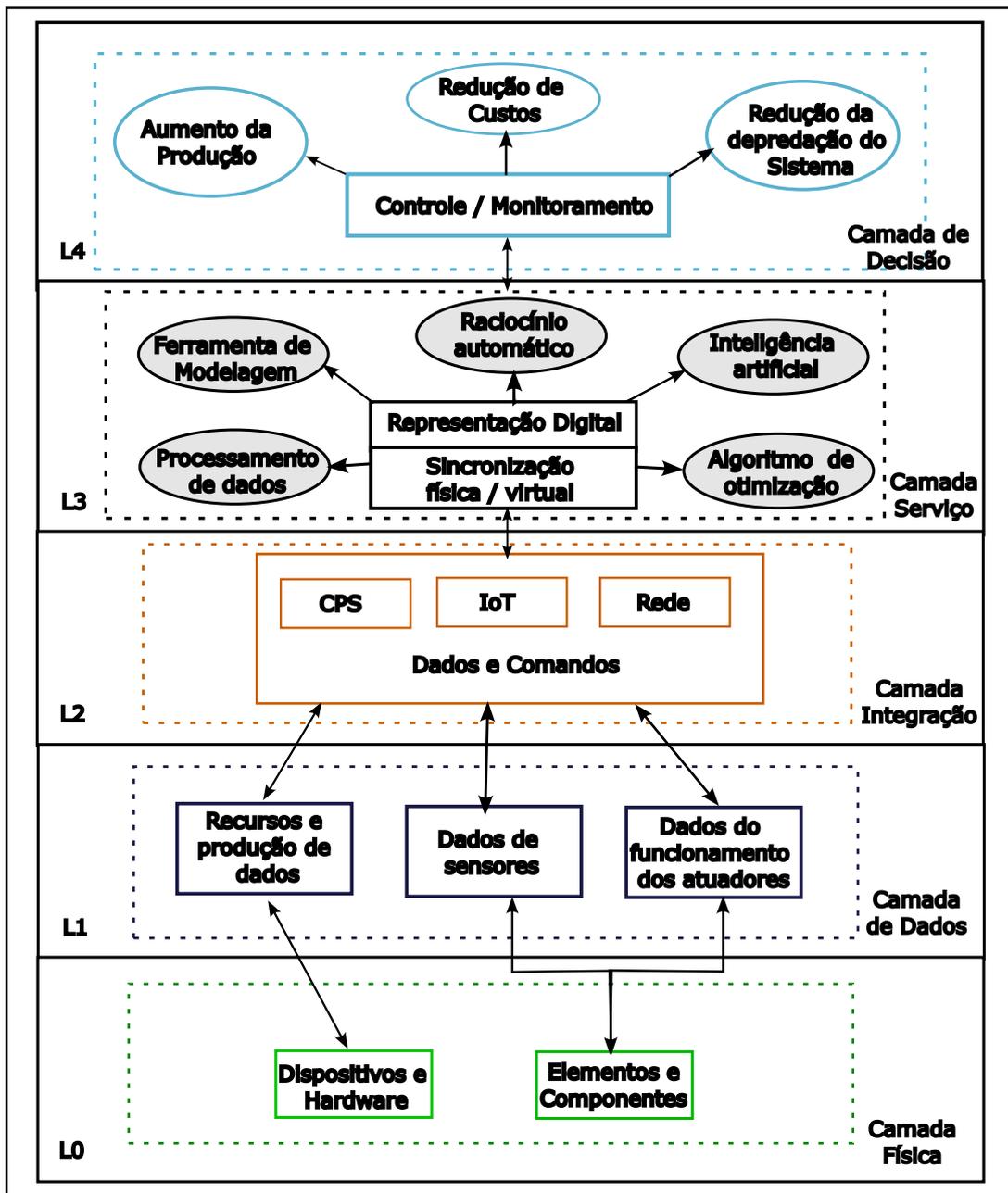


Figura 4.1: Arquitetura *Digital Twin*

Com o DT, é possível integrar e gerenciar sistemas físicos e de informação em uma única plataforma, fornecendo dados essenciais para todas as tomadas de decisão. A ideia é criar um "gêmeo digital" do sistema físico, que é continuamente alimentado com dados em tempo real. Isso permite simular diferentes cenários e condições, prever falhas e otimizar o desempenho do processo. O DT, portanto, é uma ferramenta poderosa para melhorar a eficiência e a eficácia do gerenciamento de sistemas complexos.

Dessa forma, tem-se a proposta de arquitetura apresentada na Figura 4.1, que foi desenvolvida e inspirada no modelo de RAMI 4.0, seguindo a mesma ideia desta ser uma arquitetura hierárquica genérica, dividida em camadas (com cinco camadas para CPS com DT como elemento central). Em sequência, cada camada desta arquitetura é apresentada como se segue:

- (i) **Camada física (L0)** - elementos físicos, como sensores e atuadores, transportadores, braços robóticos, bombas e outros dispositivos são monitorados. Nesta camada, tem-se protocolos de comunicação horizontal, ou seja, entre módulos que podem ser *Ethernet*, *Profinet* ou *Modbus*. Todos os dados do processo são adquiridos e gerenciados na próxima camada, ou seja, a camada de dados.
- (ii) **Camada de dados (L1)** - o fluxo de dados entre os componentes físicos e suas representações digitais é contínuo em ambas as direções. As tecnologias presentes nesta camada são Internet das Coisas, *Cloud Computing*, *Big Data Analytics* entre outras. Em particular, por causa da grande quantidade de dados, essas informações devem ser traduzidas para obter dados significativos.

Várias abordagens, baseadas em dados, podem ser propostas para controle, simulação, diagnóstico de falhas e gerenciamento dos processos. Por conseguinte, esses serviços também podem ser realizados com base em modelos paramétricos, obtidos por meio de regressão e identificação de sistemas, para habilitar uma abordagem baseada em modelos. Além disso, o aprendizado de máquina e a IA também podem permitir a tomada de decisões e a própria análise e processamento dos dados.

- (iii) **Camada de integração (L2)** - esta camada garante a integração entre níveis e o preenchimento da lacuna relacionada à comunicação entre as camadas física e virtual. Nesta camada, várias tecnologias também são utilizadas, dentre elas a IoT que são relevantes para conectar de forma eficiente processos e sistemas. Protocolos

de comunicação e sistemas de integração e gerenciamento estão presentes nessa camada. Podem ocorrer problemas relacionados à cibersegurança e integridade de dados, uma vez que esses sistemas interconectados são mais vulneráveis a ataques cibernéticos.

(iv) **Camada de serviços (L3)** - nesta camada, a integração fornecida por L2 permite que L3 seja sincronizada com as camadas inferiores, possibilitando o desenvolvimento de DTs. Ademais, os DTs podem fornecer diferentes serviços através de processamento de dados, ferramentas de modelagem, raciocínio automático, IA e algoritmos de otimização. É possível, também, a implementação de simulação e modelagem e de interfaces de usuário com funcionalidades simples para visualização do sistema. Outrossim, alguns exemplos de serviços baseados em DTs são monitoramento, diagnóstico e prognóstico, controle em rede, verificação e validação, tolerância a falhas e segurança cibernética.

(v) **Camada de decisão (L4)** - permite controlar o sistema físico considerando objetivos específicos, como aumentar a produção, reduzir o desgaste do sistema e diminuir os custos. Nesta camada, podemos realizar a integração vertical do sistema através de protocolos de comunicação como OPC-UA e MQTT, utilizar e aplicar funcionalidades que envolvem algoritmos de controle que podem ser implementados utilizando os serviços dos DTs.

Por exemplo, um DT pode fornecer o serviço de prognóstico de falhas estimando a vida útil restante de um componente do sistema. Ademais, a condição de manutenção pode ser ajustada para reduzir perdas, e um algoritmo de controle consciente da saúde pode ser usado para estender a vida útil enquanto garante os requisitos de controle.

Assim, percebe-se que a arquitetura proposta é composta por diversas funcionalidades que envolvem tecnologias da I4.0, as quais podem ser integradas tanto verticalmente quanto horizontalmente no sistema (estudo de caso). A integração vertical ocorre entre diferentes camadas da arquitetura, enquanto a integração horizontal se dá entre dispositivos presentes no sistema, no mesmo nível da arquitetura.

Um exemplo de integração vertical, na arquitetura proposta, são os dados adquiridos através de sensores **Iot**, presentes na camada física, os quais são compilados, na camada

de dados, e enviados para processamento e gerenciamento na camada de serviços. Por outro lado, um exemplo de integração horizontal, está relacionado à comunicação entre diferentes componentes (sensores e atuadores), presentes no mesmo nível (camada física).

Por conseguinte, a camada física inclui equipamentos, componentes e materiais. A camada de dados inclui dados provenientes de sensores, do processo, informações dos recursos e *script* de produção. A camada de integração garante a comunicação entre as camadas e liga a lacuna entre os níveis físico e virtual por meio de redes e IoT. A camada de serviço inclui DT orientados a serviços. A camada de decisão permite o controle do sistema físico, considerando objetivos específicos como: aumentar a produção, reduzir a degradação do sistema e reduzir os custos.

Por certo, a camada física representa a descrição física do sistema ou processo. A camada de dados revela as diferentes informações sobre o sistema. A camada de integração suporta e garante um *link* de comunicação entre as camadas. Já a camada de serviço fornece uma ferramenta para controle, monitoramento e gerenciamento do sistema. A última camada, que é a de negócio, tem a função de mostrar informações coletadas e filtradas sobre o processo, sendo que essas informações dão suporte à tomada de decisões no processo.

Em suma, o CPS pode integrar todas as camadas da arquitetura proposta e pode usar os DTs como funções essenciais para garantir o controle e a operação de todo o processo baseado no modelo de ciclo de vida virtual do produto. Embora o DT seja fundamental para integrar o mundo físico e virtual, é necessário implementar várias camadas adicionais para definir um DT básico, conforme discutido nas seções anteriores. Essas camadas podem ser personalizadas para desenvolver vários dispositivos, mas a complexidade da implementação pode variar dependendo do caso específico.

4.1.1 Análise de maturidade do modelo de RAMI

O modelo RAMI inclui a análise de maturidade, que é apresentado de forma simplificada na Figura 4.2, cujo objetivo é avaliar o grau de maturidade de seus sistemas de produção em relação à I4.0. A análise é composta de cinco níveis, cada um representando um grau de maturidade crescente em relação à Indústria 4.0. Alguns níveis são detalhados na Figura 4.2, por Bastos et al. (2021):

- **Nível 1 (Nível inicial)** - Produção manual: Neste nível, os processos de produção

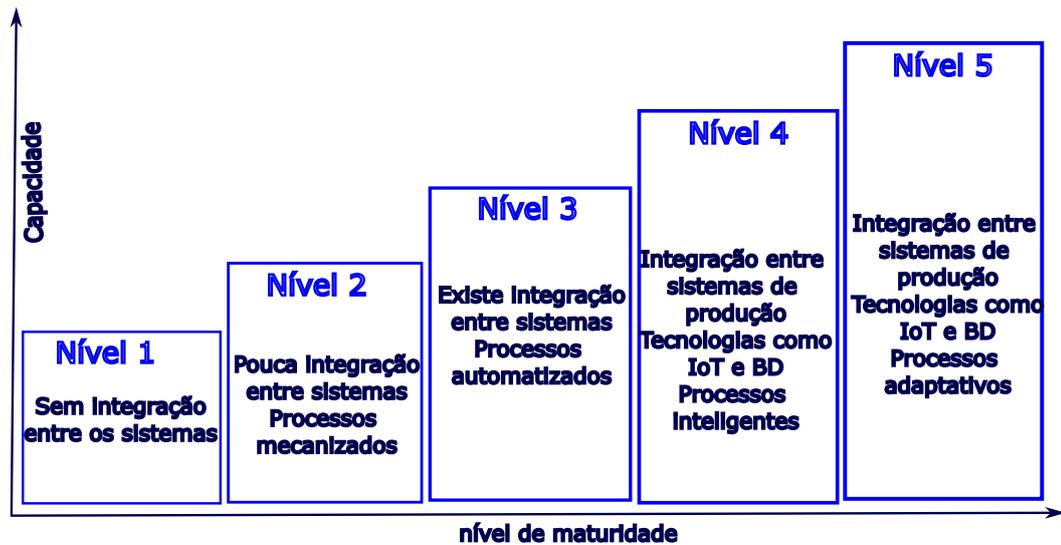


Figura 4.2: Níveis de maturidade RAMI. Adaptado de (Bastos et al., 2021)

são realizados manualmente e não há integração entre os sistemas de produção. Portanto, a organização não iniciou a implementação da transformação digital ou está apenas nos estágios iniciais do processo, com baixo grau de integração e automação;

- **Nível 2 (Nível emergente)** - Produção mecanizada: Neste nível, os processos de produção são mecanizados, mas ainda não há integração entre os sistemas de produção. Porém, a organização já iniciou o processo de transformação digital, mas ainda está em fase de experimentação ou tem poucos processos digitais e sistemas integrados;
- **Nível 3 (Nível definido)** - Produção automatizada: Neste nível, os processos de produção são automatizados e há integração entre os sistemas de produção. Dessa forma, a organização já definiu uma estratégia clara para a transformação digital e já implementou processos e sistemas digitais em algumas áreas, mas ainda precisa melhorar a integração e a automação em toda a cadeia de valor;
- **Nível 4 (Nível gerenciado)** - Produção inteligente: Neste nível, os processos de produção são automatizados e há integração entre os sistemas de produção, bem como a utilização de tecnologias de IoT e BD para tomar decisões de negócios. Portanto, a organização já alcançou um alto grau de maturidade em relação à transformação digital, com processos e sistemas integrados em toda a cadeia de valor e uma cultura de inovação e colaboração bem estabelecida;

- **Nível 5 (Nível otimizado)** - Produção adaptativa: Neste nível, os processos de produção são automatizados e há integração entre os sistemas de produção, bem como a utilização de tecnologias de IoT e BD para tomar decisões de negócios e se adaptar rapidamente às mudanças no mercado. Assim, a organização está na vanguarda da transformação digital, com processos e sistemas altamente automatizados, plataformas digitais de colaboração com clientes e fornecedores, e uma cultura de inovação e experimentação contínua.

A arquitetura RAMI inclui ainda uma análise quantitativa e uma análise qualitativa cujo objetivo é avaliar o desempenho dos sistemas de produção 4.0. Essa análise é uma técnica utilizada para avaliar o grau de maturidade e o desempenho de um sistema ou processo da I4.0 em relação ao modelo RAMI.

A análise quantitativa é uma avaliação objetiva que leva em consideração aspectos quantitativos, como: o volume e o tempo de produção, o tempo de paradas, o tempo de resposta a incidentes, entre outros aspectos.

Essa análise é baseada em medidas numéricas e pode ser usada para avaliar o desempenho dos sistemas de produção em relação a metas ou objetivos estabelecidos. Por exemplo, a análise quantitativa pode incluir medidas, como: a produção total, a eficiência energética ou o tempo de inatividade dos sistemas de produção.

A análise quantitativa pode ser realizada por meio de análise de dados coletados pelos componentes e sistemas da I4.0, como: sensores, sistemas de informação, entre outros. Isso possibilita o cálculo de indicadores de desempenho, como: a taxa de ocupação, a eficiência produtiva, entre outros indicadores importantes para a análise.

Já a análise qualitativa é uma avaliação subjetiva que leva em consideração aspectos qualitativos, como: a qualidade dos componentes e sistemas da I4.0, a qualidade dos processos produtivos, a qualidade da informação gerada, entre outros fatores. Como é baseada em julgamentos subjetivos, pode ser usada para avaliar aspectos mais subjetivos do desempenho dos sistemas de produção, como: a flexibilidade, a agilidade ou a qualidade dos produtos. A análise qualitativa pode, ainda, ser realizada por meio de entrevistas com os *stakeholders*, observação do processo produtivo, análise de documentos e relatórios, entre outras metodologias.

No que diz respeito à arquitetura RAMI, recomenda-se a combinação de ambas as análises. A combinação dessas duas análises permite uma avaliação mais precisa e com-

pleta do sistema ou processo da I4.0, o que pode auxiliar na tomada de decisões e na otimização dos processos produtivos. Além disso, a análise qualitativa e a quantitativa também podem ser utilizadas como base para o planejamento e a implementação de melhorias e inovações.

A combinação da avaliação qualitativa e quantitativa permite que as organizações obtenham uma visão mais completa da sua maturidade em relação à Indústria 4.0 e identifiquem áreas que precisam de mais atenção. A Figura 4.3 ilustra o procedimento para realizar a avaliação.

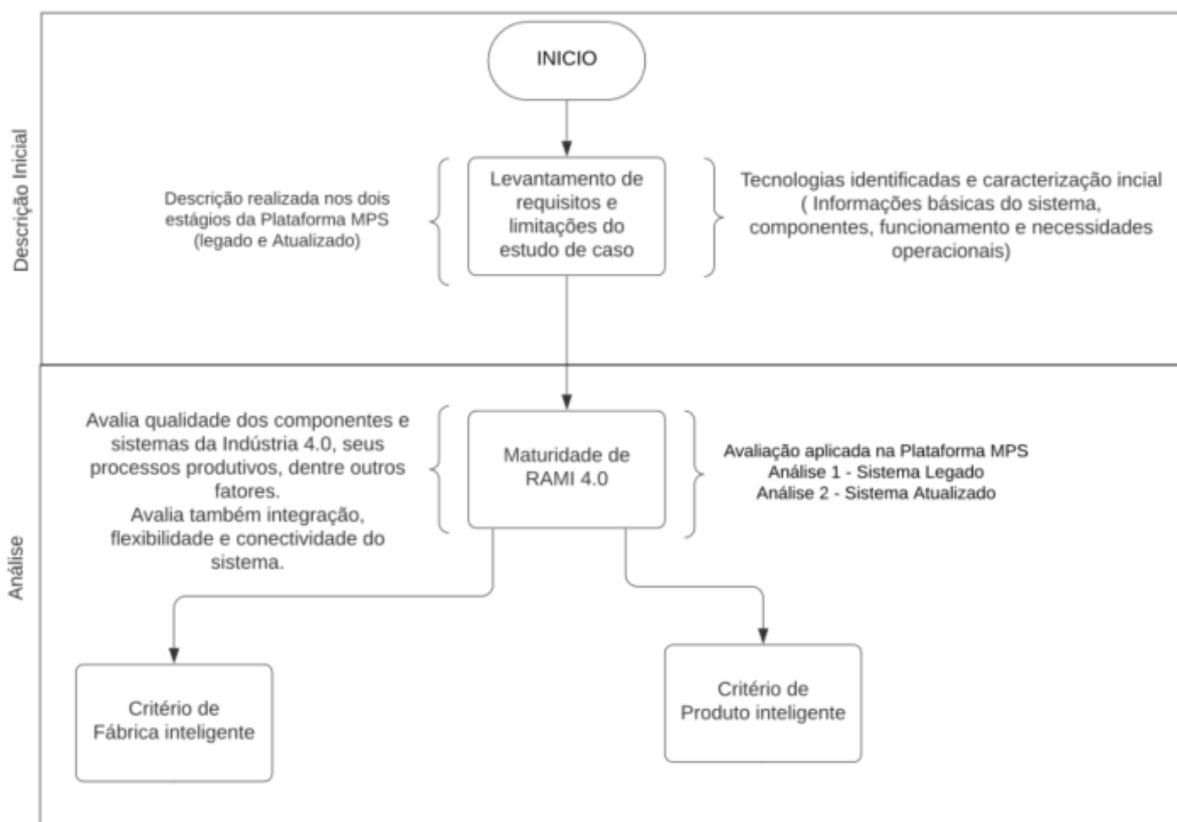


Figura 4.3: Procedimento de avaliação da Maturidade de RAMI 4.0

A análise qualitativa permite, ainda, validar os resultados quantitativos de índices do processo, levando em consideração evidências qualitativas, o que aumenta a acurácia na interpretação dos índices elegidos, com o intuito de prover conclusões mais assertivas com base na análise dos índices. Portanto, o modelo de RAMI é flexível e pode ser adaptado a diferentes contextos e necessidades, o que permite uma avaliação mais precisa e relevante.

E quanto à avaliação qualitativa, que envolve uma análise mais subjetiva dos dados coletados, considera-se, nesse contexto, aspectos como a cultura organizacional e a ca-

pacidade de inovação da organização. Já a avaliação quantitativa envolve a análise de dados objetivos e mensuráveis, como o uso de tecnologias específicas ou a existência de processos padronizados.

Para determinar e enquadrar em qual nível o sistema se encontra é importante, além disso, fazer a avaliação do procedimento empregado e estabelecer um método para assegurar que os critérios de fábrica e produto inteligente possam ser aplicados. A Figura 4.4 descreve quais são os parâmetros de cada critério e os níveis que podem atingir (classificados dos níveis 1 a nível 5). Assim, quanto maior o nível, maior a proximidade do contexto da I4.0.



Figura 4.4: Maturidade de RAMI 4.0: Critérios de fábrica e produto inteligentes e seus parâmetros

4.1.1.1 Critério de fábrica inteligente

Ao avaliar o grau de maturidade de seus sistemas de produção em relação à I4.0, é possível identificar as áreas que precisam de atualização e planejar as ações necessárias para atingir os níveis mais altos de maturidade, bem como na avaliação do custo-benefício da aplicação das tecnologias que assistem o conceito de I4.0. Assim, têm-se os critérios para avaliação do parâmetro de fábrica inteligente:

1. Automação de processos produtivos: avalia o grau de automação dos processos produtivos, desde a coleta de dados até a tomada de decisão;
2. Integração de sistemas: avalia o nível de integração entre sistemas de controle e gestão de dados, permitindo a troca de informações em tempo real;

3. Uso de dispositivos inteligentes: avalia o uso de sensores, dispositivos de IoT e outras tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0;
4. Análise de dados em tempo real: avalia a capacidade de análise de dados em tempo real para suportar a tomada de decisão;
5. Flexibilidade de produção: avalia a capacidade da fábrica em se adaptar a mudanças na demanda do mercado e na produção.

