



Ministério da Educação
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Controle e
Automação



DESENVOLVIMENTO DO GÊMEO DIGITAL DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO E PREPARAÇÃO PARA COLETA EM SISTEMA PIMS

BRUNO AUGUSTO OLIVEIRA PINTO

Ouro Preto MG
2023

BRUNO AUGUSTO OLIVEIRA PINTO

**DESENVOLVIMENTO DO GÊMEO DIGITAL DE
UM MANIPULADOR ROBÓTICO E
PREPARAÇÃO PARA COLETA EM SISTEMA
PIMS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau em Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Nazário Coelho

Coorientador: Prof. Dr. Saul Emanuel Delabrida Silva

Ouro Preto - MG
16 de maio de 2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Bruno Augusto Oliveira Pinto

Desenvolvimento do Gêmeo Digital de um manipulador robótico e preparação para coleta em Sistema PIMS

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 16 de maio de 2023

Membros da banca

- [Dr.] - Bruno Nazário Coelho - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Dr.] - Saul Emanuel Delabrida Silva - Coorientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Frederico Luiz Martins de Sousa (Universidade Federal de Ouro Preto)
[Dr.] - Alan Kardek Rego Segundo - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Bruno Nazário Coelho, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/05/2023



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Nazário Coelho, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/05/2023, às 12:48, conforme horário oficial de Brasília, 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 http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0527771** e o código CRC **470C706F**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.006645/2023-48

SEI nº 0527771

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

Este trabalho é dedicado aos meus pais, Alexandre e Maria José. Se não fosse por vocês, eu não estaria aqui.

Agradecimentos

Gostaria de aproveitar esta oportunidade para expressar minha sincera gratidão a todos aqueles que me apoiaram ao longo deste projeto. Em primeiro lugar, sou extremamente grato aos meus pais e à minha família, que sempre acreditaram em mim e me incentivaram a buscar meus sonhos. Seu amor incondicional e apoio foram fundamentais para o meu sucesso.

Quero também agradecer aos meus amigos, que estiveram ao meu lado durante os altos e baixos desta jornada. A amizade, o companheirismo e as risadas que compartilhamos me ajudaram a superar os momentos difíceis e a celebrar as conquistas.

Aos meus professores e orientadores, sou eternamente grato por todo o conhecimento, sabedoria e orientação que vocês me proporcionaram. Sua paixão pelo ensino e compromisso com a excelência acadêmica foram verdadeiramente inspiradores e me motivaram a dar o meu melhor em cada etapa deste projeto.

Em suma, sou afortunado por ter tido o apoio de todas essas pessoas incríveis, e dedico este trabalho a cada um de vocês. Muito obrigado!

"O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos."

Eleanor Roosevelt

Resumo

À medida que a tecnologia de Gêmeos Digitais, representações virtuais e dinâmicas que simulam o comportamento e características de objetos, processos ou sistemas físicos em tempo real, ganha impulso e expansão, as indústrias começam a investir na modelagem tridimensional de suas plantas. Este estudo explora uma solução para o processamento de dados gerados por essas plantas digitais, através da integração do sistema PIMS, um software historiador, e o Gêmeo Digital. As interfaces necessárias para essa integração são discutidas, assim como a metodologia apropriada para analisar os dados e realizar comparações entre as plantas digitais e físicas. A importância da colaboração entre diferentes setores industriais e a adaptação às tendências emergentes são enfatizadas, incentivando maior eficiência, otimização e inovação nos processos produtivos. A conclusão deste trabalho ressalta que, através da promoção dessa integração, é possível impulsionar o crescimento tecnológico nas empresas, proporcionando vantagens competitivas no cenário global e teve seu experimento servindo como ponto de partida para futuras investigações e aplicações práticas em diferentes segmentos industriais.

Palavras-chave: Gêmeo Digital; Sistema PIMS; Transformação Digital; Análise de Dados Industriais; Integração Tecnológica; Automação; Indústria 4.0; Otimização de Processos.

Abstract

As Digital Twin technology, dynamic virtual representations that simulate the behavior and characteristics of physical objects, processes, or systems in real-time, gains momentum and expansion, industries begin to invest in the three-dimensional modeling of their plants. This study explores a solution for processing data generated by these digital plants, through the integration of the PIMS system, a historian software, and the Digital Twin. The necessary interfaces for this integration are discussed, as well as the appropriate methodology to analyze the data and perform comparisons between the digital and physical plants. The importance of collaboration among different industrial sectors and adaptation to emerging trends are emphasized, encouraging greater efficiency, optimization, and innovation in production processes. The conclusion of this work underscores that, through the promotion of this integration, it is possible to boost technological growth in companies, providing competitive advantages in the global scenario and its experiment serving as a starting point for future investigations and practical applications in different industrial segments.

Keywords: Digital Twin; PIMS System; Digital Transformation; Industrial Data Analysis; Technological Integration; Automation; Industry 4.0; Process Optimization.

Lista de figuras

Figura 1 – Braço Robótico MDF.	18
Figura 2 – Diagrama do circuito.	19
Figura 3 – Braço Robótico e Bancada de Protoboard durante os testes.	20
Figura 4 – Braço robótico no Unity na posição inicial, antes de iniciar a simulação. . .	21
Figura 5 – Braço robótico no Unity durante a simulação.	22
Figura 6 – Braço robótico no Unity durante a simulação.	22
Figura 7 – Gráfico de linhas das juntas do braço robótico físico.	25
Figura 8 – Gráfico de linhas das juntas do gêmeo digital.	25
Figura 9 – Exemplo do registro dos dados para integração com um sistema PIMS. . . .	27

Lista de abreviaturas e siglas

DT	Digital Twin
PIMS	Plant Information Management System
POC	Proof of Concept
TI	Tecnologia da Informação
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
ABII	Associação Brasileira de Internet Industrial
IoT	Internet of Things
IA	Inteligência Artificial
UFL	Universal File Loading
OPC	Object Linking and Embedding for Process Control
API	Application Programming Interface
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Objetivos	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Transformação Digital - A 4ª Revolução Industrial	4
2.2	A Integração Tecnológica Dentro do Ambiente Industrial	5
2.3	Sistemas PIMS	7
2.3.1	Sistemas PIMS na Era da Indústria 4.0	8
2.3.2	Desafios e Oportunidades	9
2.4	Gêmeos Digitais nos Setores Industriais	10
2.4.1	Gêmeos Digitais e a Indústria 4.0	10
2.4.2	Benefícios	11
2.4.3	Desafios	11
2.5	Integração entre Gêmeos Digitais e Sistemas PIMS	12
2.5.1	Desafios da Integração	13
2.5.2	Exemplos Práticos	14
2.6	Visão Geral	16
3	METODOLOGIA	17
3.1	Implementação do Braço Robótico Físico	17
3.1.1	Montagem do Braço Robótico	17
3.1.2	Montagem da Bancada de Protoboard	17
3.1.3	Desenvolvimento do Código Arduino	18
3.1.4	Desenvolvimento do Código Python	18
3.1.5	Testes e Validação	19
3.2	Desenvolvimento do Gêmeo Digital no Unity	20
3.2.1	Modelagem 3D	21
3.2.2	Importação e Estruturação das Peças no Unity	21
3.2.3	Implementação dos Scripts de Controle das Juntas	21
3.2.4	Implementação do Registro dos Dados	22
3.3	Coleta dos Dados para Integração	23
4	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	24
4.1	Desenvolvimento, Coleta e Análise de Dados nas Bancadas	24
4.2	Preparação de Dados para Integração com um Sistema PIMS e Além	26

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
5.1	Lições Aprendidas	28
5.2	Potencial para Melhorias e Trabalhos Futuros	28
5.3	Conclusão	29
	Referências	31

1 Introdução

O setor industrial tem passado por uma significativa evolução tecnológica, conhecida como a 4ª revolução industrial. Temas como Indústria 4.0, Internet das Coisas e Computação na Nuvem ocupam um lugar de destaque nas atuais discussões entre os engenheiros. Contudo, um tópico emergente é o Gêmeo Digital, ou DT (Digital Twin). Segundo [Haag e Anderl \(2018\)](#), o DT pode ser visto como uma representação digital de um produto individual que inclui as propriedades, condições e comportamento do objeto da vida real através de modelos e dados. Ele é capaz de descrever o estado corrente de um objeto físico e de realizar simulações de seu estado futuro ([GABOR et al., 2016](#)). Essa representação é frequentemente desenvolvida em um software de modelagem 3D.

Em um ambiente industrial, que conta com vários equipamentos e um grande número de variáveis de processo, digitalizar a planta é uma oportunidade para alcançar altos níveis de produtividade, logo, é visto como um grande investimento ([UHLEMANN et al., 2017](#)). De acordo com [Rosen et al. \(2015\)](#), é razoavelmente possível garantir o comportamento adequado do sistema durante o curso de produção através do uso de simulações digitais. Porém o que cria a necessidade da implementação, também cria um grande problema para seu desenvolvimento, pois com uma grande quantidade de equipamentos se tem uma grande quantidade de dados a ser tratados.

Neste contexto, a utilização de um sistema já consolidado nas indústrias para realizar o tratamento desses dados surge como uma solução promissora. O Sistema de Gestão de Informações sobre Processos, também conhecido como PIMS (Plant Information Management Systems), é uma opção viável para essa finalidade. Esses sistemas de aquisição de dados são capazes de visualizar tanto os dados de tempo real quanto os históricos do processo, eliminando as ilhas de informação e concentrando em uma única base de dados informações sobre todas as áreas de uma planta ([CARVALHO et al., 2013](#)).

Porém, estes sistemas oferecem muito mais do que armazenar dados em um repositório, eles possuem ferramentas capazes de realizar análises dos dados historizados, assim como dos dados que chegam em tempo real. Estas análises vem ajudando operadores e gestores desde sua criação na década de 80, pois foram desenvolvidos para ajudar na contextualização dos dados gerados pela planta, auxiliando na tomada de decisão e tornando o processo de gestão mais eficiente ([TEIXEIRA et al., 2015](#)). Será difícil ver um outro sistema substituir o sistema PIMS para análise dos dados industriais, pelo menos nos próximos 30 anos ([BUZZELL, 2004](#)).

Neste estudo, realizou-se um experimento com o intuito de explorar os potenciais benefícios e os desafios inerentes à integração entre o Gêmeo Digital e o sistema PIMS. A experiência desenvolvida buscava elucidar aspectos práticos e teóricos desse processo, enquanto se preparava

o caminho para a futura integração completa. A organização e preparação dos dados do Gêmeo Digital e da planta física para incorporação ao sistema PIMS representa um passo significativo neste sentido. Esta preparação possibilita, no futuro, a utilização da planta digital como uma bancada de simulação 3D, baseada em dados reais e confiáveis, que permite a realização de testes e validações antes da implementação de alterações ou novos projetos. Este estudo, portanto, serviu como uma etapa estratégica na busca pela melhor maneira de desenvolver um gêmeo digital e concretizar a integração. Tal esforço é essencial para impulsionar a inovação e eficiência nas indústrias, situando-se firmemente nas demandas e tendências da Indústria 4.0.

1.1 Justificativa

A Indústria 4.0 tem impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias e o aprimoramento de processos industriais. A integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS apresenta-se como uma abordagem inovadora para melhorar a eficiência, a produtividade e a inovação no ambiente industrial. Ainda em evolução, esse campo oferece desafios e oportunidades que justificam a realização deste trabalho.

Um dos principais aspectos é a contribuição para pesquisa e desenvolvimento na área de integração de gêmeos digitais e sistemas PIMS. A pesquisa realizada neste trabalho tem como objetivo servir como base para estudos futuros e apoiar a competitividade e a eficiência no ambiente industrial, impulsionando o desenvolvimento de soluções inovadoras.

Outro aspecto relevante é a investigação da aplicabilidade e dos avanços tecnológicos proporcionados pela combinação entre gêmeos digitais e sistemas PIMS. Essa análise pode fornecer informações valiosas para a indústria e o meio acadêmico, impulsionando o avanço da tecnologia e a compreensão de suas potenciais aplicações.