O parâmetro de fábrica inteligente de RAMI é uma medida que indica o grau de inteligência e automação de uma fábrica. O parâmetro é mostrado na Figura 4.5 e é composto por cinco níveis, dispostos a seguir: nível 0 (fábrica tradicional), nível 1 (fábrica integrada), nível 2 (fábrica inteligente), nível 3 (fábrica autônoma) e nível 4 (fábrica adaptativa).

- Fábrica tradicional: baseada em processos manuais e produção em massa com pouca automação. A produção é organizada em linhas de montagem e a produção em grande volume é priorizada;
- Fábrica integrada: começa a incorporar tecnologias como sistemas de automação e controle de qualidade, permitindo a produção em lotes menores e maior flexibilidade;
- Fábrica inteligente: adota sistemas que permitem uma integração mais avançada entre a produção e a tecnologia. Além da automação, há uma interconexão de todos os sistemas e dispositivos, permitindo a coleta e análise de dados em tempo real, bem como tomadas de decisão automatizadas;
- Fábrica autônoma: o uso de sistemas ciber físicos avançados, como robôs autônomos e veículos autônomos, torna a produção mais autônoma. Isso permite que a fábrica funcione com pouca ou nenhuma intervenção humana, reduzindo os custos e aumentando a eficiência;
- Fábrica adaptativa: a produção é altamente flexível e adaptável às mudanças nas condições do mercado. Isso é possível graças à utilização de sistemas inteligentes e autônomos, que são capazes de ajustar a produção em tempo real, levando em consideração as demandas dos clientes e as mudanças no ambiente de produção.

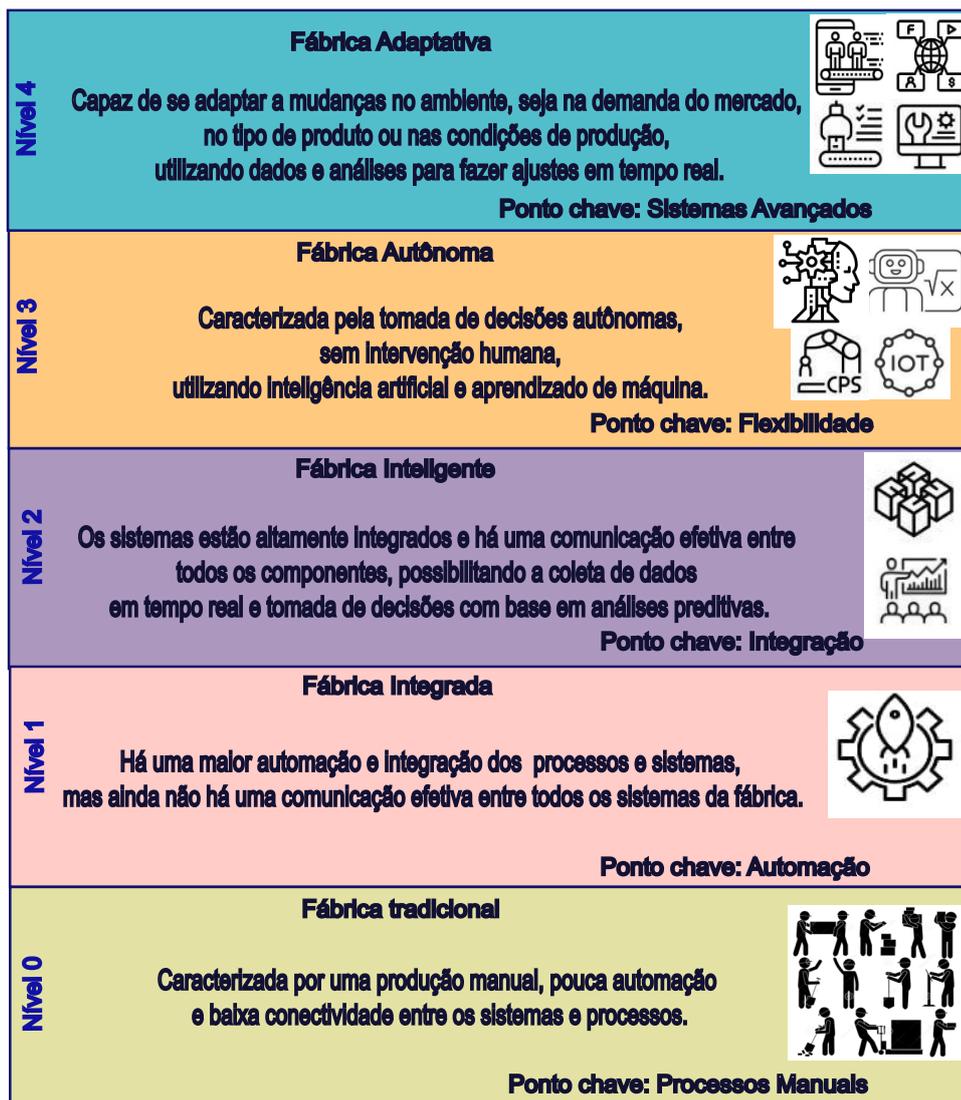


Figura 4.5: Níveis do parâmetro de fábrica inteligente

O objetivo é enquadrar o processo a ser analisado em um dos níveis de acordo com os pontos identificados em cada camada, para, em seguida, esse parâmetro ser avaliado por meio de quatro fases: planejamento, implementação, operação e manutenção. A Figura 4.6 ilustra a relação entre as fases e etapas da fábrica inteligente.

Na fase de planejamento, são definidos os objetivos e metas da implementação da I4.0, bem como a estratégia e o plano de ação para alcançá-los. Nesta fase inicial, é importante avaliar os recursos disponíveis, incluindo os financeiros, humanos e tecnológicos, para determinar o que será necessário para a implementação, bem como realizar uma análise de requisitos e atentar para as limitações do sistema quanto a sua atualização.

Na fase de implementação, os componentes da arquitetura voltados para fábrica inteligente são selecionados e implementados. Isso inclui a instalação de sensores, atuadores,

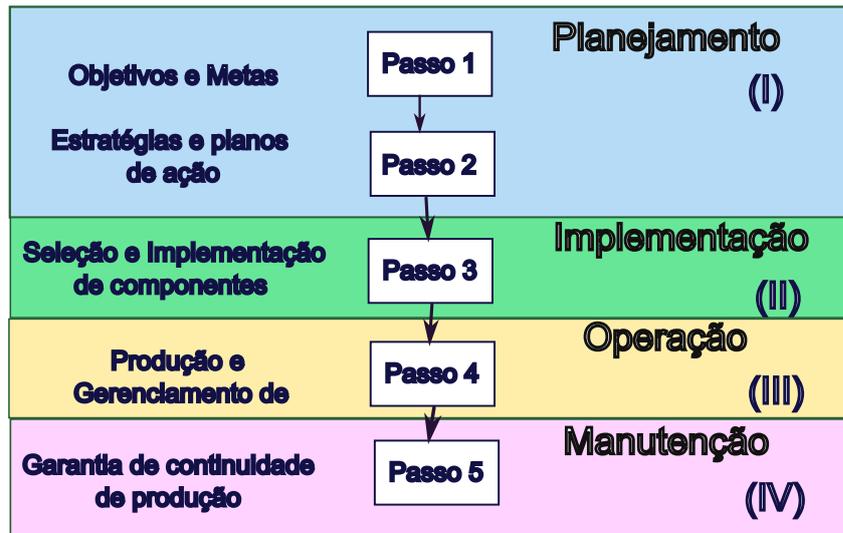


Figura 4.6: Fases e etapas do parâmetro de fábrica inteligente

controladores e sistemas de gerenciamento de dados e processos. É importante garantir que a integração entre os componentes seja eficiente e otimizada para garantir o funcionamento correto da fábrica inteligente.

Na fase de operação, a fábrica inteligente é usada para produzir e gerenciar os processos de produção. Isso inclui coletar e processar dados em tempo real, gerenciar os recursos e automatizar os processos de produção. É necessário, ainda, monitorar o desempenho da fábrica inteligente e realizar ajustes e otimizações de acordo com as necessidades.

Na fase de manutenção, é importante garantir que a fábrica inteligente continue funcionando de maneira eficiente e otimizada. Isso inclui realizar manutenção preventiva e corretiva nos componentes da arquitetura e garantir que as atualizações e ajustes sejam feitos de maneira adequada.

4.1.1.2 Critério de produto inteligente

Os critérios para avaliação do parâmetro de produto inteligente são:

1. Coleta de dados em tempo real: avalia a capacidade do produto em coletar e transmitir dados em tempo real sobre seu desempenho e uso;
2. Análise de dados: avalia a capacidade do produto em utilizar análises de dados para melhorar seu desempenho e oferecer melhores experiências aos usuários;
3. Conectividade: avalia a capacidade do produto em se conectar a outros dispositivos e sistemas, permitindo a integração com outras tecnologias;

4. Personalização: avalia a capacidade do produto em ser personalizado de acordo com as necessidades e preferências dos usuários;
5. Interatividade: avalia a capacidade do produto em interagir com os usuários, por meio de interfaces intuitivas e experiências imersivas.

Por certo, percebe-se que o parâmetro de produto inteligente, baseado no modelo RAMI, se refere à incorporação de tecnologias avançadas em produtos, como: sensores, computação embarcada, conectividade e inteligência artificial, para torná-los mais inteligentes e capazes de se adaptar ao ambiente e às necessidades de seus usuários. Estas tecnologias permitem que os produtos sejam mais flexíveis e se adaptem às condições do ambiente, o que pode aumentar a eficiência e a qualidade de seu funcionamento. Portanto, os produtos inteligentes podem ser integrados aos sistemas de gerenciamento da produção, o que permite uma monitoração em tempo real e a tomada de decisões mais eficientes. A Figura 4.7 ilustra as etapas de produto inteligente e os passos são sumarizados a seguir:

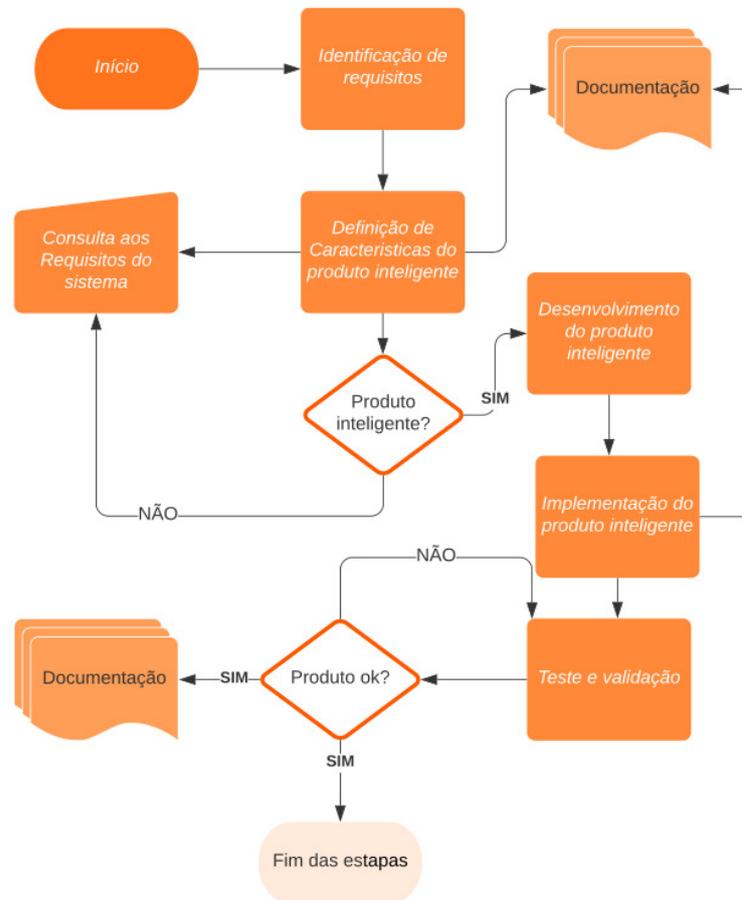


Figura 4.7: Etapas do parâmetro de produto inteligente

1. Identificar os requisitos do produto: primeiramente, é importante entender as necessidades e expectativas do produto, incluindo suas funcionalidades, características e especificações;
2. Definir as características do produto inteligente: com base nos requisitos, é necessário definir as características que o produto deve ter para ser considerado inteligente, como a capacidade de se comunicar com outros dispositivos, armazenar e processar dados, tomar decisões e se adaptar ao ambiente;
3. Desenvolver o projeto do produto: com as características definidas, é hora de desenvolver o projeto do produto, incluindo a escolha dos componentes e as tecnologias que serão utilizados;
4. Implementar o produto: com o projeto pronto, é hora de colocar o produto em prática, realizando a produção e integrando as características inteligentes definidas;
5. Testar e validar o produto: para garantir que o produto atenda aos requisitos e esteja funcionando corretamente, é necessário realizar testes e validações para verificar se as características inteligentes estão sendo implementadas de forma adequada;
6. Lançamento e manutenção do produto: após a validação, o produto estará pronto para ser lançado no mercado e começar a ser utilizado. É importante também garantir a manutenção e atualização do produto para garantir sua continuidade e otimização.

4.2 *Roadmap* para implementação da metodologia *Retrofit*

O *retrofit*, como descrito por García et al. (2020) e Niemeyer et al. (2020), é uma abordagem que visa a modernizar ou atualizar sistemas ou processos produtivos existentes. O principal propósito é torná-los mais eficientes, flexíveis, seguros e adaptáveis às novas necessidades e tecnologias. Esse procedimento pode incluir a adição ou substituição de componentes ou tecnologias, bem como a integração de sistemas de informação ou gerenciamento, conforme necessário.

Para atualizar um sistema legado, usando técnicas de *retrofit*, é essencial seguir um processo bem definido que pode iniciar com a identificação e estabelecimento dos objetivos da atualização, com o intuito de melhorar a eficiência, reduzir custos, aprimorar a qualidade, reforçar a segurança e atender a outros objetivos desejáveis.

Em paralelo, é muito importante conduzir uma análise minuciosa do sistema legado. Esta análise envolve a identificação dos componentes, dependências, interações, problemas e limitações existentes no sistema. Isso possibilita a seleção adequada das tecnologias que serão empregadas na atualização. Essa seleção é feita levando em consideração os objetivos da atualização, bem como as características específicas do sistema legado.

Durante o processo de atualização, é indispensável definir os componentes, procedimentos e processos que serão alvo de modificação ou adição. Posteriormente, os testes são realizados para garantir o funcionamento correto, sendo feitos os ajustes necessários quando identificados problemas. Além disso, é essencial fornecer treinamento aos usuários para que eles possam interagir eficazmente com as mudanças implementadas.

Com base na revisão da literatura, foram identificados e consolidados os passos que norteiam a formulação da metodologia de *retrofit*. A Figura 4.8 apresenta um diagrama que esquematiza o fluxo de etapas a serem aplicadas para alcançar com sucesso o *retrofit*.

Levantamento e limitações de funcionamento da Planta	Definição dos objetivos	Seleção dos componentes e tecnologias a serem atualizados	Integração dos novos componentes e tecnologias	Teste e validação dos novos componentes e tecnologias
Etapa 1 →	Etapa 2 →	Etapa 3 →	Etapa 4 →	Etapa 5
<ul style="list-style-type: none"> • Requisitos e restrições • Identificar seus pontos fortes e fracos • Elencar equipamentos/dispositivos ou elementos que desempenham um papel fundamental no funcionamento e operações da planta 	<ul style="list-style-type: none"> • Definir a estratégia apropriada e planos de ação para a atualização; • Demandas e expectativas dos usuários, bem como as características e particularidades do sistema legado; • Avaliar e documentar os benefícios esperados 	<ul style="list-style-type: none"> • Selecionar os componentes e tecnologias apropriados com base na caracterização e dos objetivos definidos nas etapas anteriores; • Classifica-los quanto à prioridade com base em critérios como impacto no desempenho, custo de atualização e complexidade; • Verificar a compatibilidade de hardware e o software existentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliar e garantir a compatibilidade de hardware e o software existentes; • Identificar possíveis conflitos ou problemas de interoperabilidade; • Avaliar comunicação e aquisição de dados; • Integrar o Digital Twin para obtenção do modelo virtual do estudo de caso; • Realizar a integração garantindo uma transição suave e funcionalidade contínua do sistema atualizado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Testes manuais e automatizados para avaliar o funcionamento; • Avaliar condições operacionais normais, capacidade dos novos componentes em lidar com cargas de trabalho típicas e de pico; • Monitorar e controlar o sistema usando o Digital Twin implementado.

Figura 4.8: Etapas de aplicação da metodologia *Retrofit*

Etapa 1 - Levantamento e limitações de funcionamento da Planta (Caracterização)

Para garantir um *retrofit* bem-sucedido, é crucial realizar uma análise detalhada do sistema legado existente. Isso envolve identificar seus pontos fortes e fracos, bem como seus requisitos e restrições. A Figura 4.9 mostra um diagrama que esquematiza o fluxo

dessa etapa e o resultado esperado levando em consideração fatores como: avaliar os componentes individualmente e as tecnologias que precisam ser atualizadas ou substituídas; benefícios esperados, eventuais riscos e impactos, estimar custos e estabelecer prazos de implementação, entre outros fatores.

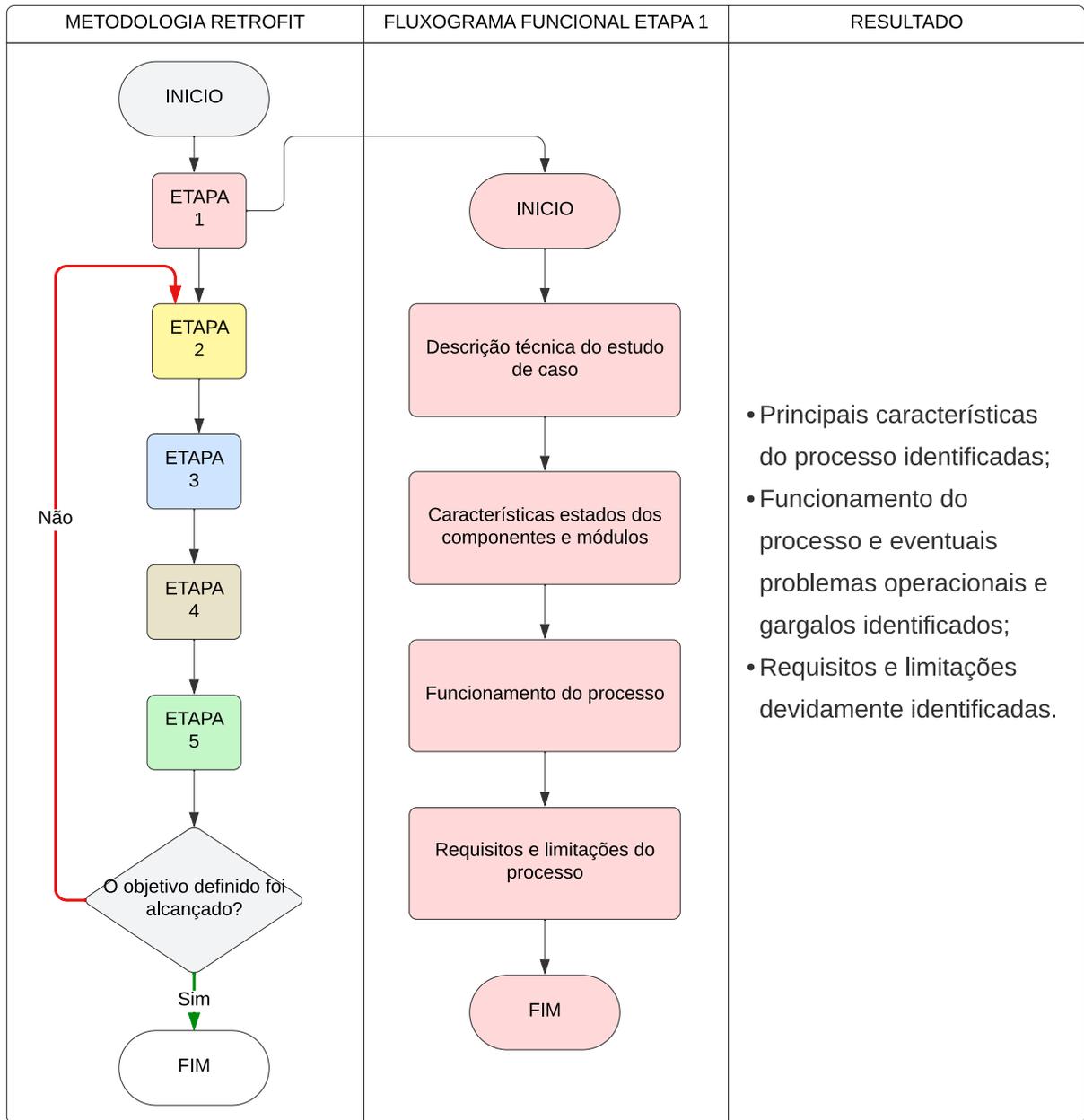


Figura 4.9: Etapas 1 de aplicação da metodologia *Retrofit*

Ao levar todos esses aspectos em consideração, é possível tomar decisões sobre quais componentes atualizar e como prosseguir com a atualização. Essa etapa é muito importante, pois ela fornecerá a base para todas as etapas subsequentes. Assim, a realização precisa e detalhada desta etapa é fundamental para um bom processo de atualização,

iniciando com uma compreensão profunda da planta, ambiente e/ou instalação em que o sistema legado está implantado. Compreensão esta, na forma, de diagramas, esquemas, fluxogramas de funcionamento e documentações relevantes que ajudem nessa etapa.

Portanto, com essas informações, são identificados equipamentos/dispositivos ou elementos que desempenham um papel fundamental no funcionamento e operações da planta. Assim, esses ativos podem ser os principais alvos para atualização independente se for pelo estado do componente (se está deteriorado) ou por necessitar ser atualizado (se enquadrar em tecnologia legada).

Com todas essas informações, é possível definir os benefícios esperados do processo de *retrofit*, como o aumento da produtividade, redução de custos operacionais, melhoria da segurança ou conformidade com regulamentos atualizados. A coleta abrangente de dados e a análise criteriosa proporcionam uma base concreta para o planejamento e a execução das etapas subsequentes, em particular na definição dos objetivos.