Por fim, a adaptação e aplicação dessa integração em diferentes contextos industriais é um aspecto importante a ser considerado. Os resultados obtidos neste estudo e o experimento proposto servem como um exemplo prático da implementação dessa abordagem, demonstrando seu potencial em diversos ambientes do setor industrial. Além disso, este trabalho fornece um modelo que pode ser adaptado e aplicado em outras integrações e situações similares, contribuindo para a melhoria e otimização dos processos industriais que envolvem a implementação de gêmeos digitais e sistemas PIMS.

Dessa forma, este trabalho busca avançar no conhecimento e na aplicação prática dessa integração, considerando os desafios, benefícios e oportunidades apresentados no contexto da Indústria 4.0.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é avaliar o potencial da integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS no contexto da Indústria 4.0, utilizando um braço robótico como exemplo para explorar as possíveis aplicações dessa abordagem em ambientes industriais.

Por meio desta análise, o projeto estabelece uma base sólida para entender os benefícios e desafios dessa integração, demonstrando que os conceitos estudados podem servir como modelo para implementações em uma planta industrial e incentivando o crescimento tecnológico nas empresas. Adicionalmente, pretende-se elucidar as vantagens da integração entre sistemas PIMS e gêmeos digitais por meio de uma revisão bibliográfica.

Para alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos deste projeto são:

1. Realizar um estudo abrangente e contextualizado, abordando os temas de transformação digital, a 4ª revolução industrial, a integração tecnológica dentro do ambiente industrial, sistemas PIMS, gêmeos digitais e a integração entre esses sistemas, evidenciando os benefícios, desafios e exemplos práticos dessa integração.
2. Desenvolver e validar um modelo experimental de braço robótico físico e seu gêmeo digital.
3. Coletar dados do braço robótico físico e seu gêmeo digital, e prepará-los adequadamente para serem integrados ao sistema PIMS, garantindo que as informações estejam formatadas e estruturadas de maneira compatível com as necessidades do sistema.
4. Investigar e discutir a aplicabilidade e as vantagens da integração entre sistemas PIMS e gêmeos digitais, utilizando o experimento prático como base.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Transformação Digital - A 4ª Revolução Industrial

Desde o início da primeira revolução industrial na Inglaterra entre 1760 e 1860, a sociedade experimentou mudanças significativas em sua estrutura e funcionamento. Refletir sobre o passado nos ajuda a compreender como ações pretéritas moldaram o modo de vida atual e como as revoluções industriais subsequentes trouxeram progressos notáveis em diversos aspectos.

Ao comparar a primeira revolução industrial com a quarta, marcada pela transformação digital em todos os setores, fica evidente a grande disparidade entre equipamentos e recursos. Enquanto a primeira revolução focava na mecanização, na industrialização e na inserção de maquinário no campo de trabalho, a revolução digital busca otimizar e aprimorar produtos e serviços já existentes, expandindo-se além do campo industrial e abrangendo todo o mercado e instituições estatais. Essa evolução mostra como as revoluções industriais têm se tornado mais abrangentes e interconectadas, levando a inovações cada vez mais rápidas e disruptivas.

[Horrigan \(2016\)](#) argumenta que a adoção de TI e TIC na revolução digital é uma necessidade de adaptação a um modelo já presente na vida de todos. Essa transformação tem impactado a comunicação, os negócios e os relacionamentos em escala global, e também tem implicações na economia, na política e na educação. O autor enfatiza que a adesão aos preceitos trazidos pela revolução digital proporcionou mudanças consideráveis no modo como as pessoas interagem e colaboram, gerando novas oportunidades e desafios.

Embora a revolução digital já faça parte do cotidiano, é importante considerar a resistência enfrentada pelas tecnologias emergentes no processo de adoção. [Ebbers e Dijk \(2007\)](#) destacam que o uso de TI e TIC influencia a conduta de indivíduos e grupos, porém, muitas vezes, enfrenta dificuldades na adesão a novas tecnologias devido à resistência humana às mudanças. Essa resistência pode ser atribuída a fatores culturais, sociais e psicológicos, bem como ao medo do desconhecido e à preocupação com a perda de empregos e habilidades.

A implementação de recursos tecnológicos nas esferas privada e estatal tem o potencial de romper com modelos estabelecidos, simplificando e desburocratizando soluções. Segundo [Antoniali \(2000\)](#), os avanços tecnológicos têm democratizado o acesso à informação e ao conhecimento, além de transformar a comunicação de uma estrutura verticalizada e hierárquica para uma mais horizontal, ampliando a voz de cada indivíduo e facilitando a disseminação de ideias. Além disso, a tecnologia também tem contribuído para a criação de novos modelos de negócios, que exploram o potencial das redes de conexão e a capacidade de coletar e analisar grandes volumes de dados.

No contexto brasileiro, a adoção de tecnologias é muitas vezes lenta, com a população

abraçando inovações antes das organizações. Essa dinâmica revela uma necessidade de políticas públicas e iniciativas do setor privado que promovam a educação e a formação em tecnologia, incentivando a pesquisa e o desenvolvimento, bem como a criação de ambientes favoráveis ao empreendedorismo e inovação.

A transformação digital representa uma realidade tangível e relevante, sendo essencial para entender o cenário atual e as implicações dessa revolução no futuro do trabalho, na educação e na sociedade como um todo. A adaptação às mudanças trazidas pela digitalização requer uma abordagem holística, que considere aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais, garantindo um desenvolvimento sustentável e inclusivo. Neste contexto, é fundamental compreender como a integração tecnológica dentro do ambiente industrial pode maximizar a eficiência, gerar inovação e promover a competitividade das empresas, possibilitando seu sucesso na era da Indústria 4.0.

2.2 A Integração Tecnológica Dentro do Ambiente Industrial

Ao observar o mercado consumidor atual, é fácil se deparar com diversas modificações observadas nas relações como um todo, especialmente as relações comerciais que ocorrem nas organizações privadas, neste âmbito, é válido dizer que são vários os caminhos percorridos pelos consumidores para adquirir produtos e serviços. Dessa forma, é compreensível que o modo como as negociações acontecem no âmbito comercial comecem a passar por modificações para se adequar a sociedade que continuamente busca novas formas de viver e se relacionar. Neste passo, é prudente que se estude e compreenda estas dinamicidades sociais no viés comercial como forma de familiarizar-se com o novo cenário que se desenha a cada dia.

No Brasil, a tecnologia da indústria nacional ainda precisa ser bastante desenvolvida. [Hahn e Marzano \(2017\)](#) discorrem que, em comparação com países desenvolvidos como Estados Unidos e Alemanha, atualmente, o Brasil encontra-se em um patamar de indústria 2.0, no caminho para a indústria 3.0 e isso se dá pelo fato de que a introdução da automação e demais tecnologias nas linhas de montagem, ainda ocorrem em um ritmo baixo.

[Cardoso e Pires \(2017\)](#) discorrem que para que o Brasil atinja padrões internacionais de produtividade para a implementação da indústria 4.0, ainda existe um longo caminho a ser percorrido, tendo em vista que as indústrias brasileiras não costumam ser muito adeptas de manufaturas digitais. Outro ponto citado pelo autor para demonstrar a diferenciação entre os países, é a falta de investimento em profissionais e tecnologias. Por isso, [Cardoso e Pires \(2017\)](#) acreditam ser de suma importância o apoio governamental para estas implementações no mercado.

[Zancul et al. \(2016\)](#) alegam que para o setor industrial do Brasil se tornar competitivo em escala global, é necessário um avanço na produção customizada e que os produtos sejam inovadores a nível tecnológico.

Dalenogare et al. (2018) também afirmam que o Brasil faz pouco uso de tecnologias consideradas promissoras para a indústria, o que acaba deixando o país atrás dos outros em questão de desenvolvimento na área.

Carmona (2017) afirma que “o desconhecimento do uso de tecnologias digitais na indústria é acompanhado pelo baixo uso das mesmas”. Na pesquisa do autor, 58% dos entrevistados consideraram importante o uso de tecnologias digitais para a competitividade da indústria nacional, entretanto, somente 48% dos entrevistados afirmaram que se utilizam de alguma tecnologia digital.

Hahn e Marzano (2017) também discorrem que a implementação do conceito de indústria 4.0 no Brasil pode se dar pulando algumas etapas, pois essa rapidez na implantação pode proporcionar vantagens competitivas ao país.

No Brasil, as instituições que realizam estudos sobre o desenvolvimento industrial são a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), Confederação Nacional da Indústria (CNI) e Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP). A Confederação Nacional da Indústria (INDÚSTRIA, 2016) afirmou que a indústria brasileira trabalha com foco no aumento da produtividade e que este tem sido positivo, entretanto, para demonstrar resultados mais positivos e melhorar o posicionamento na economia global, é necessário que haja a implementação das tecnologias em todas as dimensões.

Entretanto, além de não investimento suficiente para profissionais qualificados, também é necessário um apoio governamental para que a indústria 4.0 atinja um patamar competitivo, pois esta dependerá de investimento para incorporação a médio e longo prazo de novas tecnologias, tendo em vista o alto custo (CARMONA, 2017).

Todavia, é válido ressaltar que houve a criação da Associação Brasileira de Internet Industrial (ABII) (ASSOCIAÇÃO...), o que demonstra os primeiros passos para a implementação da indústria 4.0 no país, visto que esta tem como objetivo, realizar a divulgação da internet industrial, bem como, o crescimento destas atividades, além de criar fóruns de discussão sobre o assunto, visando o desenvolvimento da temática.

Ante o apresentado, denota-se que a indústria 4.0 apresenta-se como uma grande oportunidade para que indústrias explorem as novas ferramentas que são introduzidas no mercado, como forma de agilizar e facilitar processos, utilizando-se de procedimentos tecnológicos para a obtenção de melhores resultados e maior produtividade. Porém, no Brasil, ainda há muito o que ser desenvolvido no setor, para que o país se torne competitivo a nível global e, por tal motivo, grandes são as possibilidades de pesquisa para o mercado e, também, a qualificação dos profissionais será um diferencial de suma importância, não só para as indústrias, mas principalmente, para o país.

Neste ponto, é preciso enfatizar que não é possível a concretização deste ideal sem o estudo de metas, sem a adequação de abordagens e sem a sumária e efetiva dedicação para

o alcance deste objetivo. A implementação bem-sucedida de recursos tecnológicos depende de um planejamento cuidadoso e da capacidade de adaptar-se às mudanças no ambiente de negócios. Além disso, a tecnologia, por si só, não garante sucesso; é essencial alinhar a estratégia tecnológica com os objetivos de negócio e garantir que as soluções adotadas sejam consistentes e coerentes.

A adoção de tecnologias emergentes e inovadoras no ambiente industrial tem o potencial de transformar as relações comerciais e impulsionar uma revolução no setor. A integração bem-sucedida dessas tecnologias pode levar a melhorias significativas na eficiência e na produtividade, além de permitir a criação de novos modelos de negócio e oportunidades de mercado.

Dentro desse contexto, é importante mencionar que diversas ferramentas tecnológicas estão revolucionando o ambiente industrial e contribuindo para a transformação digital no setor. Entre essas inovações, destacam-se a Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), aprendizado de máquina, automação e robótica (SCHWAB, 2016). Além dessas, vale ressaltar o crescente interesse e aplicação de gêmeos digitais e sistemas PIMS, que também estão impulsionando mudanças significativas no setor industrial. Essas tecnologias permitem maior eficiência, produtividade e inovação, contribuindo para a evolução da indústria em direção à indústria 4.0 (LU, 2017). Nos próximos capítulos, abordaremos mais especificamente os gêmeos digitais e sistemas PIMS, demonstrando como eles se encaixam nesse panorama em constante transformação e suas implicações no mercado atual.

2.3 Sistemas PIMS

Os sistemas PIMS (Plant Information Management System) desempenham um papel fundamental no gerenciamento de informações e no suporte à tomada de decisões nos setores industriais. Esses sistemas são desenvolvidos para coletar, armazenar e analisar dados em tempo real, provenientes de várias fontes, como equipamentos, sensores e sistemas de controle (BARLOW, 1997). A adoção de sistemas PIMS é uma parte crucial da Indústria 4.0, pois permite que as empresas melhorem a eficiência operacional, reduzam custos e aprimorem a qualidade dos produtos e serviços.