Etapa 2 - Definição dos objetivos

Para definir a estratégia apropriada e planos de ação para a atualização, é importante identificar os objetivos e metas, que podem incluir a melhoria da eficiência, a redução de custos e o aumento da flexibilidade. A Figura 4.10 mostra um diagrama que esquematiza o fluxo dessa etapa e o resultado esperado, de forma que, além de identificar os objetivos, é importante considerar todas as necessidades e expectativas dos usuários, bem como as características e particularidades do sistema legado. Também é importante avaliar os benefícios esperados, riscos e impactos, entre outros aspectos.

Além de definir os objetivos, é importante avaliar e documentar os benefícios esperados que resultarão da implementação bem-sucedida do processo de *retrofit*. Isso pode incluir redução de custos, aumento da produtividade, redução de falhas, maior eficiência energética e sustentabilidade.

A definição de objetivos sólidos e realistas é essencial para direcionar eficazmente o processo de *retrofit*. Esses objetivos fornecem um roteiro para as decisões de projeto e cumprimento das metas e uma avaliação de sucesso. Assim, a observância cuidadosa das necessidades elencadas e a avaliação de benefícios, riscos e impactos ajudam a garantir que a atualização atenda às expectativas e aos padrões de qualidade estabelecidos.

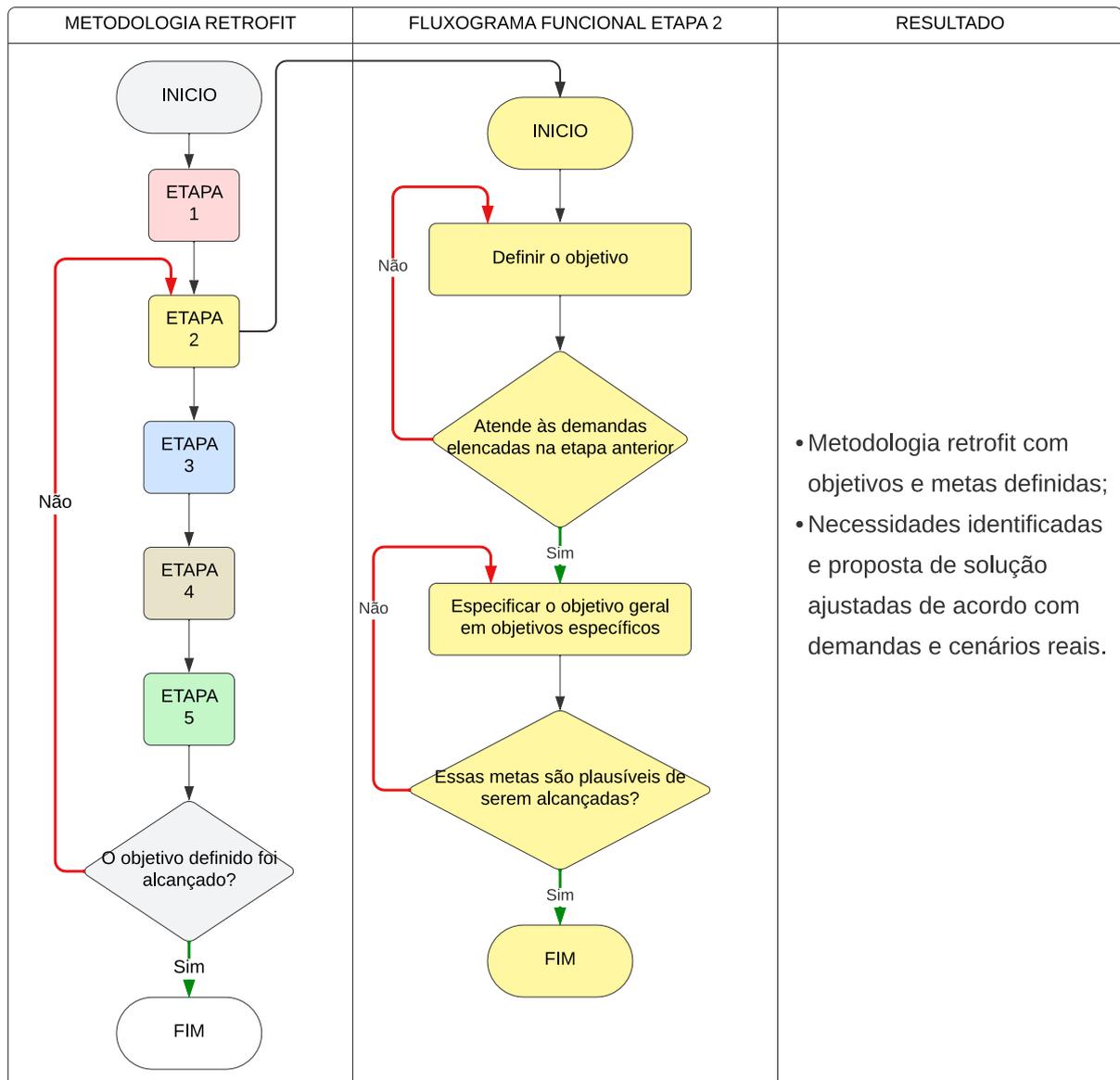


Figura 4.10: Etapas 2 de aplicação da metodologia *Retrofit*

Etapa 3 - Seleção de componentes e tecnologias a serem atualizados

Para garantir um processo de atualização bem-sucedido, é crucial selecionar os componentes e tecnologias apropriados com base na caracterização e dos objetivos definidos anteriormente. Assim, a Figura 4.11 mostra um diagrama que esquematiza o fluxo dessa etapa e o resultado esperado com base na seleção de quais componentes ou tecnologias serão atualizados; sua classificação por prioridade com base em critérios como impacto no desempenho e custo de atualização e complexidade de instalação.

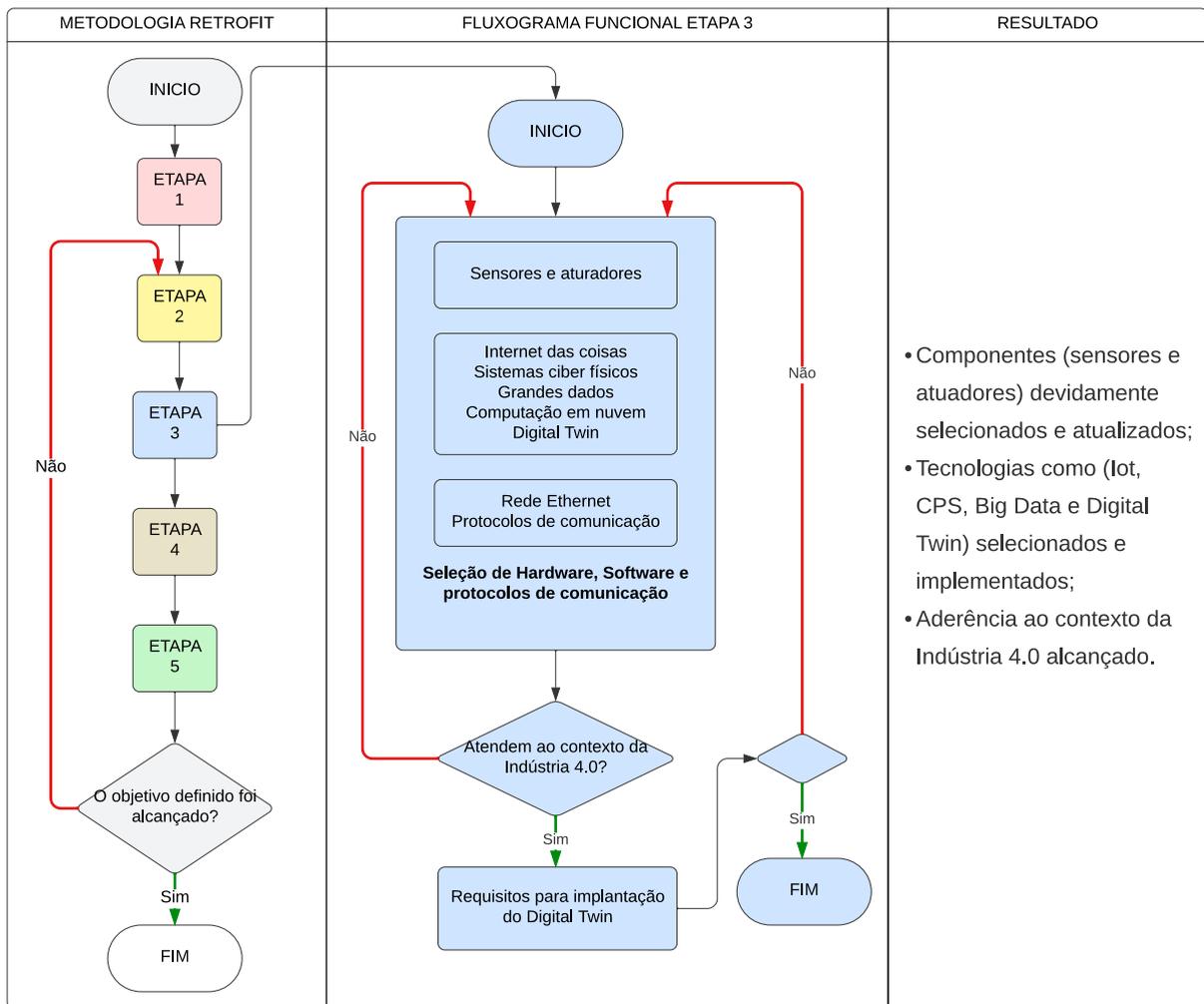


Figura 4.11: Etapas 3 de aplicação da metodologia *Retrofit*

Garantir que as seleções feitas durante esta etapa e no processo de *retrofit* como um todo continuem a atender às necessidades da planta. Dessa forma, serão obtidos dois resultados imediatos: compatibilidade de *hardware* e o *software* existentes (pois a incompatibilidade pode levar a problemas de integração e operação) e considerações em relação a futuras atualizações (escolher tecnologias que podem ser facilmente atualizadas ou expandidas ajuda a garantir que o sistema permaneça relevante a longo prazo).

Selecionar os componentes e tecnologias corretos é uma parte essencial do processo de *retrofit* e pode ter um impacto significativo na eficácia do projeto. Portanto, esta etapa deve ser realizada com cuidado e consideração para garantir que as escolhas feitas estejam alinhadas com os objetivos e requisitos do projeto definidos anteriormente.

Etapa 4 - Integração de novos componentes e tecnologias

Antes de prosseguir com a integração, é fundamental avaliar a compatibilidade dos novos componentes e tecnologias com o sistema legado. Isso inclui a identificação de

possíveis conflitos, problemas de interoperabilidade e requisitos de *hardware* e *software*. Além da compatibilidade de protocolos de comunicação também é imprescindível para garantir uma comunicação eficaz entre os sistemas. Assim, a Figura 4.12 mostra um diagrama que esquematiza o fluxo dessa etapa e o resultado esperado.

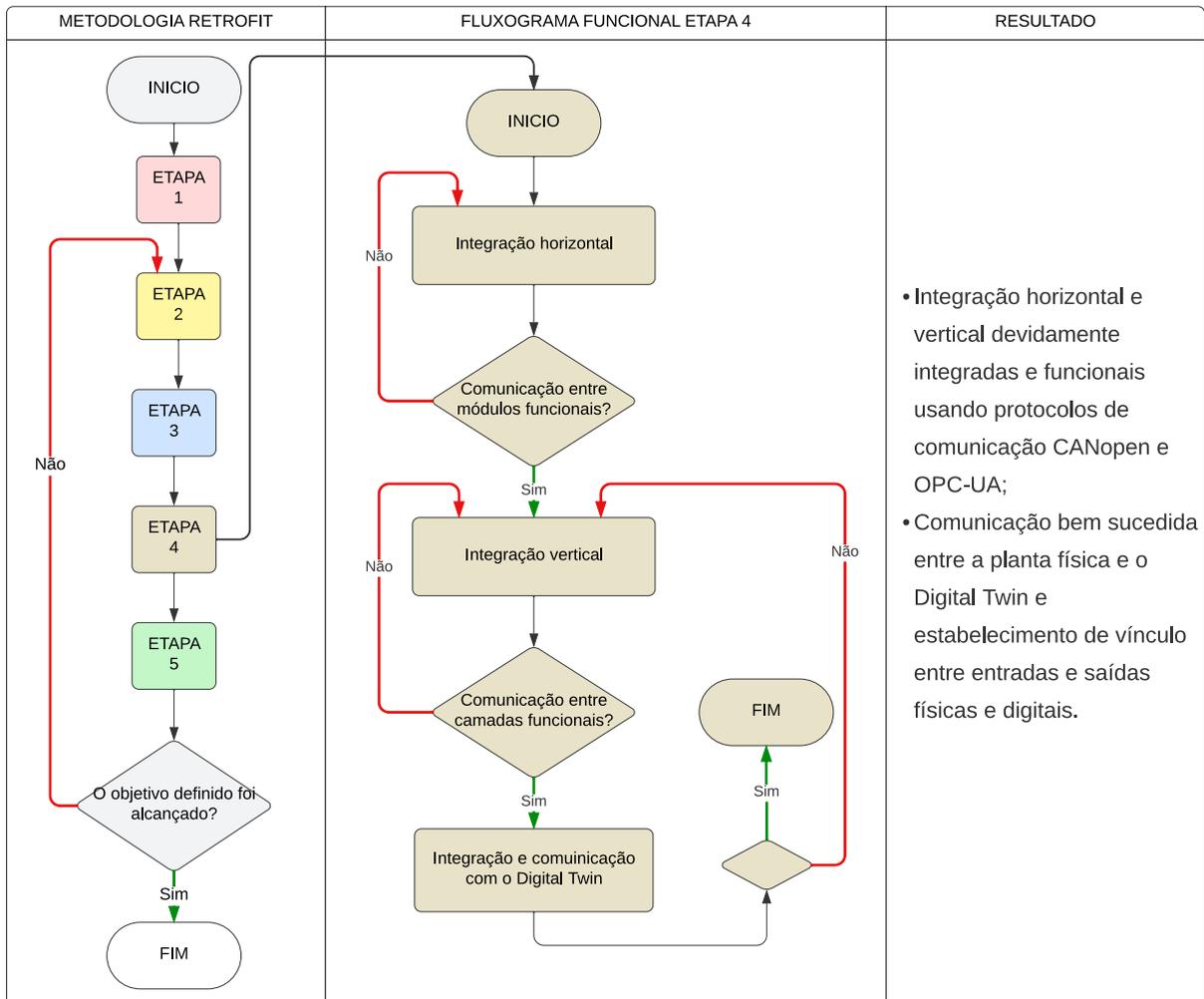


Figura 4.12: Etapas 4 de aplicação da metodologia *Retrofit*

Portanto, nesta etapa, é importante que um plano de integração detalhado seja utilizado, de forma que, apresente as etapas necessárias para incorporar os novos componentes no sistema existente, a sequência das atividades, cronogramas e procedimentos para os teste que serão realizados na etapa seguinte.

A realização dos testes de integração são minuciosos de forma a garantir que os novos componentes funcionem corretamente e que a integração tenha sucesso. Isso envolve a verificação do funcionamento conjunto de todos os componentes do sistema e a identificação de quaisquer problemas de compatibilidade ou falhas de comunicação.

A integração eficaz de novos componentes e tecnologias no sistema legado é um desafio

crítico, uma vez que pode afetar a operação contínua da planta ou sistema. Portanto, uma abordagem cuidadosa, testes rigorosos e monitoramento pós-integração são fundamentais para garantir uma transição suave e a funcionalidade contínua do sistema atualizado.

Etapa 5 - Teste e validação de novos componentes e tecnologias

Testes e validação rigorosos são essenciais para garantir o funcionamento adequado dos novos componentes e tecnologias, bem como para avaliar os riscos e impactos potenciais, alinhados com as etapas anteriores. Uma combinação de testes manuais e automatizados ajuda a avaliar o funcionamento dos novos componentes e tecnologias. Os testes manuais envolvem a verificação manual de funcionalidades, enquanto os testes automatizados podem ser usados para repetir cenários de uso com eficiência.

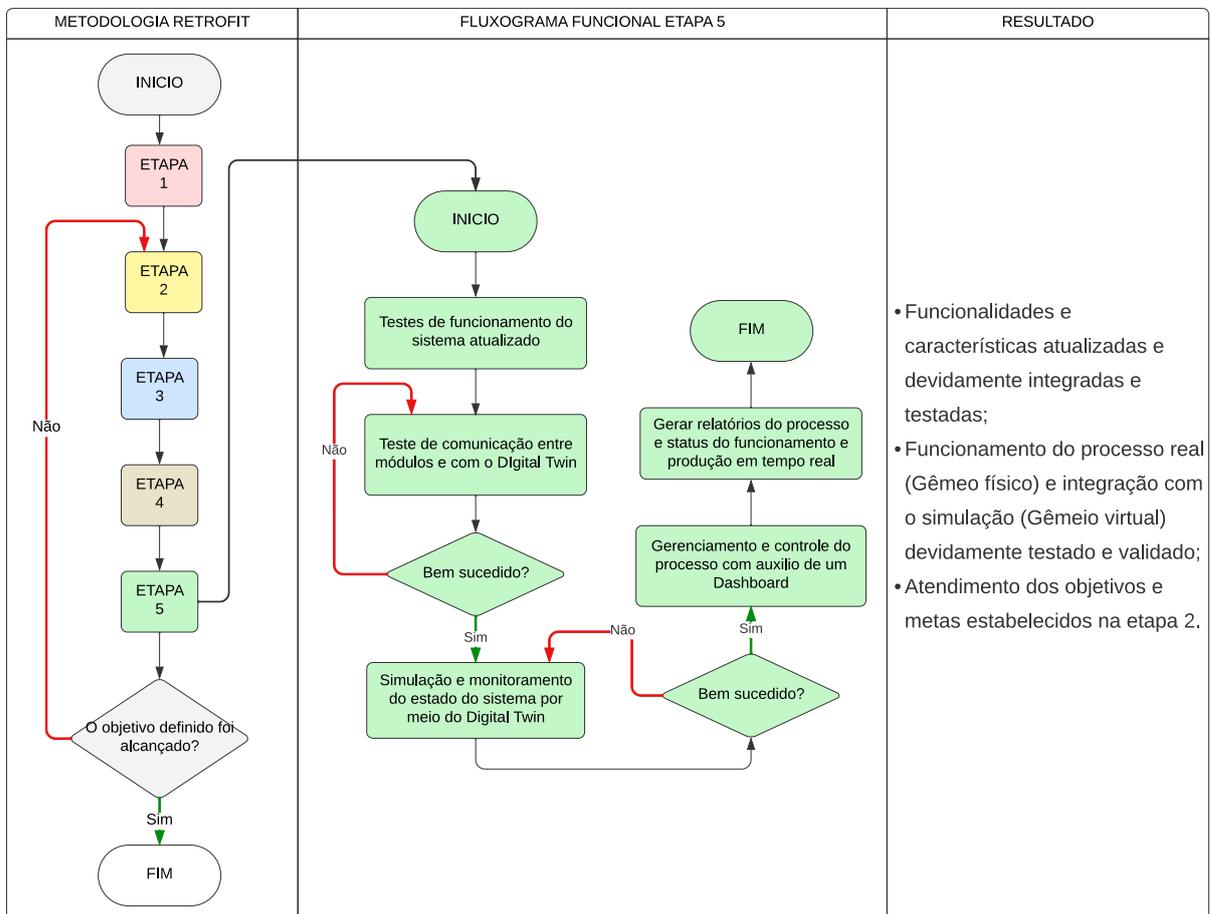


Figura 4.13: Etapas 5 de aplicação da metodologia *Retrofit*

Nessa etapa, como mostrado na Figura 4.13, são realizados testes específicos para avaliar condições operacionais normais, capacidade dos novos componentes em lidar com cargas de trabalho típicas e de pico e verificar como os novos componentes se integram ao sistema existente. A simulação será usada para criar cenários que permitam testar

o funcionamento dos novos componentes em condições diversas, sem afetar as operações reais.

Se durante os testes forem identificados problemas ou falhas, serão tomadas medidas para realizar ajustes e correções necessárias. É importante resolver essas questões antes de prosseguir com a implementação completa.

O processo de testes e validação é crítico para garantir que as mudanças no sistema legado ocorram sem problemas e que os objetivos definidos anteriormente sejam alcançados. Esta etapa fornece uma oportunidade de identificar e resolver problemas antes que afetem a operação cotidiana e é essencial para a integridade e funcionalidade contínuas do sistema atualizado.

Essas cinco etapas fornecem um plano estruturado para a realização de um processo de *retrofit* em um sistema legado. Elas garantem que as atualizações sejam realizadas de maneira eficaz, com a integridade e a funcionalidade do sistema mantidas, e que os objetivos do projeto sejam alcançados. A implementação bem-sucedida de um *retrofit* leva a melhorias significativas no desempenho, eficiência e segurança do sistema.

Percebe-se, assim, que a metodologia foi projetada para orientar a transformação bem-sucedida de sistemas legados por meio de procedimentos que proporcionam um processo estruturado e detalhado de *retrofit*. Cada etapa desempenha um papel fundamental para se alcançar os objetivos do projeto e a garantia da integridade e funcionalidade contínuas do sistema atualizado (retrofitado).

4.2.1 Critério de avaliação

A aplicação da metodologia *retrofit* visa a atualização e melhoria de sistemas considerados legados para um contexto mais atual. Portanto, por ser um sistema antigo, que mesmo após a atualização, é fundamental um acompanhamento contínuo e manutenção (preventiva) do sistema legado, destacando a importância de monitorar o funcionamento, realizar manutenções planejadas e corretivas, bem como atualizar componentes, caso seja necessário. Assim, após a implementação da atualização, alguns resultados podem ser alcançados, como os detalhados em seguida e mostrados na Figura 4.14:

O aumento da eficiência é esperado, pois a atualização proporciona ao sistema uma série de melhorias devido ao fato de as novas tecnologias e componentes terem a capacidade de aumentar a velocidade de processamento e diminuir os tempos de processo e



Figura 4.14: Resultados esperados do sistema atualizado. Adaptado de Contreras Pérez et al. (2018)

inatividade. Outro resultado é o aumento da segurança, pois as novas tecnologias podem incluir medidas de segurança mais avançadas, como autenticação de dois fatores e criptografia de dados.