Um dos principais benefícios dos sistemas PIMS é a capacidade de fornecer informações precisas e em tempo real sobre o desempenho das operações industriais. Com essa informação, as empresas podem identificar rapidamente áreas problemáticas e implementar soluções para melhorar a eficiência e reduzir custos (LI; ZHANG; WANG, 2018). Por exemplo, a análise dos dados coletados pelos sistemas PIMS pode ajudar a identificar gargalos no processo produtivo, permitindo a implementação de melhorias que aumentem a produção e reduzam o desperdício de recursos.

Além disso, os sistemas PIMS ajudam a melhorar a qualidade dos produtos e serviços ao monitorar continuamente os processos e identificar variações que possam comprometer a

qualidade. Através da análise de dados em tempo real, os sistemas PIMS permitem que as empresas ajustem rapidamente os parâmetros de produção para garantir a conformidade com os padrões de qualidade e reduzir a incidência de produtos defeituosos (CHEN et al., 2017). Isso resulta em menor quantidade de retrabalho e menos desperdício, levando a economias significativas de custos e melhorias na satisfação do cliente.

A adoção de sistemas PIMS também pode proporcionar melhorias na segurança e na conformidade com as regulamentações ambientais. Ao monitorar continuamente os níveis de emissões e consumo de energia, os sistemas PIMS podem ajudar as empresas a garantir que suas operações estejam em conformidade com as regulamentações e a identificar oportunidades para reduzir o impacto ambiental (ZHANG; VATRAPU; ZHU, 2019). Isso pode resultar em benefícios de longo prazo, como a redução de custos relacionados a multas e sanções por violações ambientais, bem como uma melhor reputação no mercado.

Em suma, a adoção de sistemas PIMS nos setores industriais tem o potencial de proporcionar uma série de benefícios significativos, incluindo melhorias na eficiência operacional, redução de custos e aprimoramento da qualidade dos produtos e serviços. À medida que a Indústria 4.0 avança, é provável que a importância dos sistemas PIMS continue a crescer, à medida que as empresas buscam tirar proveito das inovações tecnológicas para se manterem competitivas no mercado global.

2.3.1 Sistemas PIMS na Era da Indústria 4.0

Os sistemas PIMS atuam como uma ponte entre os sistemas de automação industrial e os sistemas de gerenciamento empresarial. Eles coletam, armazenam e analisam dados de produção, qualidade, energia e outros aspectos do processo industrial. Com a crescente demanda por maior eficiência, produtividade e flexibilidade na Indústria 4.0, a importância dos sistemas PIMS tem se tornado ainda mais evidente. Algumas das principais características dos sistemas PIMS na Indústria 4.0 incluem:

- **Integração de dados:** Os sistemas PIMS facilitam a integração de dados provenientes de diversas fontes, como sensores, controladores, dispositivos IoT e sistemas empresariais. Essa integração permite uma visão unificada e holística do processo industrial, proporcionando informações valiosas para tomada de decisão e otimização do processo.
- **Análise de dados em tempo real:** Com a Indústria 4.0, a necessidade de tomar decisões rápidas e bem fundamentadas se tornou mais crítica. Os sistemas PIMS são capazes de analisar dados em tempo real e fornecer informações relevantes para os tomadores de decisão, como alertas de desempenho, tendências e diagnósticos de falhas.
- **Otimização de processos:** A análise dos dados coletados pelos sistemas PIMS permite identificar gargalos e oportunidades de melhoria nos processos industriais. Essas informa-

ções podem ser usadas para otimizar a produção, reduzir custos e melhorar a qualidade dos produtos.

- **Suporte à manutenção preditiva:** Os sistemas PIMS podem ajudar a prever falhas em equipamentos e infraestruturas antes que elas ocorram, através do monitoramento contínuo de condições e análise de padrões de desempenho. Isso permite que as empresas realizem manutenções preventivas, reduzindo o tempo de inatividade não planejado e prolongando a vida útil dos equipamentos.
- **Integração com Gêmeos Digitais:** A combinação de sistemas PIMS com Gêmeos Digitais permite a simulação, monitoramento e otimização de processos industriais em um ambiente virtual. Isso possibilita a realização de testes e ajustes no modelo digital antes de aplicá-los à planta física, reduzindo riscos e custos associados às mudanças no processo.

2.3.2 Desafios e Oportunidades

A implementação dos sistemas PIMS na Indústria 4.0 apresenta diversos desafios e oportunidades. Entre eles, destaca-se a segurança de dados, que se torna uma prioridade devido à crescente quantidade de informações geradas e compartilhadas em ambientes industriais (CHEN et al., 2017). Os sistemas PIMS devem ser projetados para garantir a segurança e a privacidade das informações, protegendo-as contra violações e ataques cibernéticos.

Outro aspecto importante é a interoperabilidade entre diferentes sistemas e dispositivos, que é essencial para aproveitar ao máximo os benefícios dos sistemas PIMS na Indústria 4.0 (ZHANG; VATRAPU; ZHU, 2019). Isso inclui a adoção de padrões abertos e protocolos de comunicação, bem como a integração de sistemas legados.

Além disso, a implementação bem-sucedida de sistemas PIMS na Indústria 4.0 requer profissionais capacitados e treinados para gerenciar e operar essas soluções (CHEN et al., 2017). As empresas devem investir na capacitação e no treinamento de seus funcionários para garantir que possam extrair o máximo valor dos sistemas PIMS e das tecnologias associadas.

A adoção de sistemas PIMS e outras tecnologias da Indústria 4.0 implica em mudanças na cultura organizacional e na mentalidade dos colaboradores (ZHANG; VATRAPU; ZHU, 2019). As empresas devem promover uma cultura de inovação e adaptação, encorajando a adoção de novas tecnologias e a colaboração entre diferentes departamentos e equipes.

Por fim, a implementação de sistemas PIMS na Indústria 4.0 exige investimento em tecnologia e infraestrutura, como redes de comunicação, servidores e dispositivos IoT (CHEN et al., 2017). As empresas devem avaliar cuidadosamente os custos e benefícios associados a esses investimentos para garantir um retorno apropriado e sustentável.

Em resumo, os sistemas PIMS desempenham um papel fundamental na Indústria 4.0, possibilitando a integração e análise de dados em tempo real e a otimização de processos

industriais (LI; ZHANG; WANG, 2018). Embora a implementação desses sistemas apresente desafios, as oportunidades e benefícios oferecidos por eles são significativos e podem impulsionar a eficiência, a produtividade e a inovação no ambiente industrial.