Ademais, há também, o aumento da flexibilidade, pois as novas tecnologias podem permitir que o sistema se adapte facilmente às mudanças ou demandas atuais e/ou futuras. A redução dos custos de manutenção são devidas principalmente a novos componentes e pelo fato de as novas tecnologias serem mais fáceis de manter e atualizar. E, por fim, é esperado que a satisfação dos usuários aumente, pois o sistema pode se tornar mais intuitivo e mais fácil de usar.

A inclusão da arquitetura Digital Twin na metodologia de retrofit sugerida representa um elemento fundamental em nosso processo de modernização de sistemas legados. O Digital Twin atua como uma ferramenta significativa que não apenas oferece uma representação virtual em tempo real do processo, mas também possibilita a monitoração constante e a detecção de setores que demandam atenção, englobando potenciais gargalos na produção.

Ademais, o Gêmeo Digital proporciona a possibilidade de simular e avaliar atualizações potenciais antes de sua efetiva implementação. Essa característica diminui de maneira significativa os riscos relacionados ao procedimento de atualização, além de aprimorar a execução, assegurando que as alterações sejam eficientes e seguras.

Em sistemas que integram elementos de distintos fabricantes, problemas de interoperabilidade frequentemente surgem, especialmente nas interfaces de comunicação entre os diversos módulos e componentes. A abordagem de *retrofit*, aliada às camadas da arquitetura *Digital Twin*, delineia de maneira minuciosa os protocolos de comunicação que devem ser implementados. Isso promove uma integração vertical e horizontal eficiente do sistema aprimorado, favorecendo a comunicação entre os diversos componentes e assegurando que o sistema opere de maneira coesa e eficaz.

Dessa forma, pode-se afirmar que a arquitetura *Digital Twin* é o elemento fundamental deste trabalho e o processo de atualização (*retrofit*) de sistemas legados é uma transformação necessária para alcançar este objetivo. A integração da metodologia de *retrofit* com a arquitetura *Digital Twin* constitui assim, a principal contribuição e diferencial deste trabalho. Em seguida, a validação é obtida por meio de uma análise que visa verificar a maturidade do modelo RAMI em relação à Indústria 4.0 e determinar o nível atual do sistema. A avaliação será conduzida com base nos critérios de fábricas inteligentes.

A maturidade e os critérios associados são essenciais para avaliar e validar, de forma objetiva, os resultados da proposta deste trabalho. Eles permitem medir e categorizar a transformação digital do sistema legado e ajudam a determinar o nível de maturidade da Indústria 4.0 que o estudo de caso alcançará após a atualização. Isso possibilita uma melhor estimativa dos resultados, da efetividade das características alcançadas e da aderência ao contexto da Indústria 4.0.

4.3 Resumo da proposta de aplicação da arquitetura de *Digital Twin* em sistemas legados

Este capítulo focou na apresentação da proposta de desenvolvimento de uma arquitetura de *Digital Twin* para sistemas legados, utilizando como base o modelo de referência RAMI 4.0. O objetivo será criar uma arquitetura que permita a aplicação eficaz do *Digital Twin* em sistemas legados, proporcionando funcionalidades avançadas como monitoramento em tempo real, simulação de cenários e análises preditivas.

Para atingir tal objetivo, o processo de *retrofit* será empregado como uma ferramenta habilitadora essencial. O *retrofit* busca atualizar o sistema legado através da incorporação

de tecnologias modernas da I4.0, estabelecendo a infraestrutura necessária para suportar a nova arquitetura baseada em RAMI e implementar o *Digital Twin*.

Em seguida, com a finalidade de avaliar os resultados obtidos, uma avaliação tanto qualitativa quanto quantitativa da proposta do projeto será aplicada para obter uma compreensão aprofundada das mudanças no sistema como a melhoria na facilidade de uso, na comunicação entre componentes e na adequação das novas tecnologias às necessidades operacionais, ou no caso de fornece dados objetivos e mensuráveis sobre o desempenho do sistema, como aumentos na eficiência, redução de gargalos, e melhorias na produtividade e segurança.

Juntas, essas avaliações proporcionam uma visão abrangente do impacto da implementação da arquitetura de *Digital Twin* baseada em RAMI e do processo de *retrofit*, permitindo ajustes precisos e fundamentados para melhorar ainda mais o sistema. Essa abordagem combinada assegura que as melhorias não sejam apenas percebidas, mas também quantificadas, validando o valor do projeto em termos concretos e sustentáveis.

A avaliação é um componente crítico tanto no início quanto após a aplicação da metodologia. Assim, inicialmente, ela é utilizada para analisar o estado do sistema legado, compreendendo seus componentes, formas de comunicação, tecnologias utilizadas, e identificando pontos do processo que são elegíveis para melhorias ou classificados como gargalos. Após a implementação da metodologia *retrofit* para obtenção do DT, uma reavaliação será realizada para comparar o estado atual do sistema. Essa comparação permite classificar e medir as melhorias alcançadas, destacando a evolução entre o estado inicial e o final.

Por fim, entender o sistema significa estudar o "antes" e o "depois" do estudo de caso deste trabalho. A metodologia de *retrofit*, em conjunto com a arquitetura de *Digital Twin* baseada em RAMI, gera resultados que serão avaliados pela comparação entre o sistema legado e o sistema atualizado. Essa abordagem não só moderniza o sistema, mas também oferece uma visão clara das melhorias e adaptações necessárias para alinhar o sistema legado com as demandas da Indústria 4.0.

Capítulo 5

Estudo de caso: Descrição do sistema legado e aplicação do *Retrofit*

Sistemas legados frequentemente exigem atualizações para acompanhar as tecnologias modernas e as necessidades em constante mudança. A atualização de um sistema legado pode envolver a atualização de *software*, *hardware* ou ambos. Esse processo também pode envolver a adição de novos dispositivos, como sensores, dispositivos IoT e sistemas de inteligência artificial, para aprimorar a funcionalidade do sistema. Além disso, dispositivos mais antigos podem precisar ser substituídos por dispositivos mais recentes para melhorar o desempenho e a segurança do sistema.

A plataforma didática da MPS V2.0 é considerada um sistema legado dependendo do contexto em que é utilizada. Portanto, um sistema legado é geralmente definido como um sistema que é antigo, desatualizado ou que depende de tecnologias obsoletas (podendo incluir sistemas de *software*, *hardware* ou equipamentos) em comparação com as tecnologias mais recentes disponíveis no mercado.

5.1 Sistema Modular de Produção (MPS)

O Sistema Modular de Produção, do inglês, *Modular Producing System* (MPS), fabricado pela empresa FESTO, é uma plataforma didática que representa um sistema de produção flexível e modular, que permite a customização e a adaptação de equipamentos e processos de produção, de acordo com as necessidades especificadas em projeto.

O objetivo da plataforma, dentre outras funcionalidades, é fornecer uma ferramenta de

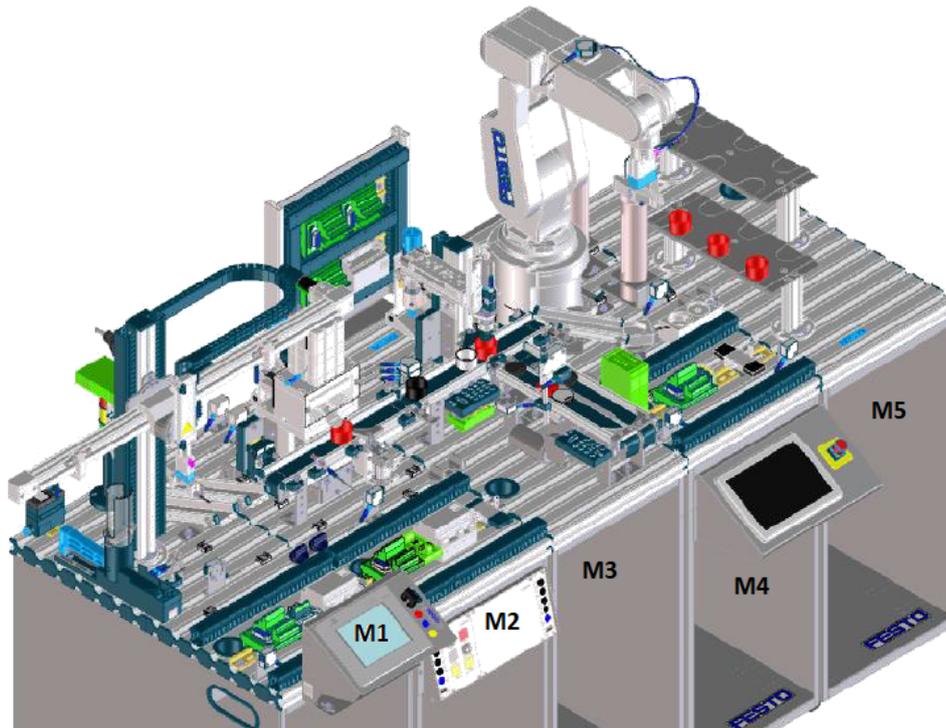


Figura 5.1: Planta MPS - Esboço

ensino para a educação prática em automação. Ela é projetada para ajudar professores e estudantes a compreender os conceitos fundamentais da automação e fornecer experiência prática na programação de sistemas de automação.

A planta MPS mostrada, na Figura 5.1, pode ser utilizada em diversas aplicações, incluindo produção de peças, montagem de produtos, manufatura personalizada e outras. O sistema de produção é dividido em módulos ou unidades independentes, que podem ser combinados e integrados, de acordo com as necessidades do processo produtivo. Cada módulo é responsável por uma etapa do processo de produção, como a preparação de matérias-primas, o processamento de componentes ou a montagem de produtos acabados.

O MPS é um sistema modularizado de produção com foco no aumento da flexibilidade e a adaptabilidade da produção, permitindo que seja possível atender às variações na demanda ou nas condições do mercado de forma mais rápida e eficiente. Assim, podem ser citadas algumas das principais características, detalhadas por Ružarovský et al. (2021), para esse tipo de sistema:

- **Flexibilidade:** permite a customização e a adaptação de equipamentos e processos de produção de acordo com as necessidades dos clientes;
- **Modularidade:** é composto por módulos padronizados que podem ser combinados

de acordo com as necessidades da aplicação;

- **Integração:** permite a integração de diversos componentes e tecnologias, incluindo robôs, sistemas de visão, sistemas de medição e outros;
- **Escalabilidade:** pode ser escalado de acordo com as necessidades da produção, permitindo a adaptação a diferentes volumes e variedades de produção;
- **Otimização:** permite a otimização de processos e a redução de custos através da automação de tarefas e da redução de erros.

Em suma, o *hardware* do MPS inclui dispositivos de entrada e saída, como sensores e atuadores, bem como controladores e interfaces de rede que permitem a comunicação entre os diferentes componentes do sistema; já o *software* do MPS inclui o sistema operacional e os aplicativos de gerenciamento de produção, que permitem a configuração e o monitoramento do sistema.

5.1.1 *Hardware*

O MPS é composto por módulos que podem ser combinados e/ou reorganizados de acordo com as necessidades da aplicação. A configuração e módulos disponíveis são: módulo de transporte, módulo de prensagem, módulo de tampagem e módulo do robô, os quais serão descritos a seguir:

- **Módulo Transportador (*Handling* - M1)** - é uma solução de automação de produção que visa a simplificar e otimizar o transporte e a manipulação de peças e produtos em linhas de produção e montagem. Ele é composto por diversos componentes, como: robôs, sistemas de transporte, dispositivos de agarramento e dispositivos de medida, que são integrados e têm um controle central para gerenciar o fluxo de trabalho. O módulo *handling* pode ser programado para realizar tarefas específicas, como: pegar, transportar, girar e posicionar peças de acordo com as necessidades da produção;
- **Módulo de Prensa (*Press* - M2)** - é um equipamento utilizado para realizar operações de prensagem, tais como: dobrar, cortar e formar peças metálicas ou plásticas. Ele é composto por uma estrutura metálica e por um cilindro hidráulico que força a prensa a realizar a operação desejada;

- **Módulo Tampador (*Pick and Place* - M3)** - é um sistema de manipulação automatizado que é capaz de pegar objetos e colocá-los em outros locais. O sistema é capaz de detectar e localizar os objetos, planejar rotas de movimento e controlar a precisão da manipulação, tudo isso de maneira autônoma. Ele é comumente utilizado em aplicações de produção em que é necessário mover objetos de um lugar para outro, de maneira rápida e precisa, ou para completar ou tampar peças ou recipientes;
- **Módulo do Braço robótico (*Robot* - M4)** - é um sistema de manipulação automatizado que pode ser usado para realizar tarefas de manipulação, como: pegar, mover e colocar objetos. Ele pode ser controlado por um computador ou um dispositivo de controle local/remoto e é capaz de se mover, de forma precisa e repetitiva, para realizar tarefas específicas;
- **Módulo de armazenagem (*Storage* - M5)** - é um módulo para o armazenamento automatizado de produtos ou componentes em uma linha de produção. Pode ser usado para simular o armazenamento de peças ou produtos em uma fábrica inteligente. E, apesar de ser estático, ele é projetado para ser flexível e escalável, permitindo que o sistema seja facilmente adaptado a demandas do processo, sempre com o auxílio de um manipulador robótico.

Ademais, os módulos podem ser integrados a outros sistemas de automação e produção, como: sistemas de gerenciamento e sistemas de visualização, para fornecer uma visão mais completa do processo produtivo. O módulo prensa, por exemplo, também pode ser equipado com uma série de dispositivos de segurança, como: dispositivos de proteção contra sobrecarga e dispositivos contra choques elétricos, para garantir a segurança dos operadores durante o uso.

Em resumo, o módulo *robot* da plataforma MPS pode ser programado para realizar uma ampla variedade de tarefas, como: montagem, embalagem e paletização. Ele pode, ainda, ser usado em uma ampla variedade de aplicações industriais, como: manufatura, logística, transporte e outras. Os produtos ou componentes são armazenados em M5 e podem ser retirados ou adicionados ao sistema de armazenamento automaticamente, usando dispositivos de manuseio como braços robóticos ou mesas elevadoras.

5.1.2 *Software*

O CODESYS é um *software* de programação de automação utilizado na planta MPS da Festo. Nele são realizadas programação dos controladores do sistema e a configuração das interfaces de comunicação. Ele permite ao usuário criar, testar e implementar programas de controle para os módulos da plataforma MPS, como os módulos *Handling, Press, Pick and Place, Robot e Storage*.

São disponibilizadas ferramentas de diagnóstico e monitoramento, que permitem identificar e solucionar problemas no sistema de produção. O CODESYS é baseado na linguagem de programação estruturada IEC 61131-3, o que torna mais fácil para os usuários criarem programas de controle que sejam legíveis e fáceis de manter. Ele também possui uma interface de usuário intuitiva.

É compatível com a maioria dos dispositivos de automação, incluindo controladores lógicos programáveis (CLPs), I/Os, motores e servo drives, o que permite a integração de diferentes dispositivos em um único sistema de automação.

O CIROS é outro *software* utilizado no sistema, ele é uma ferramenta de simulação de robótica, desenvolvido pela KUKA, uma empresa alemã de robótica industrial. O *software* permite que os usuários projetem, programem e simulem sistemas de robôs industriais em um ambiente virtual antes de implementá-los na vida real. Ele também permite que os usuários testem diferentes cenários e configurações para otimizar o desempenho e a eficiência do sistema de robôs.

5.2 Aplicação do *retrofit* na plataforma MPS

Primordialmente, o uso de sensores e outros dispositivos de monitoramento para coletar dados sobre o sistema físico permite aos usuários detectar possíveis problemas precocemente e realizar reparos proativos, reduzindo o tempo de inatividade e prolongando a vida útil do sistema.

Por conseguinte, a modernização de um sistema legado é uma solução eficaz para atualizar e modernizar sistemas mais antigos. A metodologia apresentada na seção 4.2 pode ser aplicada para modernizar um ou mais módulos da plataforma MPS, pois detalha a implementação de cada etapa de forma clara e objetiva e as atividades necessárias para o desenvolvimento e aplicação no estudo de caso.

Além disso, a tecnologia de gêmeo digital pode ser aplicada também como uma metodologia para modernização. Ao criar um gêmeo digital de um sistema legado, os engenheiros podem simular e testar diferentes opções de modernização, permitindo otimizar o processo e garantir que a nova tecnologia funcionará perfeitamente com o sistema existente.

Certamente, após realizar os testes e a validação, o sistema atualizado deve ser implementado e colocado em operação, levando em consideração as características e particularidades do sistema, os objetivos da modernização, os riscos e impactos, entre outros aspectos. A manutenção adequada e o suporte ao sistema atualizado garantem seu correto funcionamento e disponibilidade.

Em resumo, o *retrofit* da plataforma MPS inclui a atualização de *software*, *hardware*, além da adição de novos componentes, como: sensores, dispositivos IoT e sistemas ou dispositivos inteligentes, para melhorar a funcionalidade do sistema. Também pode incluir a substituição de componentes antigos por novos, mais recentes, para melhorar o desempenho e segurança.

5.2.1 Atualização para *CANopen* e OPC-UA

Na etapa de aplicação, é apresentada a atualização do procedimento de comunicação entre a plataforma (entre módulos), a interface (Painel de comando) e com a nuvem (*Dashboard*) que corresponde à comunicação horizontal e vertical da proposta. Na indústria, existe a padronização para comunicação, proporcionada por meio de protocolos de comunicação, utilizados para essa integração (vertical e horizontal) entre dispositivos, e em ambiente industrial.

A utilização de protocolos permite a troca de informações entre camadas (vertical) e entre dispositivos (horizontal) do mesmo ou de diferentes fabricantes e modelos, possibilitando a criação de sistemas integrados e interoperáveis. A integração acontece desde o chão de fábrica até a aplicação (supervisório, *dashboard*) para integração de equipamentos e sistemas de automação.

Com efeito, os protocolos utilizados são o *CANopen* para integração horizontal de dispositivos e o OPC-UA para integração vertical do sistema. O *CANopen* é adequado para a comunicação entre dispositivos em uma rede de chão de fábrica, enquanto o OPC-UA é uma opção mais adequada para comunicação em um nível de sistema, permitindo a troca de informações entre diferentes camadas e dispositivos em todo o processo. A

Figura 5.2 é um diagrama que ilustra, de forma simplificada, o sistema físico e virtual e a comunicação horizontal e vertical que acontece no sistema.

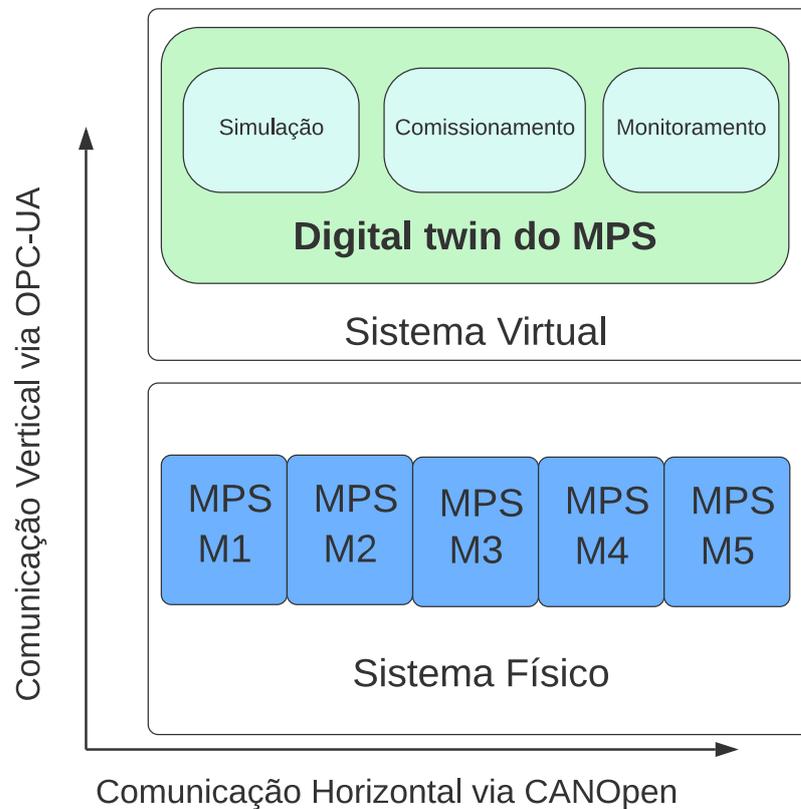


Figura 5.2: Comunicação vertical e horizontal

Como se vê na Figura 5.2, na comunicação horizontal, a utilização do protocolo de rede *CANopen* realiza a comunicação entre os módulos do MPS e o controlador principal, que gerencia todo o processo produtivo. O objetivo é que pelo menos um dos módulo seja equipado com um microcontrolador, que suporta o protocolo *CANopen*, para realizar o controle de funções específicas e comunicar com os demais módulo e dispositivos (sensores, atuadores, controladores e sistemas de gerenciamento).

A comunicação entre os módulos é realizada por meio de mensagens *CAN* (*Controller Area Network*), que são transmitidas via barramento CAN. Cada mensagem CAN contém um identificador único, que permite que o controlador principal identifique o módulo que a enviou e o tipo de mensagem que está sendo transmitida.

Na comunicação vertical, o protocolo de comunicação OPC-UA foi usado para integrar as camadas da arquitetura *Digital twin* proposta. A ideia é usar o protocolo para transferir dados entre os sistemas e para permitir que eles sejam controlados a partir de um modelo

de gêmeo digital, uma vez que, o protocolo permite a transferência de dados em tempo real e pode fornecer informações de diagnóstico detalhadas sobre o estado dos sistemas integrados.

Além disso, o OPC-UA é um protocolo de comunicação que pode ser utilizado para conectar sistemas heterogêneos em uma arquitetura de Indústria 4.0. Sua utilização proporciona a conexão de sistemas de diferentes fabricantes e com diferentes tecnologias de comunicação de forma padronizada e segura.

Ademais, a comunicação horizontal, utilizando o *CANopen*, é geralmente mais rápida e direta, com baixa latência e tempo de resposta rápido. Já a comunicação vertical, utilizando o OPC-UA, permite uma comunicação mais aberta e segura entre sistemas de diferentes fabricantes, porém com um tempo de resposta potencialmente mais lento devido a complexidade do protocolo e a necessidade de autenticação e segurança.

Pode-se, ainda, utilizar o protocolo OPC-UA para realizar o monitoramento *web*, o qual é uma tecnologia que permite aos usuários acessarem e monitorarem sistemas e dispositivos remotamente, por meio de uma conexão de internet. No contexto da plataforma MPS, o monitoramento *web* é uma funcionalidade que permite que os usuários monitorem e gerenciem seus sistemas de automação industrial através de um navegador *web*.

Foi implementado também um banco MySQL, que é um sistema de gerenciamento de banco de dados (DBMS), que utiliza a linguagem SQL (*Structured Query Language*), para armazenar, organizar e recuperar dados. Ele é amplamente utilizado em aplicações *web* e pode ser integrado a diversas linguagens de programação, incluindo PHP, Java, C++ e C.

Com efeito, na plataforma MPS, o MySQL pode ser usado para armazenar e gerenciar os dados de processo e de produção, permitindo que a aplicação acesse e manipule esses dados de forma rápida e eficiente. Ele pode ser configurado para trabalhar em conjunto com os módulos da plataforma, para coletar e armazenar dados em tempo real, permitindo a análise e otimização do processo produtivo.

Outro adicional é o *software SQL4Automation basic*, que é um componente da plataforma de automação da Festo, projetado para fornecer funcionalidades de banco de dados a sistemas de automação. Ele é compatível com o banco de dados Oracle MySQL e permite a integração de dados de diferentes fontes, como sistemas de automação, sensores, atuadores e outros componentes de *hardware*.

O MySQL e *SQL4Automation basic* oferecem ferramentas para a visualização, análise e gerenciamento de dados, permitindo monitorar o funcionamento do sistema (local ou via *web*) e tomar decisões baseadas em dados precisos. Eles também podem ser integrados com outros sistemas de automação, como o CODESYS, permitindo a interconexão de diferentes componentes e sistemas.

O CLP será entregue com a lógica de comandos SQL, que é usada para interagir com um banco de dados SQL e realizar operações como consultar, inserir, atualizar e excluir dados. Por conseguinte, a lógica de comandos SQL é importante para a plataforma MPS, porque permite que se acesse e gerencie os dados armazenados no banco de dados do sistema de maneira eficiente e precisa.

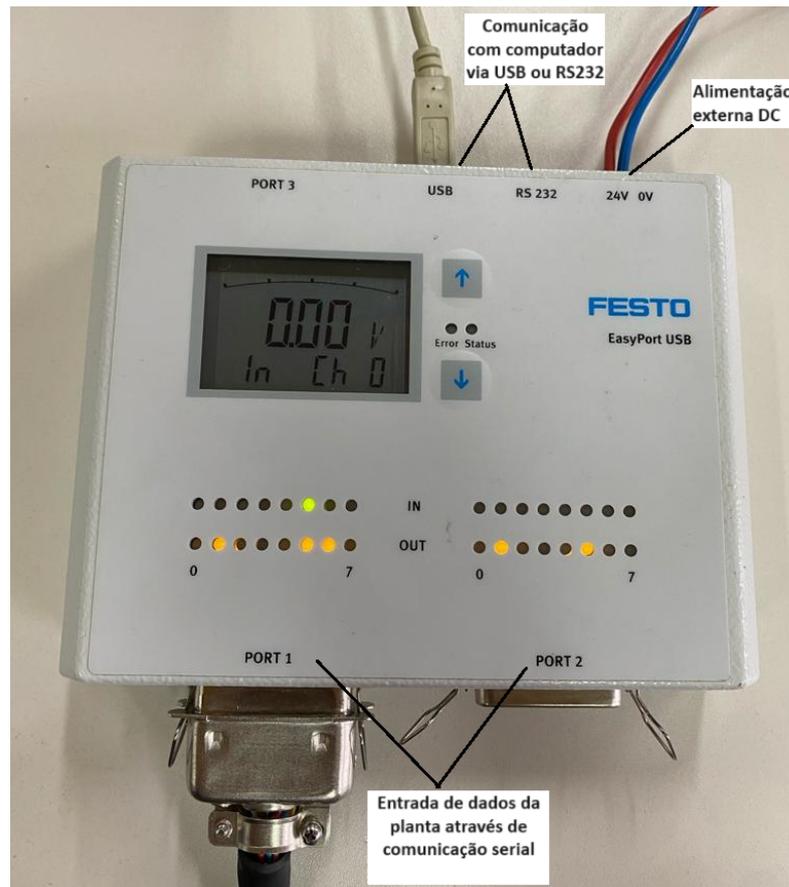
Em síntese, o sistema será entregue em funcionamento de acordo com as estações de trabalho existentes na linha de produção, permitindo gerenciar minimamente as seguintes condições: quantidade de peças produzidas, tipo de peça produzida, data e hora de cada peça produzida e *status* de operação da estação de trabalho, isso tanto quando o sistema estiver em funcionamento ou quando o sistema estiver parado, indicando data e hora de cada operação.

5.2.2 Integração usando *EasyPort*

O *EasyPort* USB da Festo é uma interface de conexão que permite a integração rápida e fácil de componentes Festo em sistemas de automação e é mostrado na Figura 5.3. Ele funciona como um adaptador que conecta os componentes a uma variedade de interfaces eletrônicas, incluindo *Ethernet*, USB, *CANopen* e *Profibus*.

Esse dispositivo permite o monitoramento e o controle preciso de componentes diversos, em tempo real, por meio de um sistema de controle externo. É usado para coletar dados de dispositivos de automação e exportá-los para análise posterior. Ele também pode ser usado para criar relatórios e visualizar históricos de dados. Ele pode, ainda, ser usado em conjunto com outras ferramentas de automação, como controladores e *softwares* de automação, para automatizar processos e melhorar a eficiência dos sistemas.

Com o *EasyPort* é possível conectar vários dispositivos ao mesmo tempo e monitorar e controlar o estado deles a partir de um único ponto de acesso. Isso permite uma melhor visibilidade e diagnóstico do sistema, assim como aumenta a eficiência da automação. O modelo mais recente do *EasyPort*, geralmente vai depender das necessidades do projeto,

Figura 5.3: *EasyPort*

mas a Festo costuma lançar novas versões com melhorias técnicas e recursos adicionais.

A plataforma MPS e o *EasyPort* serão agregados e projetados para trabalhar em sintonia, oferecendo uma solução integrada e flexível para a etapa do desenvolvimento e implementação do *Digital Twin* do processo. A Figura 5.4 apresenta a estrutura que será adotada na comunicação entre a plataforma MPS e a aplicação do *Digital Twin*. O elo que integra o *EasyPort* e o *CIROS Education* é uma aplicação usada para comunicação OPC nativo da Festo chamado EzOPC. Ele é usado para conectar dispositivos e sistemas de automação industrial e permitir a transferência de dados entre eles.

O EzOPC proporciona a integração de funcionalidades, tais como: comunicação de dispositivos, transferência de dados, configuração de comunicação, monitoramento em tempo real, registro de dados e integração com outros sistemas.

Quanto ao *EasyPort*, ele será o *gateway* responsável principalmente pelo portal de conexão entre o sistema e por utilizar diversos padrões de protocolos; pode ser usado para integrar dispositivos de entrada/saída, sensores, atuadores e outros equipamentos a um sistema de automação.

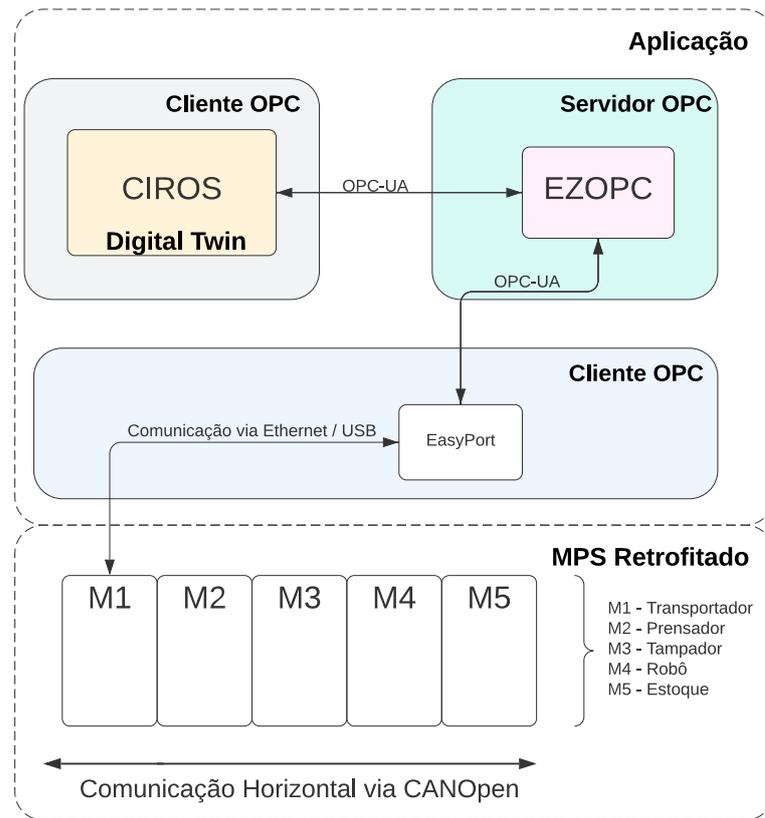


Figura 5.4: Comunicação *EasyPort*

5.3 Estimativa de Investimento

Para consolidar esta etapa, foi realizada a avaliação e vistoria na plataforma MPS, com a finalidade de identificar componentes do sistema, que podem ser mantidos e integrados ao novo sistema; componentes compatíveis com as novas tecnologias e se são capazes de atender às necessidades mensuradas. Após esta etapa, alguns componentes do sistema, que não são compatíveis, foram identificados. O passo seguinte, foi avaliar o custo e o impacto da substituição dos componentes no orçamento do projeto.

Inicialmente, foi executado o serviço de manutenção corretiva e preventiva que inclui a limpeza e readequação das estações, promovendo as trocas das mangueiras e conexões, dentre outras atividades, sendo que esta etapa é fundamental para recuperação do sistema.

A etapa seguinte foi para integrar os novos componentes, considerando a compatibilidade e a interconexão entre eles, de forma a ter uma prévia do tempo e os recursos necessários para a integração dos componentes. Assim, a atualização proporciona que a produção esteja ocorrendo de maneira eficiente, reduzindo o tempo e maximizando a utilização dos recursos. Além de estar conectada, tem-se a proposta de coleta e análise

de dados de produção para identificar oportunidades de otimização e melhoria contínua. Funcionalidades que não estavam disponíveis no modelo anterior.

Com base nisso, foi possível elaborar uma proposta de investimento para a atualização da plataforma MPS, que leve em consideração as etapas acima descritas. Esse plano de investimento inclui o orçamento, o plano de ação e o cronograma de implementação. A Tabela 5.1 mostra o resumo dos investimentos e a comparação dos custos entre a aplicação do *retrofit* no MPS (atualização da planta didática MPS festo) e com a aquisição de uma nova planta denominada CP Lab.

A CP Lab é uma estação de treinamento modular semelhante a MPS; ambas são produtos Festo voltados para a educação e treinamento em automação industrial. A grande diferença é que a MPS é um produto lançado alguns anos antes do CP Lab.

Por certo, a estação da CP Lab é composta, de forma semelhante, por um conjunto de módulos que podem ser combinados, permitindo simular sistemas de produção automatizados. Os módulos incluem componentes como válvulas pneumáticas, sensores, atuadores, painéis de controle, controladores lógicos programáveis (PLCs), dispositivos de entrada e saída, entre outros.

Em suma, a grande vantagem é que esta plataforma CP Lab já vem integrada no contexto da Indústria 4.0 e o MPS não, necessitando assim de atualização. Portanto, levando em consideração que o custo de aquisição de um novo sistema é bem elevado, a proposta do *retrofit* do MPS é bem mais interessante e economicamente viável.

Tabela 5.1: Comparativo entre o *retrofit* da plataforma MPS e aquisição da plataforma CP Lab

Orçamento para <i>retrofit</i> da plataforma MPS	
Qnt	Descrição
1	Atualização Módulo Transportador
1	Atualização Módulo de Prensagem
1	Atualização Módulo Tampagem
3	Troca dos CLP's para CPU CPX-CEC-C1-V3
1	Switch de rede de 08 portas TP Link
1	Interface Syslink I/O link
5	Adaptador I/O Link / CANOPEN
1	Serviços de instalação e treinamento
1	Serviço de manutenção preventiva
1	Manutenção preventiva no Módulo Robô
2	Dispositivo de interface EasyPort USB
20	Licenças Sistema de gerenciamento e execução da produção (MES)
Subtotal = R\$ 100 000,00	
Orçamento para a aquisição da plataforma - CP Lab	
1	Módulo de descarregamento de peça / armazenamento
1	Módulo de depósito / carregamento de peças base
1	Módulo de medição
1	Módulo de perfuração / usinagem
1	Módulo de depósito / carregamento tampa base
1	Módulo de prensagem
6	Painel touchscreen para a operação do CP Lab
6	Módulo básico funcional com painel de comando e transportador para deslocamento de peças em pallets
1	Servidor MES
1	Serviços de instalação e treinamento
15	Licenças Sistema de gerenciamento e execução da produção (MES)
Subtotal = R\$ 1.700 000,00	

Capítulo 6

Resultados do desenvolvimento do *Digital Twin* e *roadmap* da aplicação

Ao avaliar os resultados após a aplicação da metodologia *retrofit* na plataforma MPS, foi constatado que a plataforma era composta por componentes e tecnologias obsoletas, que já haviam sido substituídas por opções mais modernas. Isso justificou a classificação da plataforma como um sistema legado. Apesar dessas limitações, a planta demonstrou ser um sistema flexível e modular, permitindo a integração de novas tecnologias e componentes.

O *retrofit* da plataforma MPS envolveu a atualização do sistema legado através da incorporação de tecnologias atuais da Indústria 4.0. O procedimento metodológico para atualização, conforme descrito na seção 4.2, foi implementado com sucesso. Cada etapa e seus respectivos resultados são apresentados ao longo deste capítulo. Os resultados incluem a atualização e substituição de sensores e dispositivos, visando obter melhorias significativas em eficiência, produtividade, vida útil do sistema, segurança e qualidade do produto.

O objetivo principal deste projeto foi a implementação de um Digital Twin para a plataforma MPS, utilizando o *retrofit* como um meio necessário para alcançar essa meta. A arquitetura de *Digital Twin* proporcionou funcionalidades avançadas, como monitoramento em tempo real, simulação de cenários, e análise preditiva. Essas funcionalidades são fundamentais para a supervisão constante e a melhoria contínua do sistema, permitindo intervenções proativas e melhorando a eficiência operacional, a produtividade, e a qualidade dos produtos finais.

Portanto, o *retrofit* não foi apenas uma atualização tecnológica, mas um passo estratégico para habilitar o *Digital Twin*, que agora desempenha um papel central na operação e gerenciamento da plataforma MPS. Este projeto demonstra como o *retrofit* pode ser utilizado eficazmente para transformar sistemas legados em ativos digitais avançados, prontos para interagir com as demandas da Indústria 4.0. A implementação bem-sucedida do DT, com suas funcionalidades robustas, confirma a eficácia da metodologia aplicada em modernizar e otimizar a plataforma MPS.

6.1 Etapa 1 - Levantamento e limitações de funcionamento da Planta

A planta MPS Festo foi adquirida em 2011 e acabou por sofrer degradação de componentes, descalibração de sensores, defeitos ou falhas em atuadores e demais componentes devido provavelmente a ação do tempo. Um agravante é que o sistema ficou parado durante um período de tempo prolongado, sem as suas devidas manutenções e esse fato levou a uma deterioração ainda maior.

Os módulos Transportador (M1), Prensa (M2) e Tampador (M3) são mostrados na Figura 6.1 e apresentam as seguintes características:



Figura 6.1: Módulo transportador, Prensa e Tampador

- **Módulo Transportador (*Handling* - M1)** - o sensor óptico da garra não está fixado adequadamente, a fibra óptica e mangueiras pneumáticas estão deterioradas ou quebradas; alguns cabos elétricos desconectados; atuador pneumático de entrada descalibrado; servomotor está funcional, porém, o seu *driver* de controle está com a montagem elétrica parcial, ocasionando o não acionando do transportador;

O controlador deste módulo CLP CPX-FEC está funcional, mesmo com o seu painel de comando da estação não estando conectado. Os demais componentes elétricos estão em bom estado. Dessa forma, os principais requisitos e limitações foram identificados, e as atividades e modificações necessárias para a atualização adequada do módulo, para o contexto da I4.0, foram identificadas de forma a compor os objetivos.

- **Módulo de Prensa (*Press* - M2)** - as mangueiras pneumáticas deterioradas, o atuador pneumático da esteira está descalibrado, o pistão da prensa desalinhado e o atuador pneumático da prensa descalibrado. Porém, sensores, controlador e demais componentes elétricos estão em bom estado;
- **Módulo Tampador (*Pick and Place* - M3)** - como mostrado na Figura 6.2 as mangueiras pneumáticas estão deterioradas e alguns cabos elétricos desconectados; uma esteira funcional e a outra com a lona rasgada; o *driver* de controle das esteiras funcionais; os sensores de posicionamento estão desalinhados;

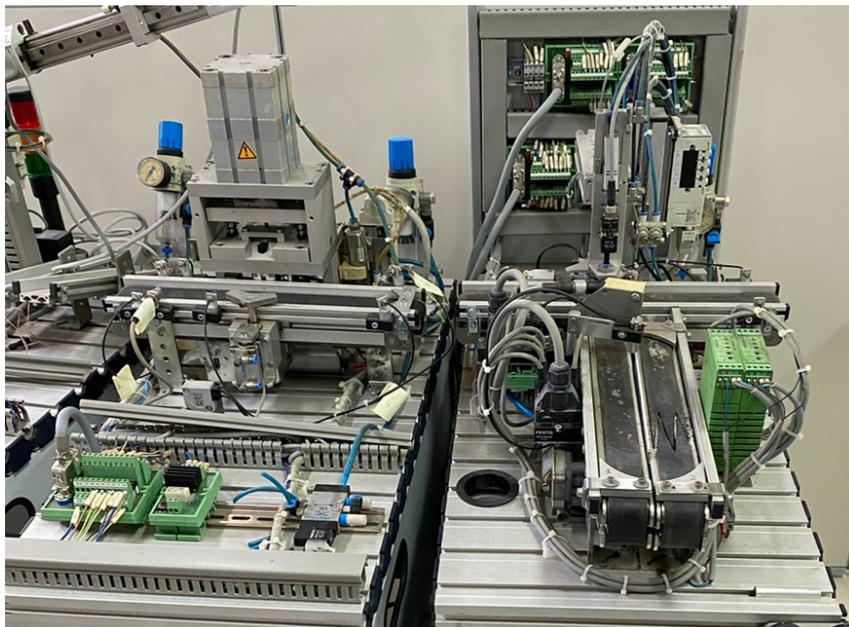


Figura 6.2: Esteira e outros componentes deteriorados

Quanto aos sensores, estão funcionando corretamente. O controlador CLP CPX-FEC também está funcional; no entanto, foi identificada a ausência de painel de comando. Os demais componentes como a ventosa e o atuador pneumático do eixo Z estão desgastados; porém, componentes como atuadores e válvulas estão em bom estado e sem vazamentos. A situação física deste módulo é mais complicada, se comparada com os demais. Vários componentes precisam ser substituídos ou reinstalados, para assim, alcançar a atualização adequada no contexto da I4.0.

- **Módulo do Braço robótico (*Robot - M4*)** - integra a plataforma com o estoque, mostrado na Figura 6.3. Este não está funcional e perdeu o ponto de origem. Devido ao sistema ter ficado muito tempo desligado, as mangueiras estão deterioradas e observou-se que alguns cabos elétricos estão desconectados. Os eixos do braço precisam ser lubrificados, e os pontos de estado de repouso e estado inicial, recalibrados.



Figura 6.3: Braço Robótico e Estoque

Igualmente, após breve teste, observou-se que o controlador do robô liga, mas não inicializa. O visor do controlador não acende e no *Teach Pendant*, apenas o aviso de inicialização é sinalizado com um código de erro na tela. Existe, ainda, um módulo de Armazenagem de peças (M5), que serve para alocar os recipientes finalizados e/ou descartados no processo da plataforma MPS, que está em bom estado.

- Funcionamento detalhado da plataforma MPS

O funcionamento do sistema segue um *script* simples e pode ser representado por meio do diagrama de blocos, conforme apresenta a Figura 6.4, que mostra a interação entre os diferentes módulos e os sinais de entrada e saída de cada um deles.