2.4 Gêmeos Digitais nos Setores Industriais

Gêmeos digitais têm se tornado cada vez mais prevalentes em diversos setores industriais, servindo como uma importante ferramenta para otimização de processos, manutenção preditiva e desenvolvimento de produtos. Essa tecnologia permite a criação de réplicas virtuais de ativos físicos, processos e sistemas, possibilitando simulações, análises e monitoramento em tempo real (GRIEVES, 2014).

A indústria 4.0 é caracterizada pela integração de tecnologias digitais e físicas, e os gêmeos digitais desempenham um papel fundamental nesse contexto. Através da criação de gêmeos digitais, as empresas podem obter informações valiosas sobre o desempenho, a eficiência e a confiabilidade de seus ativos e processos (TAO; QI, 2018). Isso pode levar a melhorias significativas na eficiência operacional, redução de custos e maior competitividade no mercado.

Além disso, os gêmeos digitais facilitam a comunicação e a colaboração entre diferentes equipes e departamentos dentro de uma organização. Com acesso a informações detalhadas e atualizadas sobre ativos e processos, as equipes podem trabalhar juntas de maneira mais eficiente para identificar problemas, desenvolver soluções e implementar melhorias (ROSENBERG et al., 2019).

Outra aplicação importante dos gêmeos digitais nos setores industriais é na manutenção preditiva. Através do monitoramento contínuo e da análise de dados em tempo real, os gêmeos digitais podem ajudar a identificar sinais de desgaste e falhas em potencial antes que causem danos significativos ou tempo de inatividade não planejado (QI; TAO, 2018). Isso pode resultar em economias consideráveis de custos e aumento da segurança.

Os gêmeos digitais também podem ser usados para acelerar e aprimorar o processo de desenvolvimento de produtos. Através da criação de gêmeos digitais de produtos em desenvolvimento, as empresas podem realizar simulações e análises detalhadas, permitindo a detecção de falhas e a otimização do projeto antes mesmo da fabricação de protótipos físicos (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017a).

2.4.1 Gêmeos Digitais e a Indústria 4.0

Os gêmeos digitais são modelos virtuais de processos, produtos ou sistemas que espelham suas contrapartes físicas em tempo real (GRIEVES, 2014; TAO; QI, 2018). Eles podem ser utilizados para simular e monitorar o desempenho dos ativos, bem como para identificar problemas e oportunidades de melhoria. Combinando essas capacidades com as demais tecnologias da

Indústria 4.0, como a Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e Big Data, os gêmeos digitais possibilitam a criação de fábricas inteligentes, que são capazes de se adaptar às mudanças do mercado e às necessidades dos clientes de maneira eficiente e econômica (GLAESSGEN; STARGEL, 2012; QI; TAO, 2018).

2.4.2 Benefícios

A aplicação dos gêmeos digitais no contexto da Indústria 4.0 traz uma série de benefícios, como:

- **Otimização do projeto e desenvolvimento de produtos:** Os gêmeos digitais permitem a realização de simulações e análises detalhadas, possibilitando a detecção de falhas e a otimização do projeto antes da fabricação de protótipos físicos (ROSENBERG et al., 2019). Isso resulta em redução de tempo e custo no processo de desenvolvimento e aumenta a qualidade e confiabilidade dos produtos.
- **Melhoria da eficiência operacional:** Através do monitoramento e análise do desempenho dos ativos em tempo real, os gêmeos digitais possibilitam a identificação de problemas e oportunidades de melhoria, permitindo ajustes rápidos e eficientes nos processos produtivos (TAO; QI, 2018; NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017a). Isso leva a uma maior eficiência operacional e redução de custos.
- **Manutenção preditiva:** A capacidade de monitorar e analisar o desempenho dos ativos ao longo do tempo permite que as organizações identifiquem tendências e padrões que podem ser usados para otimizar a manutenção e prolongar a vida útil dos equipamentos (ROSENBERG et al., 2019). A manutenção preditiva baseada em gêmeos digitais pode evitar paradas não planejadas e reduzir os custos de manutenção.
- **Integração e colaboração entre departamentos:** Os gêmeos digitais facilitam a comunicação e a colaboração entre diferentes departamentos e disciplinas dentro de uma organização, permitindo a troca eficiente de informações e a tomada de decisões mais informadas e precisas (GRIEVES, 2014). Isso resulta em uma melhor coordenação e eficiência geral na empresa.

2.4.3 Desafios

Apesar dos benefícios significativos proporcionados pelos gêmeos digitais no contexto da Indústria 4.0, também há desafios que precisam ser enfrentados para uma implementação bem-sucedida:

- **Investimento em tecnologia e infraestrutura:** A implementação de gêmeos digitais requer investimentos consideráveis em tecnologia e infraestrutura, incluindo hardware, soft-

ware e conexões de rede de alta velocidade (SCHROEDER et al., 2016). Isso pode ser um obstáculo para algumas organizações, especialmente as de menor porte ou com recursos limitados.

- **Integração e interoperabilidade:** Para funcionar efetivamente, os gêmeos digitais devem ser capazes de se comunicar e interagir com outros sistemas e dispositivos dentro da organização (GRIEVES, 2014). Isso pode ser um desafio, especialmente em ambientes industriais com sistemas legados e diferentes padrões de comunicação.
- **Segurança cibernética:** A troca e o armazenamento de informações críticas nos gêmeos digitais podem ser vulneráveis a violações e ataques cibernéticos (LU; HUANG; ZHANG, 2018). Garantir a segurança dos dados e a privacidade é fundamental para proteger a propriedade intelectual e evitar interrupções na produção.

Embora os gêmeos digitais já estejam sendo amplamente adotados em diversos setores industriais, ainda há muito espaço para crescimento e evolução dessa tecnologia. À medida que a indústria 4.0 continua a se desenvolver, é provável que os gêmeos digitais se tornem ainda mais sofisticados e integrados, permitindo novas e inovadoras aplicações em diferentes setores.