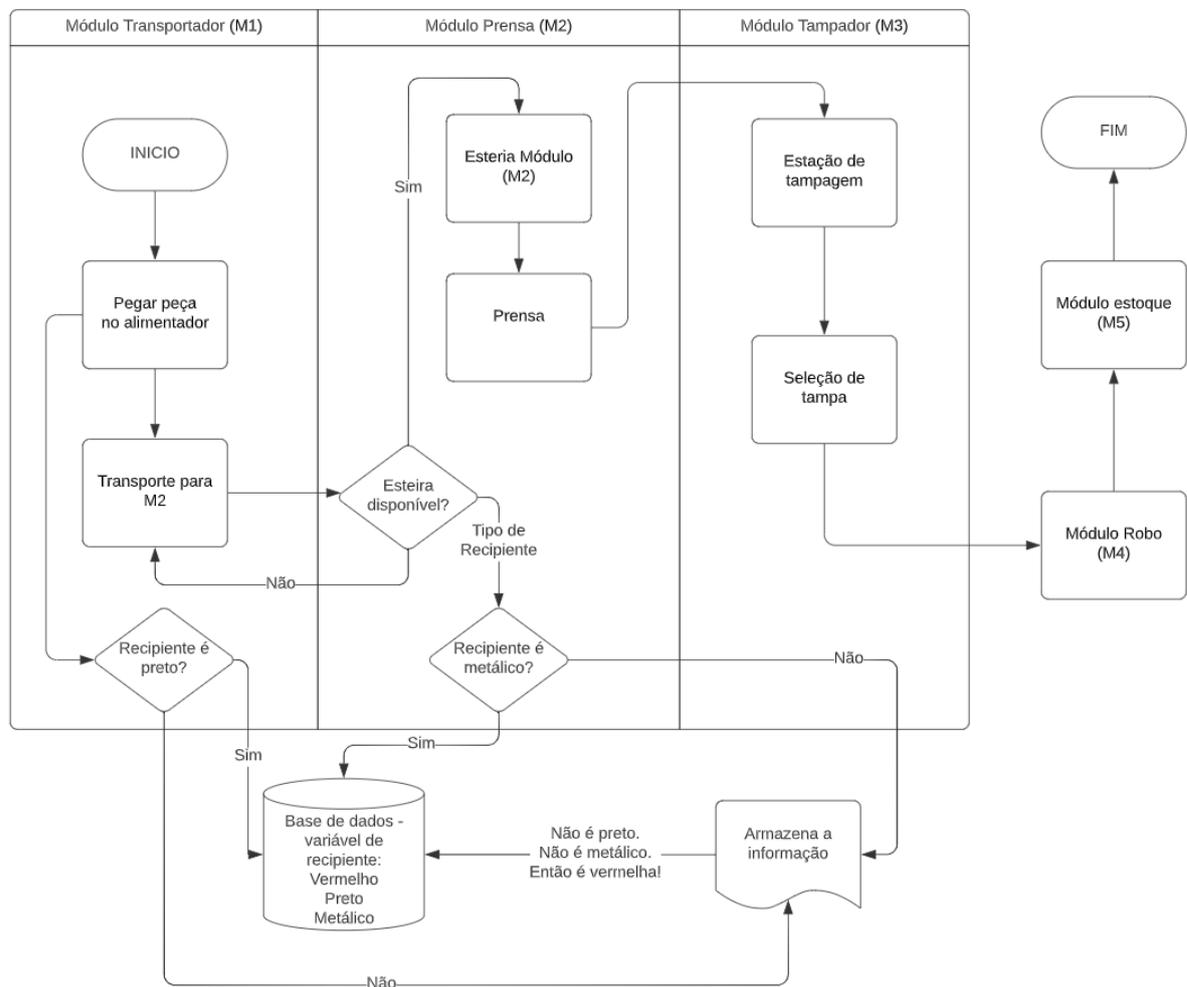


Figura 6.4: Diagrama de funcionamento

Na entrada do sistema, podem ter os seguintes recipientes: vermelho, preto ou metálico. No decorrer do processo, de acordo com o *script* de produção, são alocados uma ou mais moedas (recursos) nos recipientes. Os recursos podem ou não ser processados (furados). Por exemplo: no recipiente vermelho, colocam-se duas moedas; no metálico, uma mo-

eda perfurada; e no preto, não se coloca nenhuma moeda. Portanto, os recipientes que importam no processo são o vermelho e o metálico; o preto será enviado para o descarte.

Em **M1**, os recipientes são inseridos de forma aleatória um a um, no local de espera, onde uma garra pega e verifica se é preta. Se for, envia para a área de descarte; caso contrário, transporta e deposita na esteira do módulo seguinte. Essa informação da cor é armazenada em uma variável e enviada para a rede.

Em **M2**, tem-se um sensor indutivo, logo no início da esteira, que verifica se o recipiente é metálico. Essa informação é atualizada na variável e define qual o tipo de recipiente, se é vermelho ou metálico. Como este é o módulo de prensa, de acordo com o *script*, são alocados recursos e este segue para o módulo seguinte.

Em **M3**, o módulo é de tampagem dos recipientes. Como a informação do tipo de recipiente está definida, um sensor identifica a cor correspondente da tampa. Em seguida, uma ventosa pega esta tampa, fecha o recipiente, e a envia para o ponto de espera, conectado com o módulo a seguir.

Em **M4**, tem-se o braço robótico, que é acionado pelo sensor de presença no ponto final de M3. A garra pega o reservatório, já tampado, e aloca na plataforma ou no ponto de descarte deste módulo. O robô é treinado para pegar os recipientes e colocá-los, de forma sequencial, nas posições previamente mapeadas.

Em **M5**, tem-se uma plataforma, que funciona como um estoque para os recipientes do processo. Esta plataforma tem seis posições, divididas em duas linhas e três colunas. Ao terminar as posições disponíveis, uma solução possível para o *script* de produção é alocar as novas demandas para o setor de descarte deste módulo.

Em síntese, como a plataforma é didática, ela incorpora a utilização do *hardware* (em particular o CLP) e *software* como parte de simulação de um processo industrial. O resultado é uma experiência completa que envolve teoria, exercícios práticos e materiais de apoio para ajudar a compreender os conceitos e aplicá-los em projetos reais.

6.2 Etapa 2 - Definição dos objetivos

A aplicação da metodologia *retrofit*, na plataforma MPS, busca reformar, atualizar e integrar o sistema a outros dispositivos, de forma que atinja o contexto da I4.0, mais especificamente, no que diz respeito ao *Digital Twin*, o que proporcionará uma excelente

aplicabilidade em meio acadêmico, por meio de conceitos inerentes à I4.0. Isso possibilita simulação e desenvolvimento de novas e atuais propostas de funcionamento, melhorias e ajustes na estrutura do processo e comissionamento de todas as etapas.

A substituição de componentes físicos, de conectores elétricos e pneumáticos e a atualização das tecnologias defasadas fazem parte do escopo principal da atualização do *hardware* da plataforma MPS. Seguem, em detalhes, alguns objetivos:

1. limpeza e higienização dos módulos e componentes;
2. organização dos conectores elétricos;
3. substituição de todas as mangueiras pneumáticas;
4. alinhamento mecânico das esteiras de todos os módulos;
5. calibração e testes dos atuadores pneumáticos dos módulos;
6. substituição dos controladores dos módulos por um atual;
7. substituição e instalação da fibra do sensor óptico em M1;
8. instalação de motor e seu respectivo *driver* em M1;
9. instalação de nova proteção de acrílico em M2;
10. lubrificação e calibração do atuador pneumático que insere as moedas em M2;
11. troca do embolo da ventosa de sucção das tampas em M3;
12. substituição das cintas das esteiras em M3;
13. instalação do painel de controle físico do modulo em M3.

6.3 Etapa 3 - Seleção de componentes e tecnologias a serem atualizados

Na etapa de seleção dos componentes e atualização de *hardware* e *software*, da plataforma MPS, os resultados incluem facilidade de uso, possibilidade de configuração e

adição de novas funcionalidades, e correção de eventuais problemas de processo, via monitoramento *web*. A Figura 6.5 mostra o resultado do processo como um todo, aplicado na plataforma MPS.

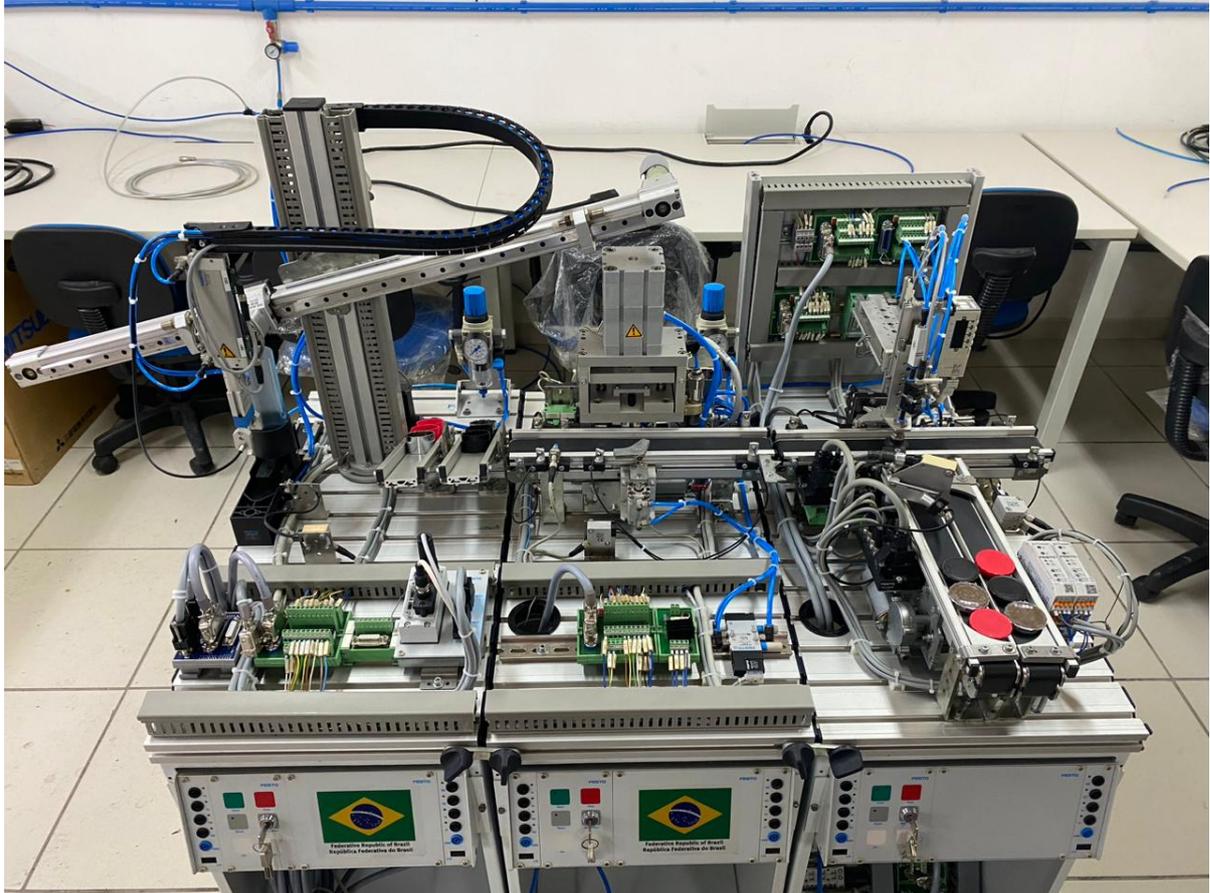


Figura 6.5: MPS atualizado - Módulos M1, M2 e M3

Quanto a atualização de hardware, tem-se a instalação do novo controlador CPX-CEC-C1-V3, mostrado na Figura 6.6, que é projetado para a automação de sistemas de processo. Ele é um dispositivo compacto, de alto desempenho, que combina funções de automação, comunicação e interface homem-máquina, em um único pacote. Por ser baseado em um microprocessador de alta velocidade, ele possui uma variedade de interfaces de comunicação, incluindo *Ethernet*, *CANopen* e *USB*.

O controlador possui uma interface de usuário intuitiva, que permite configurar e monitorar facilmente os processos. Dessa forma, é capaz de controlar vários dispositivos de automação, como: atuadores, sensores e outros dispositivos, através de suas interfaces de comunicação. Ele também pode ser usado para monitorar o *status* dos dispositivos e para gerenciar alarmes e mensagens de erro. Por fim, ele possui ferramentas de programação, como IEC 61131-3, que permite aos usuários programar e modificar facilmente as funções

de automação do sistema.

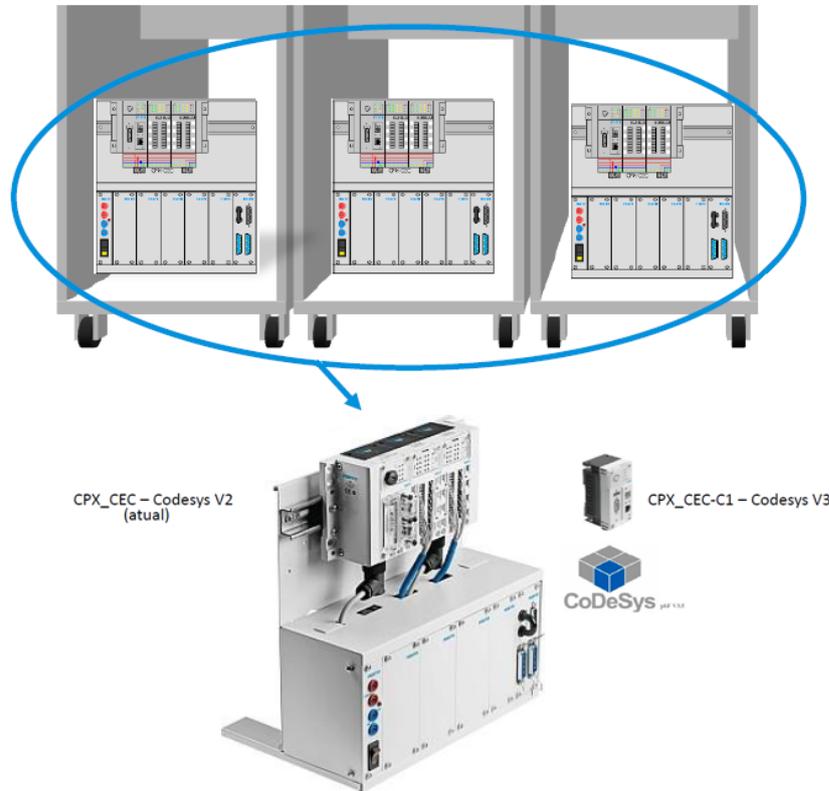


Figura 6.6: Atualização da CPU do módulo do CLP

A rede *CANopen*, implementada neste trabalho, mostrada na Figura 6.7, é uma rede de comunicação industrial baseada no protocolo *CAN* (*Controller Area Network*), que foi desenvolvida para atender às necessidades de comunicação em sistemas de automação industrial. Ela é projetada para ser uma rede de baixa velocidade e de baixa complexidade, que é fácil de implementar e de manter.

A rede *CANopen* permite o monitoramento e o controle, em tempo real, das operações da planta, bem como a configuração e programação dos diferentes dispositivos e módulos. Ela é uma opção segura e eficiente para garantir a comunicação entre os diferentes elementos da fábrica inteligente e permite a integração de diferentes tecnologias de automação.

Quanto a atualização de *software*, realiza-se o desenvolvimento via *CodeSys* V3.5, que é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), que permite a criação de aplicações para sistemas de automação, incluindo programação, depuração e teste. Ele é compatível com vários dispositivos e protocolos, incluindo o *CANopen*, e permite a integração de diferentes componentes de *hardware* e *software*.

O módulo atualizado já vem com a configuração de gerenciamento e execução da

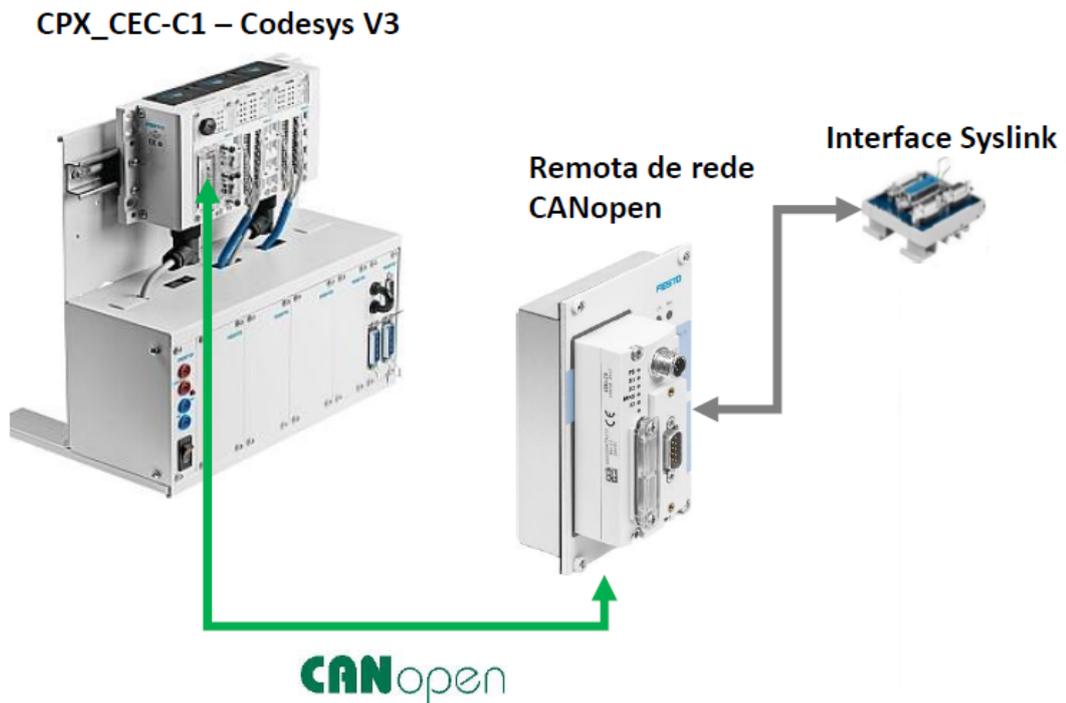


Figura 6.7: Módulo CANopen

produção (MES), que é um tipo de *software* que ajuda a gerenciar e controlar a produção. Ele pode ser usado para planejar a produção, programar máquinas e equipamentos, controlar o inventário de materiais e componentes, monitorar o progresso da produção e coletar dados para análise e otimização. No caso desta implementação, o MES pode ser usado para gerenciar a produção de componentes e equipamentos pneumáticos e hidráulicos, bem como a produção de sistemas de automação e soluções de movimentação.

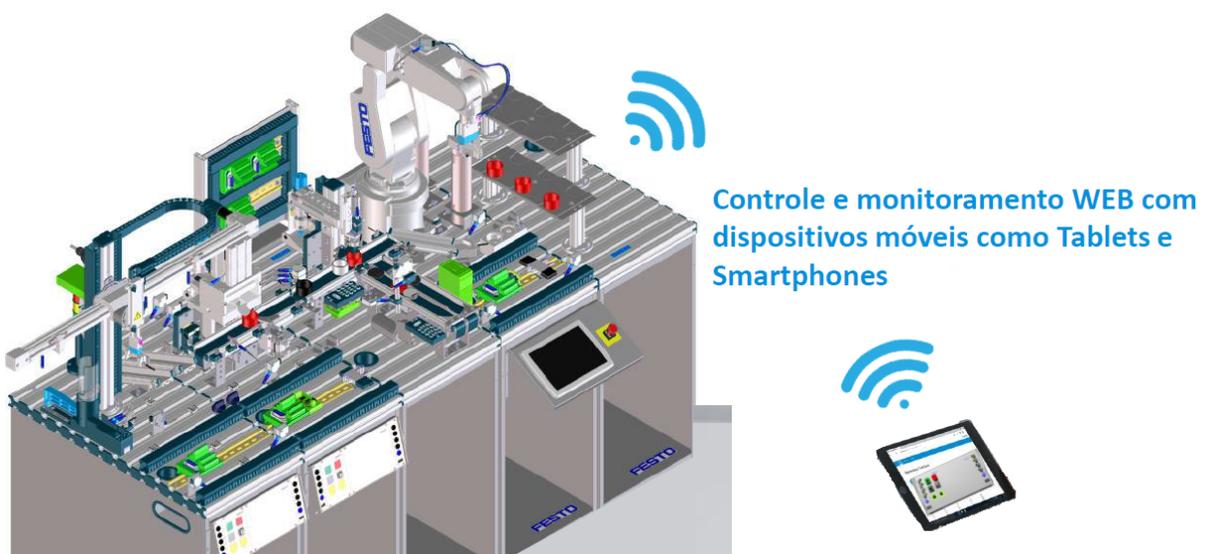


Figura 6.8: Monitoramento Web

Tem-se, ainda, a atualização quanto ao monitoramento *web* que é mostrado na Figura 6.8. Porquanto, o monitoramento *web* é uma ferramenta que permite a monitoração remota de sistemas e processos, permitindo a visualização e análise dos dados em tempo real, por meio de uma interface *web*. E isso pode ser útil para a manutenção e otimização de sistemas, bem como para a tomada de decisões baseadas em dados atuais.

Em suma, com o monitoramento *web*, os usuários podem visualizar informações em tempo real sobre a condição dos dispositivos, como: temperatura, pressão e níveis de carga, bem como configurar e controlar os dispositivos remotamente. Além de incluir funções como iniciar ou parar um processo, mudar configurações de dispositivos ou definir alarmes e limites de dados.

6.4 Etapa 4 - Integração de novos componentes e tecnologias

Nesta fase, ocorre a integração e o comissionamento dos novos componentes e tecnologias implementados. É verificado se eles estão devidamente integrados ao sistema, sendo validados por meio de testes de ativação, ciclo de operação e movimentação dos atuadores do processo. O próximo passo envolve a execução do *script* de produção e a avaliação das funcionalidades, com foco especial nos atuadores e sensores, além de testes de acabamento e inspeção.

É importante assegurar que os requisitos, inicialmente estabelecidos, tenham sido atendidos. Em caso contrário, é imperativo identificar e corrigir quaisquer problemas, o que pode implicar o retorno às etapas iniciais (Etapas 1 e 2) para repetir todo o procedimento. Após esses ajustes, é possível confirmar a conformidade da integração dos novos componentes e tecnologias, resultantes da aplicação do *retrofit* na plataforma MPS, garantindo, assim, que o sistema opere de maneira segura, eficiente e confiável.

Ainda nesta etapa, realiza-se a implementação do *Digital Twin*, no qual foi desenvolvida uma estratégia para utilização do *EasyPort* para conectar dispositivos à rede de computadores. Portanto, é uma interface que permite a comunicação entre os módulos da plataforma MPS e um computador via conexão USB, de forma que ele oferece uma ampla variedade de recursos para configurar e monitorar sensores e atuadores presentes no processo.

6.5 Etapa 5 - Teste e validação de novos componentes e tecnologias

A implementação do retrofit na plataforma MPS resultou em um sucesso notável na criação do *Digital Twin*, conforme ilustrado na Figura 6.9. Este processo foi essencial para atualizar a infraestrutura da plataforma, permitindo a integração de tecnologias modernas que suportam a funcionalidade avançada do DT.