2.5 Integração entre Gêmeos Digitais e Sistemas PIMS

A integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS desempenha um papel fundamental no avanço industrial, especialmente no contexto da Indústria 4.0. Essa integração permite que as organizações aproveitem o melhor de ambas as tecnologias, melhorando a eficiência, a produtividade e a inovação em suas operações.

A combinação dos dois fornece uma visão abrangente e em tempo real do desempenho dos ativos e processos industriais, permitindo uma tomada de decisões informadas e baseadas em dados, reduzindo a dependência de suposições e intuição (GRIEVES, 2014; GLAESSGEN; STARGEL, 2012). Essa tomada de decisões aprimorada resulta em melhor alocação de recursos, maior eficiência operacional e redução de riscos associados a erros e falhas no processo.

Além disso, a integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS permite que as organizações identifiquem áreas de melhoria em seus processos e ativos industriais (TAO; QI, 2018; QI; TAO, 2018). Ao utilizar simulações e análises de dados em tempo real, é possível detectar ineficiências, gargalos e falhas em potencial, o que pode levar a intervenções mais rápidas e eficientes. Essa integração também ajuda a otimizar a manutenção, identificando tendências e padrões que podem ser usados para prolongar a vida útil dos equipamentos e prevenir falhas inesperadas (ROSENBERG et al., 2019).

Através destes sistemas, as organizações podem reduzir os custos e o tempo associados ao desenvolvimento e implementação de novos produtos e processos (NEGRI; FUMAGALLI;

MACCHI, 2017a). A capacidade de simular e testar virtualmente projetos e processos antes de sua implantação física permite identificar e corrigir problemas antecipadamente, evitando retrabalhos e desperdícios de recursos. Além disso, a integração dessas tecnologias auxilia na detecção precoce de falhas, o que pode levar a uma redução significativa nos custos de manutenção e reparo (ROSENBERG et al., 2019).

A integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS também estimula a inovação e a competitividade no ambiente industrial (SCHROEDER et al., 2016). Ao aproveitar as vantagens oferecidas por essas tecnologias, as organizações podem desenvolver e implementar soluções mais avançadas e eficientes, o que as diferencia de seus concorrentes. A adoção dessas tecnologias permite que as empresas se adaptem rapidamente às mudanças nas demandas do mercado e às evoluções tecnológicas, mantendo-se à frente da concorrência (GRIEVES, 2014; SCHROEDER et al., 2016).

Por fim, esta integração contribui para a melhoria da segurança e da sustentabilidade no ambiente industrial (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017a). Ao monitorar e analisar o desempenho dos ativos e processos em tempo real, as organizações podem identificar e corrigir problemas potenciais antes que causem acidentes ou danos ao meio ambiente. Além disso, a otimização dos processos e a redução do desperdício de recursos, proporcionada pela integração dessas tecnologias, promove práticas mais sustentáveis e eficientes no uso de energia e matéria-prima (ROSENBERG et al., 2019).

Em resumo, a integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS desempenha um papel fundamental no avanço da Indústria 4.0, possibilitando a análise e otimização de processos industriais em tempo real. Essa integração melhora a tomada de decisões, otimiza processos e manutenção, reduz custos e tempo de desenvolvimento, estimula a inovação e competitividade e contribui para a melhoria da segurança e sustentabilidade no ambiente industrial. Embora a implementação dessa integração apresente desafios, as oportunidades e benefícios oferecidos por ela são significativos e podem impulsionar a eficiência, a produtividade e a inovação no setor industrial.

2.5.1 Desafios da Integração

Embora a integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS ofereça inúmeros benefícios, também enfrenta desafios significativos. Um desses desafios é a complexidade de criar um ambiente virtual completamente aderente ao ambiente físico, considerando a precisão e a fidelidade necessárias para a simulação eficaz dos processos e ativos industriais (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017a). Erros ou imprecisões no modelo digital podem levar a resultados incorretos e, conseqüentemente, a decisões inadequadas.

Além disso, a integração bem-sucedida entre gêmeos digitais e sistemas PIMS exige a colaboração de várias disciplinas e departamentos dentro de uma organização (GRIEVES, 2014).

Esse processo pode ser particularmente desafiador em organizações maiores e mais complexas, onde a comunicação entre diferentes áreas pode ser menos eficiente, e a resistência à mudança pode ser maior.

Outro desafio é a necessidade de investimento em tecnologia e infraestrutura para suportar a implementação e a operação dessas soluções (SCHROEDER et al., 2016). Esse investimento pode ser significativo, especialmente para organizações menores ou com recursos limitados. Além disso, o desenvolvimento e a manutenção de gêmeos digitais e sistemas PIMS integrados exigem profissionais altamente qualificados, o que pode ser um obstáculo adicional para algumas empresas (GRIEVES, 2014).

A segurança dos dados e a privacidade também representam desafios importantes na integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS. A troca e o armazenamento de informações críticas, incluindo dados sensíveis e propriedade intelectual, podem ser vulneráveis a violações e ataques cibernéticos (LU; HUANG; ZHANG, 2018). Garantir a segurança desses dados é fundamental, mas pode ser uma tarefa complexa e dispendiosa.

Esses desafios, no entanto, podem ser superados com planejamento adequado, investimento e adaptação por parte das organizações. E, apesar dos desafios, as oportunidades e benefícios oferecidos pela integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS são significativos e podem impulsionar a eficiência, a produtividade e a inovação no setor industrial.

2.5.2 Exemplos Práticos

A seguir, serão apresentados exemplos práticos de como essa integração já está ocorrendo ou pode ocorrer no futuro em diversos setores industriais, como automobilístico, aeroespacial, energético, saúde e manufatura. À medida que a indústria 4.0 continua a evoluir, é provável que essa integração se torne ainda mais difundida e sofisticada, trazendo benefícios significativos em termos de eficiência, produtividade e inovação para as empresas e a sociedade como um todo.