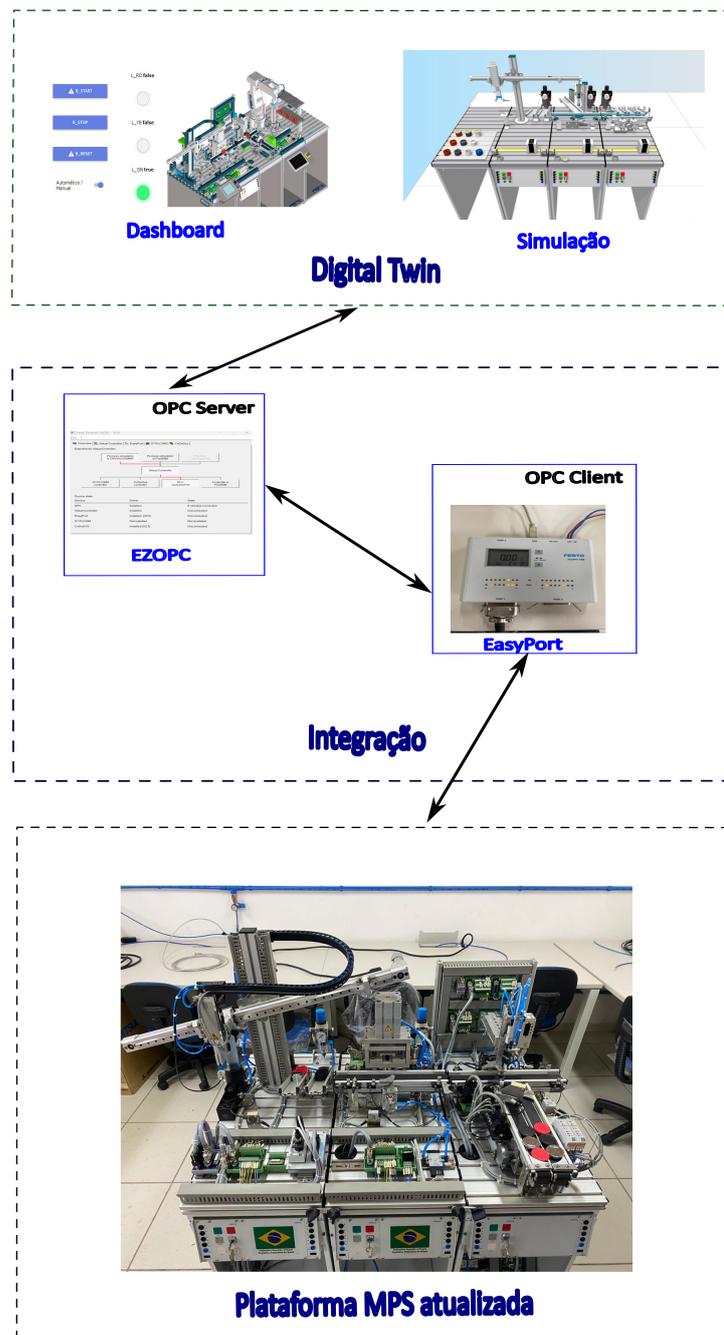


Figura 6.9: Resultado final obtido após a aplicação da metodologia *retrofit* visando ao *Digital Twin*

O diagrama final apresenta uma interface de usuário amigável, que facilita o monitoramento, configuração e controle dos processos no gêmeo físico. Durante os testes, o *Digital Twin* demonstrou uma precisão impressionante ao reproduzir o que estava acontecendo na plataforma física, incluindo a medição exata dos tempos de execução dos atuadores e a identificação de gargalos no processo, como o módulo de prensagem que demanda mais tempo que os demais módulos.

Em resumo, a principal funcionalidade do DT na plataforma MPS é a simulação e controle em tempo real dos processos. Esta capacidade permitiu interagir dinamicamente com o sistema, realizar paradas e reinícios de parâmetros, e conduzir estudos para avaliar o impacto de alterações testadas. Além disso, o DT provou ser uma ferramenta valiosa para prever estados indesejados, tornando o gerenciamento do sistema mais proativo e eficiente. Esses resultados destacam o sucesso do *retrofit* em alcançar um *Digital Twin* funcional e robusto, que não apenas moderniza a plataforma MPS, mas também otimiza seu desempenho operacional.

6.6 *Digital Twin* da plataforma MPS

A implementação do *Digital Twin* na plataforma MPS começou com uma atualização completa do hardware, por esse motivo foi implementada a metodologia do *retrofit*. Este passo foi importante para garantir que a comunicação entre os componentes físicos e virtuais fosse eficiente e confiável, de forma a preparar a plataforma MPS para a implementação do DT. A atualização incluiu a instalação de controladores modernos que monitoram e controlam os atuadores e sensores, todos equipados com tecnologias da Indústria 4.0, como IoT e CPS.

Os sensores e atuadores foram responsáveis por coletar dados essenciais do sistema. Esses dados são transmitidos através do *EasyPort*, que atua como um *gateway* fundamental e sua estrutura de comunicação e ligação física é mostrado na Figura 6.10. O *EasyPort* é compatível com uma ampla gama de produtos Festo, incluindo cilindros, válvulas, sensores e atuadores, e conecta um ou mais módulos da plataforma ao *CIROS Education*.

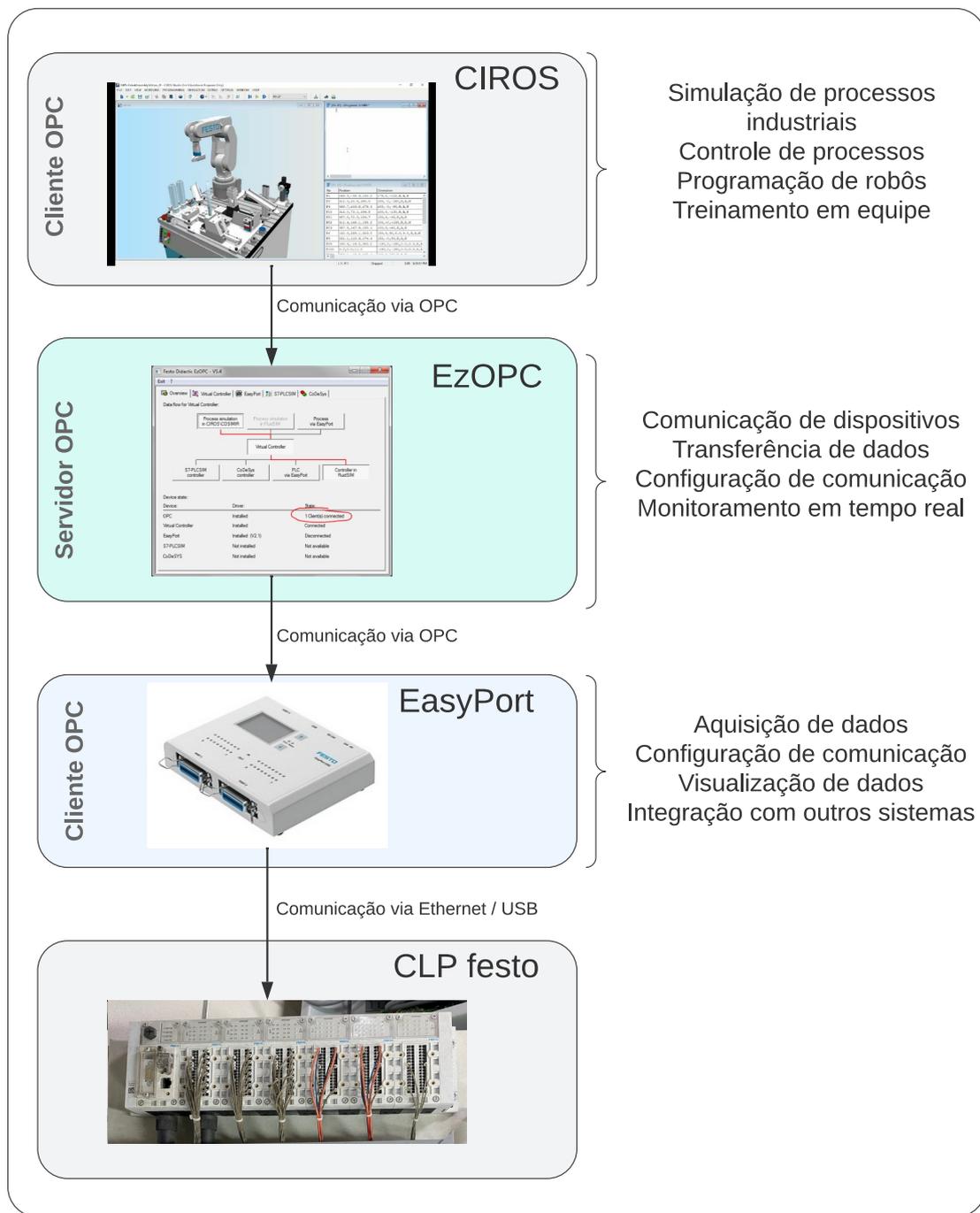


Figura 6.10: Comunicação e integração com o *Digital Twin*

O *CIROS Education* foi o software de simulação escolhido por ser um produto FESTO e também que suporta a implementação do *Digital Twin*. Ele oferece funcionalidades essenciais, como simulação em tempo real, controle dos processos, programação, aquisição e análise de dados da planta física, além de personalização do ambiente de simulação. Essas funcionalidades são fundamentais para garantir que o DT possa replicar e simular com precisão o processo físico da plataforma MPS.

A comunicação entre os sistemas físicos e virtuais é facilitada pelo EZOPC, um software que permite a comunicação e controle de componentes da Festo através de uma conexão OPC (OLE for Process Control). O EZOPC funciona como um servidor OPC, conectando os módulos da plataforma MPS a sistemas de controle externos, como PLCs ou SCADA. Neste caso, o CIROS atua como um cliente OPC, comunicando-se via protocolo OPC com o EZOPC, que também se conecta com o EasyPort, outro cliente OPC.

No CIROS, a implementação do gêmeo virtual da plataforma MPS, Figura 6.11, proporciona uma representação detalhada do funcionamento da plataforma. Esta representação virtual oferece recursos para monitoramento de dados em tempo real, registro de eventos e diagnóstico remoto. A configuração espelha precisamente o que ocorre na plataforma física, incluindo o estado dos sensores e atuadores e o status do processo.

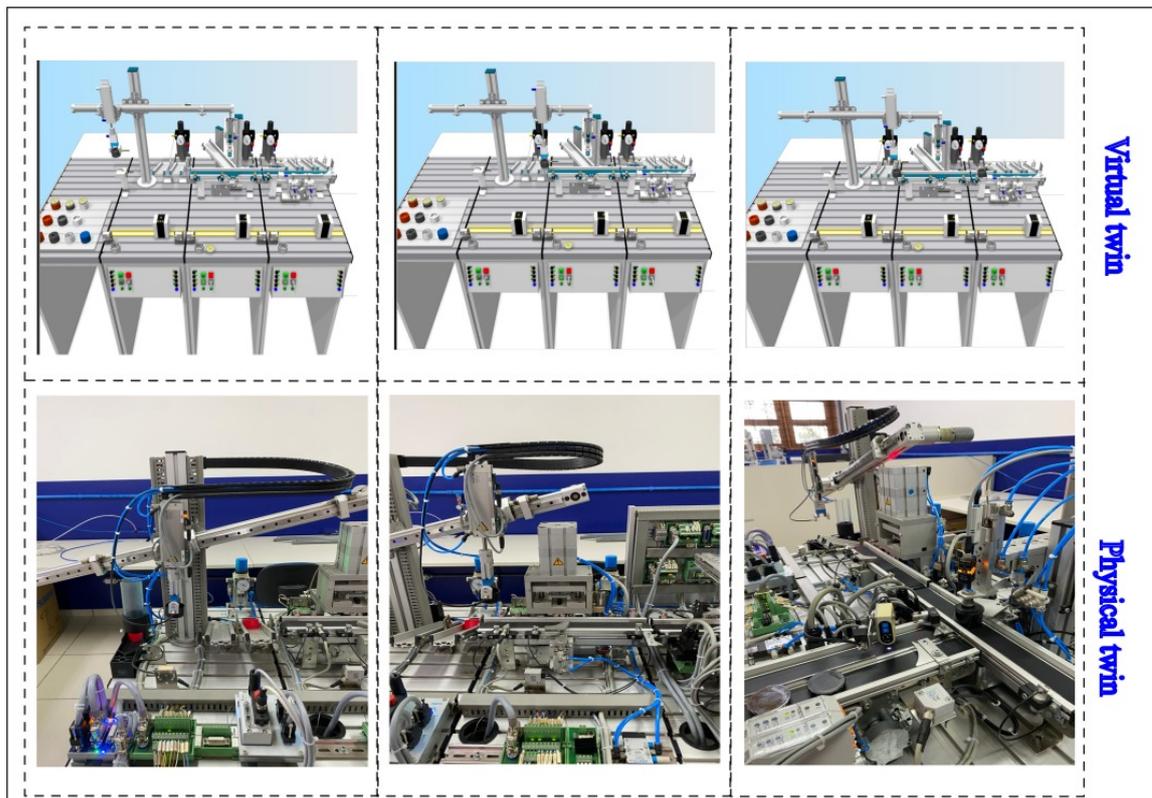


Figura 6.11: *Digital Twin* da plataforma MPS - sincronização gêmeo físico e virtual. Acessível no link: <https://drive.google.com/drive/folders/1o7QbwguQelfzMn2xN6GUocbem7AHTvlt>

A implementação do *Digital Twin* na plataforma MPS assegura que a configuração virtual reflita com precisão as operações da plataforma física. Isso garante eficiência e precisão no controle, permitindo que os operadores monitorem e ajustem os processos em tempo real. Além disso, o sistema oferece a capacidade de prever e mitigar problemas

antes que eles ocorram, melhorando a produtividade e reduzindo o tempo de inatividade.

Em resumo, a preparação e implementação do *Digital Twin* na plataforma MPS envolveu uma série de atualizações e integrações tecnológicas que garantem uma comunicação eficaz entre os componentes físicos e virtuais. Com o suporte do *CIROS Education* e a facilitação do EZOPC, o sistema agora oferece um controle preciso e eficiente, refletindo fielmente as operações da plataforma física e proporcionando uma base sólida para futuras inovações e melhorias.

6.7 Nível de Maturidade e critérios de fábrica e produto inteligentes

Ao analisar o nível de maturidade da plataforma MPS, é possível avaliar sua posição em relação às tecnologias e práticas da Indústria 4.0. Esta informação proporciona um panorama das características do sistema provenientes da análise, quando o sistema é ainda legado e, após, quando é aplicado o *retrofit* (sistema atualizado). Portanto, o objetivo básico é que a plataforma MPS atualizada atinja um nível superior na avaliação de maturidade de RAMI; isso, se comparada com a avaliação realizada quando o sistema era legado, em relação à avaliação da maturidade e ao critério de fábrica inteligente.

Para classificar a plataforma MPS em relação aos níveis de fábrica inteligente, foi necessário avaliar as características e o grau de desenvolvimento em cada um dos critérios relacionados a estes parâmetros (F1 a F5). Com base nessa avaliação, foi possível estabelecer a classificação verossímil do nível em cada um dos parâmetros.

A maturidade do sistema foi avaliada usando os níveis do modelo RAMI, levando em consideração os requisitos da fábrica inteligente, pois o critério produto inteligente é muito simples para esta aplicação, ou não aplicável. Ou seja, a validação focou no sucesso do processo de *retrofit*, na implementação do gêmeo digital e na comparação com os critérios da fábrica inteligente do RAMI avaliados antes (no sistema legado) e após (no sistema atualizado).

Por conseguinte, avaliar o nível de maturidade da Indústria 4.0 e aplicar seus critérios, é uma das contribuições deste trabalho, e é uma das formas de validar o *Digital Twin* obtido e a metodologia *retrofit* desenvolvida no decorrer deste. Assim, a metodologia aplicada foi norteada por informações advindas do processo de avaliação, realizado inicialmente no

sistema legado, que deu suporte na seleção de componentes e tecnologias, proporcionando, assim, alcançar um grau mais elevado em cada um dos parâmetros mensurados.

A Tabela 6.1 mostra o comparativo (Legado X Atualizado) do critério de fábrica inteligente, obtido por meio da coleta e classificação dos parâmetros na plataforma MPS. No sistema legado, em F1, foi atribuído nível 3 pelo fato de a planta ter grau "Bom" de automação, devido ao uso de componentes elétricos e pneumáticos. Com relação à F2, este foi classificado em nível 2, pois a integração da plataforma MPS é limitada pelo fato de a arquitetura ser legada e por situações de interoperabilidade dos seus dispositivos com outros sistemas.

- F1 - Automação de processos produtivos (Legado): A classificação da plataforma MPS legada como nível 3 foi baseada em seu nível satisfatório de automação de processos. Esse grau de automação é alcançado utilizando sistemas elétricos, hidráulicos e pneumáticos. Embora esses sistemas ofereçam uma base sólida para automação, suas capacidades em tempo real e funcionalidades avançadas são limitadas.
- F2 - Integração de sistemas (Legado): A plataforma MPS legada foi classificada como nível 2 em relação às suas capacidades de integração. Embora possa ser integrada com outros sistemas, sua arquitetura desatualizada frequentemente impede isso. A arquitetura do sistema legado apresenta desafios relacionados à interoperabilidade, o que pode limitar a eficiência e a eficácia do controle coordenado e da troca de dados com outros sistemas.
- F3 - Uso de dispositivos inteligentes (Legado): A plataforma MPS legada foi classificada como nível 1 porque carece de dispositivos inteligentes integrados. Embora o sistema utilize tecnologias básicas de automação, ele não possui as capacidades avançadas de sensores e atuadores inteligentes.
- F4 - Análise de dados em tempo real (Legado): A plataforma MPS legada foi classificada como nível 1 porque carece de capacidades avançadas de análise de dados. Embora o sistema possa realizar operações básicas, ele não possui os dispositivos inteligentes integrados ou ferramentas sofisticadas de processamento de dados necessárias para uma análise aprofundada. No entanto, integrá-lo com sistemas externos de análise de dados pode melhorar o desempenho.

- F5 - Flexibilidade de produção (Legado): A plataforma MPS legada foi classificada como nível 2 devido à sua flexibilidade de produção. Essa flexibilidade foi alcançada através da possibilidade de troca de módulos para mudar o tipo de produto fabricado. No entanto, essa flexibilidade é limitada pela arquitetura legada, e os módulos podem ter sido projetados para produzir apenas tipos específicos de produtos.
- F1 - Automação de processos produtivos (Atualizado): Esta atualização permite uma automação de processos mais sofisticada, incorporando capacidades de controle e monitoramento em tempo real. A integração de sensores e dispositivos avançados melhorou significativamente a capacidade da plataforma de coletar e processar dados de forma eficiente. As melhorias na arquitetura do sistema permitem melhor interoperabilidade e integração com outros sistemas, apoiando assim um ambiente de produção mais flexível e responsivo.
- F2 - Integração de sistemas (Atualizado): Esta atualização facilita uma integração mais eficiente e contínua com outros sistemas, melhorando a coordenação e o controle do processo de produção. Protocolos de comunicação modernos e ferramentas avançadas de gerenciamento de dados suportam capacidades de integração aprimoradas, permitindo monitoramento e controle em tempo real.
- F3 - Uso de dispositivos inteligentes (Atualizado): Esta atualização permite uma integração de sistema mais eficiente, permitindo melhor coordenação e controle do processo de produção. A integração de dispositivos inteligentes, como sensores e atuadores avançados, melhorou significativamente as capacidades da plataforma. Esses dispositivos inteligentes facilitam a coleta e análise de dados em tempo real, melhorando os processos de tomada de decisão e a eficiência operacional.
- F4 - Análise de dados em tempo real (Atualizado): Esta atualização integra capacidades avançadas de análise de dados, permitindo uma análise mais sofisticada dos dados de produção. O sistema agora pode identificar tendências e padrões que anteriormente eram indetectáveis, o que ajuda a otimizar o processo de produção. A coleta e análise de dados em tempo real permitem uma tomada de decisão informada, melhorando a eficiência operacional e a capacidade de resposta.
- F5 - Flexibilidade de produção (Atualizado): Esta atualização, facilitada por ferramentas como o CIROS, permite uma maior flexibilidade de produção. O sistema

atualizado agora pode fazer ajustes em tempo real e simular diferentes cenários de produção, melhorando significativamente sua capacidade de se adaptar a diferentes requisitos de fabricação.

Ainda, com relação à fábrica inteligente, no sistema legado, em relação aos parâmetros F3, F4 e F5, estes foram classificados apenas no nível 1, pois não havia dispositivos inteligentes instalados na plataforma MPS legada, muito menos uma capacidade de análise e processamento de dados implementados. A produção é pouco flexível, pois há limitações relacionadas ao processo propriamente dito.

Após o processo de atualização, os resultados foram coletados e foi explicitada a nova avaliação, de forma que, F1, F2 e F4 alcançaram o nível 4 atendendo demandas relacionadas à automação avançada, monitoramento e controle em tempo-real do processo, melhoria considerável da integração da plataforma MPS e capacidade de coleta e processamento eficiente dos dados do processo. Já nos parâmetros F3 e F5, foi alcançado o nível 3, superior ao mensurado no sistema legado e com novas funcionalidades implementadas, relacionadas a melhorias dos componentes do processo, flexibilidade, integração e capacidade de simulação de diferentes cenários de produção.

Por fim, o gráfico apresentado na Figura 6.12 ilustra os resultados obtidos com o desenvolvimento do *Digital Twin*, que foi viabilizado pela aplicação da metodologia de *retrofit*. Essa abordagem permitiu não apenas a modernização do sistema legado, mas também sua integração com tecnologias avançadas, resultando em um desempenho significativamente aprimorado. A implementação foi bem-sucedida tanto no desenvolvimento quanto na aplicação prática na plataforma MPS, trazendo benefícios claros ao processo produtivo. Entre os principais avanços, destacam-se o aumento na capacidade de coleta e análise em tempo real de grandes volumes de dados, a melhoria na tomada de decisões informadas e a identificação precoce de possíveis problemas no sistema. Além disso, houve um avanço considerável na comunicação e nas conexões entre os componentes da plataforma, que se tornaram mais flexíveis e robustas, contribuindo para a eficiência e a confiabilidade do sistema como um todo.

O gráfico, no formato de teia de aranha, é uma representação visual que compara o desempenho do sistema antes e depois da aplicação do *retrofit* e da implementação do *Digital Twin*. Esse tipo de gráfico, também conhecido como gráfico radar, é amplamente utilizado para exibir dados multivariados em um formato bidimensional, onde cada eixo

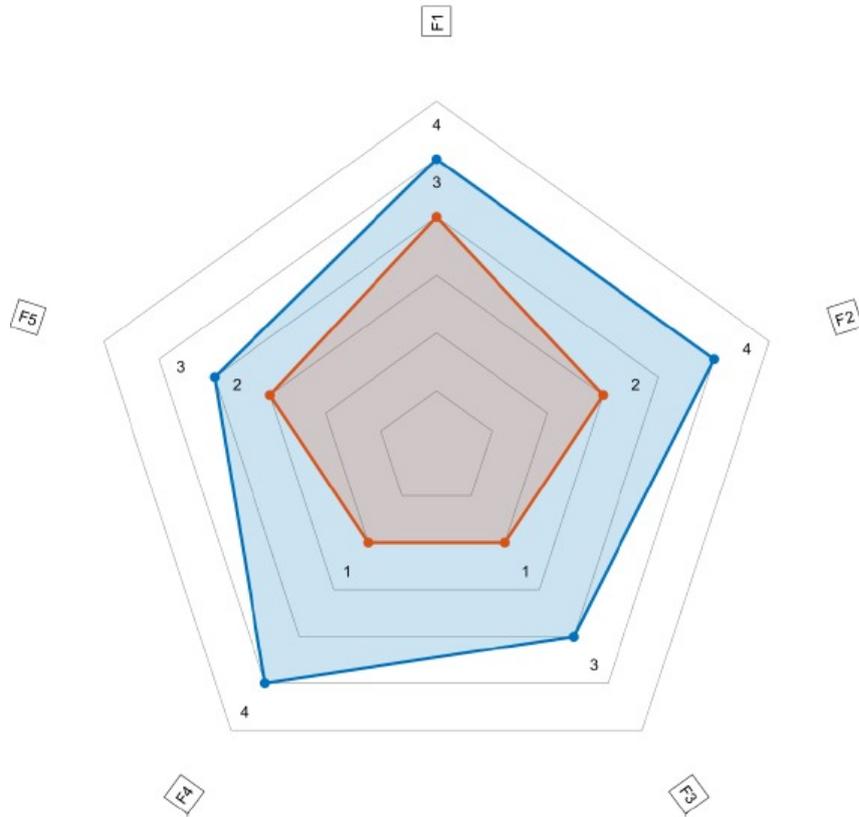


Figura 6.12: Gráfico teia de aranha do Sistema Legado X Sistema Atualizado

representa uma variável específica. No caso apresentado, a figura em vermelho representa os resultados do sistema legado em relação aos critérios de fábrica inteligente, enquanto a figura em azul demonstra os resultados obtidos após a atualização. Essa comparação visual evidencia os avanços alcançados, com um aumento geral nos níveis de desempenho em praticamente todos os critérios avaliados. Em particular, destaca-se o critério F4, que apresentou uma melhoria significativa, indicando avanços específicos em aspectos relacionados à flexibilidade e à adaptabilidade do sistema.

A análise do gráfico reforça a eficácia da metodologia aplicada, demonstrando que o *retrofit*, aliado à implementação do *Digital Twin*, não apenas modernizou o sistema legado, mas também o tornou mais alinhado às demandas da Indústria 4.0. A capacidade de monitoramento em tempo real, a integração de dados e a melhoria na comunicação entre os componentes são exemplos claros de como a atualização contribuiu para a transformação do sistema em uma solução mais eficiente, robusta e preparada para os desafios da manufatura moderna. Esses resultados destacam o potencial do *Digital Twin* como uma ferramenta estratégica para a modernização de sistemas legados, promovendo avanços significativos em termos de desempenho e inovação.

Tabela 6.1: Avaliação do critério de maturidade da fábrica inteligente

	Descrição	Nível de Maturidade Sistema Legado	Nível de Maturidade Sistema Atualizado	Parâmetros referentes ao critério de fábrica inteligente
F1	Automação de processos produtivos	Nível 3	Nível 4	<p>Sistema Legado - é classificado no nível 3 devido ao seu grau razoável de automação do processo, caracterizado pelo uso de sistemas pneumáticos, hidráulicos e elétricos.</p> <p>Sistema Atualizado - agora no nível 4, a atualização permite uma automação mais avançada do processo, com a possibilidade de controle e monitoramento em tempo real.</p>
F2	Integração de sistemas	Nível 2	Nível 4	<p>Sistema Legado - é classificado no nível 2 por poder ser integrado a outros sistemas, mas essa integração pode ser limitada por sua arquitetura legada.</p> <p>Sistema Atualizado - agora no nível 4, possibilita uma integração de sistemas mais eficiente, permitindo melhor monitoramento e controle do processo de produção.</p>
F3	Uso de dispositivos inteligentes	Nível 1	Nível 3	<p>Sistema Legado - é classificado no nível 1 por não ter dispositivos inteligentes integrados, mas é possível adicionar sensores ou atuadores inteligentes para aprimorar seu desempenho e capacidade de análise de dados.</p> <p>Sistema Atualizado - agora no nível 3, possibilita uma integração de sistemas mais eficiente, permitindo melhor coordenação e controle do processo de produção.</p>
F4	Análise de dados em tempo real	Nível 1	Nível 4	<p>Sistema Legado - é classificado no nível 1 por não ter capacidades avançadas de análise de dados, mas é possível integrá-lo a sistemas de análise de dados para obter informações mais precisas sobre seu desempenho e atingir um nível mais alto.</p> <p>Sistema Atualizado - agora no nível 4, é possível realizar análises mais avançadas dos dados de produção, facilitando a identificação de tendências e padrões que podem otimizar a produção.</p>
F5	Flexibilidade de produção	Nível 2	Nível 3	<p>Sistema Legado - é classificado no nível 2 por ter certo grau de flexibilidade de produção, com a possibilidade de trocar módulos para alterar o tipo de produto fabricado. No entanto, essa flexibilidade pode ser limitada por sua arquitetura legada e pelo fato de os módulos terem sido projetados para produzir apenas um tipo específico de produto.</p> <p>Sistema Atualizado - agora no nível 3, o CIROS pode permitir uma maior flexibilidade de produção, com a possibilidade de ajustes em tempo real e simulação de diferentes cenários.</p>

Capítulo 7

Considerações finais

7.1 Conclusão

O desenvolvimento do *Digital Twin* e a aplicação da metodologia de *retrofit* na plataforma MPS resultaram em melhorias significativas no processo atualizado. Seguindo o procedimento metodológico delineado, foram realizadas atualizações e substituições de sensores e dispositivos, trazendo a plataforma para o contexto da Indústria 4.0. Essas mudanças proporcionaram benefícios como o aumento da vida útil do sistema, melhor integração e flexibilidade, qualidade aprimorada do produto e maior eficiência operacional.

A avaliação do nível de maturidade da plataforma MPS, antes e após o *retrofit*, mostrou um progresso notável em conformidade com o contexto da Indústria 4.0. Essa análise, baseada nos parâmetros relacionados à fábrica inteligente do modelo RAMI 4.0, demonstrou avanços significativos na modernização do sistema legado. Esse progresso reflete o compromisso em alinhar a plataforma MPS com as tendências e práticas mais recentes da indústria, garantindo sua competitividade e relevância.

Uma das contribuições mais significativas deste trabalho é o desenvolvimento da arquitetura de *Digital Twin* e a adequação do sistema legado por meio do *retrofit*. A validação dessa metodologia, realizada através da avaliação do nível de maturidade da Indústria 4.0, destacou não apenas a relevância do *retrofit*, mas também a eficácia da estratégia de atualização. Isso reforça a importância de alinhar as práticas de modernização com as demandas emergentes da indústria, promovendo maior eficiência e integração.

As tabelas comparativas do sistema legado versus o sistema atualizado, juntamente com o gráfico teia de aranha apresentados anteriormente, corroboram o sucesso da pro-

posta desenvolvida neste trabalho. Esses elementos evidenciam melhorias consideráveis em áreas críticas, como: coleta e análise de dados em tempo real; tomada de decisões informadas; integração e interoperabilidade de processos; comunicação aprimorada entre os componentes da plataforma e o *Digital Twin* do processo.

Ferramentas de comunicação como *CANOpen*, *EasyPort*, *EZOPC* e *CIROS Education*, desempenharam um papel fundamental no processo de atualização. Elas permitiram uma integração mais eficiente e atenderam aos requisitos definidos no início do processo metodológico. Essas ferramentas foram essenciais para garantir que o sistema atualizado operasse de forma coesa e eficiente, alinhando-se aos padrões da Indústria 4.0.

Em suma, o desenvolvimento do *Digital Twin* e a implementação da metodologia de *retrofit* não apenas modernizaram a plataforma MPS, mas também a posicionaram de maneira mais competitiva e alinhada com as exigências da Indústria 4.0. O *Digital Twin* permitiu a criação de um modelo virtual que permitiu realizar testes, simulações em diferentes cenários e validações de configurações antes de implementá-las no hardware real.

Por fim, essas iniciativas não apenas aprimoraram a eficiência e a competitividade da plataforma MPS, mas também a prepararam para futuras inovações tecnológicas. Isso assegura sua relevância contínua em um contexto industrial que se torna progressivamente mais digitalizado, garantindo que a plataforma esteja pronta para atender às demandas de um mercado em constante evolução.

7.2 Publicações realizadas em periódicos e conferências

- R. S. Mendonca, S. Lins, G. Veroneze, M. Oliveira, R. Medeiros and V. F. Lucena, "Construction of a Digital Twin for Reliability Analysis: A Case Study of a Storage Process," 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFAs), Stuttgart, Germany, 2022.
- R. S. Mendonca, Oliveira, M. A., Ayres Jr F., R. Medeiros, and V. F. Lucena Jr, "Avaliação de modelo de maturidade RAMI de Industria 4.0: Estudo de caso de um sistema de alocação de recursos", XXIV Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2022.
- R. S. Mendonca, S. O. Lins, I. Bessa, F. Ayres Jr, R. Medeiros, and V. F. Lucena Jr,

- “Digital twin applications: A survey of recent advances and challenges”, *Processes*, vol. 10, no. 4, p. 744, 2022
- R. D. S. Mendonça, M. M. De Carvalho, G. S. Machado, C. S. M. Da Silva, R. L. P. De Medeiros and V. F. De Lucena, “Development of a Novel Methodology to Retrofit Legacy Systems in the Context of Industry 4.0,” in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 123223-123235, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3328537.
 - R. D. S. Mendonça, M. M. De Carvalho, R. L. P. De Medeiros and V. F. De Lucena, “Proposta de metodologia retrofit para atualizar sistemas legados”, XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2023).
 - M. M. De Carvalho, R. D. S. Mendonça, R. L. P. De Medeiros, Ayres Jr F. and V. F. De Lucena, “Digitalização de uma planta industrial utilizando o protocolo de comunicação OPC-UA e aplicação Node-red”, XVI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2023).
 - da Silva Mendonça, R.; dos Santos, K. V.; de Medeiros, R. L. P.; da Silva, M.; de Lucena Jr, V. F. Proposta de metodologia Retrofit aplicada em um processo produtivo legado. In: XXV Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2024, 15-18 de outubro de 2024, Rio de Janeiro, RJ. Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2024, 2024.
 - Mendonca, R. S., da Silva, M., Ayres, F. A. C., Jr., Bessa, I. V., Medeiros, R. L. P., & Lucena, V. F., Jr. “Development of a Novel Retrofit Framework Considering Industry 4.0 Concepts: A Case Study of a Modular Production System”. *Processes*. 2025, 13(1):136.

Referências Bibliográficas

- R. Atat, L. Liu, J. Wu, G. Li, C. Ye, and Y. Yang, “Big data meet cyber-physical systems: A panoramic survey,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 73 603–73 636, 2018.
- B. Bajic, N. Suzic, N. Simeunovic, S. Moraca, and A. Rikalovic, “Real-time data analytics edge computing application for industry 4.0: the mahalanobis-taguchi approach,” *International Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 11, no. 3, pp. 145–156, 2020.
- Y.-S. Ong and A. Gupta, “Air5: Five pillars of artificial intelligence research,” *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, vol. 3, no. 5, pp. 411–415, 2019.
- J. Wu and Y. Lu, “Adaptive backstepping sliding mode control for boost converter with constant power load,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 50 797–50 807, 2019.
- Z. You and L. Feng, “Integration of industry 4.0 related technologies in construction industry: A framework of cyber-physical system,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 122 908–122 922, 2020.
- J. D. Contreras Pérez, R. E. Cano Buitrón, and J. I. García Melo, “Methodology for the retrofitting of manufacturing resources for migration of sme towards industry 4.0,” in *International Conference on Applied Informatics*. Springer, 2018, pp. 337–351.
- S. R. Bader, I. Grangel-Gonzalez, P. Nanjappa, M.-E. Vidal, and M. Maleshkova, “A knowledge graph for industry 4.0,” in *European Semantic Web Conference*. Springer, 2020, pp. 465–480.
- A. Bastos, M. L. Sguario Coelho De Andrade, R. T. Yoshino, and M. M. D. Santos,

- “Industry 4.0 readiness assessment method based on rami 4.0 standards,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 119 778–119 799, 2021.
- B. Bajic, A. Rikalovic, N. Suzic, and V. Piuri, “Industry 4.0 implementation challenges and opportunities: A managerial perspective,” *IEEE Systems Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 546–559, 2021.
- I. Ahmed, G. Jeon, and F. Piccialli, “From artificial intelligence to explainable artificial intelligence in industry 4.0: A survey on what, how, and where,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 8, pp. 5031–5042, 2022.
- S. Mihai, M. Yaqoob, D. V. Hung, W. Davis, P. Towakel, M. Raza, M. Karamanoglu, B. Barn, D. Shetve, R. V. Prasad, H. Venkataraman, R. Trestian, and H. X. Nguyen, “Digital twins: A survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 4, pp. 2255–2291, 2022.
- T.-A. Tran, T. Ruppert, G. Eigner, and J. Abonyi, “Retrofitting-based development of brownfield industry 4.0 and industry 5.0 solutions,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 64 348–64 374, 2022.
- K. Vinitha, R. A. Prabhu, R. Bhaskar, and R. Hariharan, “Review on industrial mathematics and materials at industry 1.0 to industry 4.0,” *Materials today: proceedings*, vol. 33, pp. 3956–3960, 2020.
- G. Culot, G. Nassimbeni, G. Orzes, and M. Sartor, “Behind the definition of industry 4.0: Analysis and open questions,” *International Journal of Production Economics*, vol. 226, p. 107617, 2020.
- A. A. Wagire, R. Joshi, A. P. S. Rathore, and R. Jain, “Development of maturity model for assessing the implementation of industry 4.0: learning from theory and practice,” *Production Planning & Control*, vol. 32, no. 8, pp. 603–622, 2021.
- A. Rikalovic, N. Suzic, B. Bajic, and V. Piuri, “Industry 4.0 implementation challenges and opportunities: A technological perspective,” *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 2797–2810, 2022.

- L. Bosman, N. Hartman, and J. Sutherland, “How manufacturing firm characteristics can influence decision making for investing in industry 4.0 technologies,” *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2019.
- K. K. Patel, S. M. Patel, and P. Scholar, “Internet of things-iot: definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application & future challenges,” *International journal of engineering science and computing*, vol. 6, no. 5, 2016.
- K. A. Eldrandaly, M. Abdel-Basset, and L. A. Shawky, “Internet of spatial things: A new reference model with insight analysis,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 19 653–19 669, 2019.
- V. Hahanov, O. Mishchenko, T. Soklakova, V. Abdullayev, S. Chumachenko, and E. Litvinova, “Cyber-social computing,” in *Green IT Engineering: Social, Business and Industrial Applications*. Springer, 2019, pp. 489–515.
- A. D’Alconzo, I. Drago, A. Morichetta, M. Mellia, and P. Casas, “A survey on big data for network traffic monitoring and analysis,” *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 16, no. 3, pp. 800–813, 2019.
- S. Douch, M. R. Abid, K. Zine-Dine, D. Bouzidi, and D. Benhaddou, “Edge computing technology enablers: A systematic lecture study,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 69 264–69 302, 2022.
- M. B. Schrettenbrunner, “Artificial-intelligence-driven management,” *IEEE Engineering Management Review*, vol. 48, no. 2, pp. 15–19, 2020.
- W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, and W. Sihn, “Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 11, pp. 1016–1022, 2018.
- M. Li, D. Hu, C. Lal, M. Conti, and Z. Zhang, “Blockchain-enabled secure energy trading with verifiable fairness in industrial internet of things,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 10, pp. 6564–6574, 2020.
- S. Haag and R. Anderl, “Digital twin—proof of concept,” *Manufacturing letters*, vol. 15, pp. 64–66, 2018.

- D. Etz, H. Brantner, and W. Kastner, “Smart manufacturing retrofit for brownfield systems,” *Procedia Manufacturing*, vol. 42, pp. 327–332, 2020.
- J. Zhang, D. Kline, L. Fang, R. Melhem, and A. K. Jones, “Retrofit: Fault-aware wear leveling,” *IEEE Computer Architecture Letters*, vol. 17, no. 2, pp. 167–170, 2018.
- K. Quatromoni, “The industrial internet consortium and plattform industrie 4.0 publish architecture alignment and interoperability: Mapping and alignment between industrial internet reference architecture and reference architecture model for industrie 4.0 [white paper]. industrial internet consortium,” *Industrial Internet Consortium*, 2018.
- M. Hankel and B. Rexroth, “The reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0),” *Zvei*, vol. 2, no. 2, pp. 4–9, 2015.
- “Iso/iec/ieee international standard - software engineering - software life cycle processes - maintenance,” *ISO/IEC/IEEE 14764:2022(E)*, pp. 1–46, 2022.
- E. Oztemel and S. Gursev, “Literature review of industry 4.0 and related technologies,” *Journal of intelligent manufacturing*, vol. 31, pp. 127–182, 2020.
- D. Jaspert, M. Ebel, A. Eckhardt, and J. Poeppelbuss, “Smart retrofitting in manufacturing: A systematic review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 312, p. 127555, 2021.
- A. Alqoud, D. Schaefer, and J. Milisavljevic-Syed, “Industry 4.0: a systematic review of legacy manufacturing system digital retrofitting,” *Manufacturing Review*, vol. 9, p. 32, 2022.
- R. S. Mendonça, S. O. Lins, I. Bessa, F. Ayres Jr, R. Medeiros, and V. F. Lucena Jr, “Digital twin applications: A survey of recent advances and challenges,” *Processes*, vol. 10, no. 4, p. 744, 2022.
- O. Givehchi, K. Landsdorf, P. Simoens, and A. W. Colombo, “Interoperability for industrial cyber-physical systems: An approach for legacy systems,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 6, pp. 3370–3378, 2017.
- O. Nakakaze, I. Koren, F. Brillowski, and R. Klamma, “Retrofitting industrial machines with webassembly on the edge,” in *International Conference on Web Information Systems Engineering*. Springer, 2022, pp. 241–256.

- M. Zambetti, M. A. Khan, R. Pinto, and T. Wuest, “Enabling servitization by retrofitting legacy equipment for industry 4.0 applications: benefits and barriers for oems,” *Procedia Manufacturing*, vol. 48, pp. 1047–1053, 2020.
- S. S. V. K. Kolla, D. M. Lourenço, A. A. Kumar, and P. Plapper, “Retrofitting of legacy machines in the context of industrial internet of things (iiot),” *Procedia Computer Science*, vol. 200, pp. 62–70, 2022.
- T. Lins and R. A. R. Oliveira, “Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0,” *Computers & industrial engineering*, vol. 139, p. 106193, 2020.
- B.-Y. Ooi, W.-L. Beh, W.-K. Lee, and S. Shirmohammadi, “A parameter-free vibration analysis solution for legacy manufacturing machines’ operation tracking,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 11, pp. 11 092–11 102, 2020.
- T. Ruppert, A. Darányi, T. Medvegy, D. Csereklei, and J. Abonyi, “Demonstration laboratory of industry 4.0 retrofitting and operator 4.0 solutions: Education towards industry 5.0,” *Sensors*, vol. 23, no. 1, p. 283, 2022.
- R. Wöstmann, A. Barthelmeý, N. West, J. Deuse, T. Schüppstuhl, K. Tracht *et al.*, “A retrofit approach for predictive maintenance,” *Tagungsband des*, vol. 4, pp. 94–106, 2019.
- Á. García, A. Bregon, and M. A. Martínez-Prieto, “A non-intrusive industry 4.0 retrofitting approach for collaborative maintenance in traditional manufacturing,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 164, p. 107896, 2022.
- K. A. Nsiah, M. Schappacher, C. Rathfelder, A. Sikora, and V. Groza, “An open-source toolkit for retrofit industry 4.0 sensing and monitoring applications,” in *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2018, pp. 1–6.
- H. Sasahara, T. Ishizaki, and J.-i. Imura, “Parameterization of all output-rectifying retrofit controllers,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 67, no. 5, pp. 2537–2543, 2022.
- J. I. García, R. E. Cano, and J. D. Contreras, “Digital retrofit: A first step toward the adoption of industry 4.0 to the manufacturing systems of small and medium-sized

enterprises,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 234, no. 8, pp. 1156–1169, 2020.

C. L. Niemeyer, I. Gehrke, K. Müller, D. Küsters, and T. Gries, “Getting small medium enterprises started on industry 4.0 using retrofitting solutions,” *Procedia Manufacturing*, vol. 45, pp. 208–214, 2020.

R. Ružarovský, R. Holubek, M. Janíček, K. Velíšek, and G. Tirian, “Analysis of the industry 4.0 key elements and technologies implementation in the festo didactic educational systems mps 203 i4. 0,” in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1781, no. 1. IOP Publishing, 2021, p. 012030.