Neste capítulo, abordaremos exemplos práticos de como a integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS tem sido aplicada em diversos setores, demonstrando seu potencial para otimizar processos, melhorar a eficiência e reduzir custos. Esses exemplos ilustram a versatilidade e a aplicabilidade dessas tecnologias em diferentes contextos, evidenciando seu papel fundamental na transformação digital das indústrias. A seguir, apresentamos exemplos de integração em sete setores distintos:

- **Setor automobilístico:** A indústria automobilística tem sido um dos setores que mais se beneficiaram com a integração de gêmeos digitais e sistemas PIMS. Através da criação de gêmeos digitais dos veículos em desenvolvimento, as empresas podem realizar simulações e análises detalhadas, permitindo a detecção de falhas e a otimização do projeto antes mesmo da fabricação de protótipos físicos. Além disso, os sistemas PIMS possibilitam o

acompanhamento em tempo real do desempenho da planta, permitindo ajustes rápidos e eficientes nos processos de produção (NEGRI; FUMAGALLI; MACCHI, 2017b).

- **Setor aeroespacial:** A integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS também tem sido aplicada no setor aeroespacial, possibilitando o desenvolvimento de aeronaves e componentes com maior eficiência e menor custo. Através do uso de gêmeos digitais, as empresas podem realizar testes virtuais para validar a funcionalidade e a durabilidade dos componentes, reduzindo assim o tempo e o custo associados aos testes físicos. Já os sistemas PIMS auxiliam na gestão das informações da planta, possibilitando o monitoramento e a otimização dos processos produtivos (ROSEN et al., 2016).
- **Setor energético:** No setor energético, a integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS tem sido utilizada para otimizar a produção e distribuição de energia, principalmente em usinas de energia renovável, como parques eólicos e usinas solares. Através da criação de gêmeos digitais das instalações, é possível simular diferentes cenários e condições, permitindo a identificação de oportunidades de melhoria e a otimização do desempenho. Os sistemas PIMS, por sua vez, auxiliam na coleta e análise de dados em tempo real, possibilitando ajustes rápidos e eficientes na operação das usinas (GLAESSGEN; STARGEL, 2018).
- **Setor de saúde:** Embora ainda em estágios iniciais, a integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS no setor de saúde tem potencial para revolucionar a forma como os tratamentos médicos são desenvolvidos e aplicados. A criação de gêmeos digitais de pacientes, por exemplo, pode possibilitar a simulação de tratamentos e intervenções médicas de maneira personalizada, permitindo aos profissionais de saúde identificar as abordagens mais eficazes para cada caso específico. Além disso, os sistemas PIMS podem auxiliar no gerenciamento e na análise de informações médicas em hospitais e outras instituições de saúde, melhorando a qualidade dos serviços prestados e a eficiência dos processos internos (MCGOUGH et al., 2019).
- **Setor de manufatura:** A integração de gêmeos digitais e sistemas PIMS na manufatura tem sido essencial para o desenvolvimento de fábricas inteligentes e altamente eficientes. Os gêmeos digitais de produtos e processos permitem a simulação e a otimização das etapas de fabricação, reduzindo o tempo de desenvolvimento e minimizando a necessidade de retrabalho. Já os sistemas PIMS possibilitam o monitoramento em tempo real de informações sobre a produção, o desempenho dos equipamentos e a qualidade dos produtos, possibilitando ajustes rápidos e eficientes para garantir a máxima eficiência operacional (TAO et al., 2018).

2.6 Visão Geral

Esta revisão bibliográfica apresentou diversos aspectos da integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS no contexto da Indústria 4.0. Ao longo dos capítulos, discutimos os fundamentos da Indústria 4.0, o papel dos gêmeos digitais e sistemas PIMS e como essas tecnologias estão sendo aplicadas em diferentes setores industriais.

Foi abordado a evolução histórica e conceitual da Indústria 4.0, destacando os principais componentes e tecnologias que a compõem. Nesse contexto, gêmeos digitais e sistemas PIMS foram identificados como tecnologias-chave para o avanço da indústria moderna.

Foi discutido a integração tecnológica no ambiente industrial, salientando as particularidades do cenário brasileiro e a importância da adoção das tecnologias da Indústria 4.0 para melhorar a competitividade e produtividade. Também foram apresentadas as iniciativas e desafios para a implementação dessas tecnologias no Brasil.

Foi explorado a integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS em diferentes setores industriais, apresentando exemplos práticos de como essa integração já está ocorrendo ou pode ocorrer no futuro. Este capítulo evidenciou o potencial das tecnologias de gêmeos digitais e sistemas PIMS para otimizar processos, reduzir custos e melhorar a eficiência operacional.

Em conclusão, foi destacado a importância da integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS no contexto da Indústria 4.0 e seus impactos na transformação das práticas industriais. As tecnologias da Indústria 4.0, incluindo gêmeos digitais e sistemas PIMS, têm o potencial de revolucionar a forma como as indústrias operam e competem no mercado global. É fundamental que as organizações estejam atentas às tendências e desenvolvam estratégias para aproveitar as oportunidades que essas tecnologias oferecem.

Ao considerar todos os benefícios e avanços proporcionados pela integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS, fica evidente que essa combinação é fundamental para o sucesso e crescimento das organizações industriais. No contexto atual da Indústria 4.0, essa integração possibilita não apenas a otimização e eficiência dos processos, mas também promove inovação e competitividade, permitindo que as empresas se adaptem e prosperem em um ambiente em constante evolução. Com o avanço contínuo das tecnologias e a crescente demanda por soluções mais inteligentes e sustentáveis, é essencial que as organizações busquem a integração e a adoção desses sistemas para se manterem relevantes e bem-sucedidas no cenário industrial.

Embora esta revisão bibliográfica tenha proporcionado uma visão geral sobre o tema, é importante reconhecer que a pesquisa na área de integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS é um campo em constante evolução. Portanto, novos estudos e aplicações práticas continuarão a enriquecer o conhecimento e compreensão sobre o assunto, auxiliando as indústrias na busca pela inovação e excelência operacional.

3 Metodologia

A metodologia adotada neste projeto teve como base o desenvolvimento e implementação de um experimento composto por duas bancadas de teste. Estas bancadas foram fundamentais para a coleta e análise qualitativa dos dados gerados por um braço robótico. A primeira, uma bancada física, foi composta pelo próprio braço robótico, enquanto a segunda, uma bancada virtual, foi construída como o gêmeo digital do braço robótico na plataforma Unity. O principal objetivo dessa metodologia experimental foi a preparação e configuração de ambos os ambientes, físico e virtual, de modo que os dados coletados estivessem estruturados e prontos para futura integração com um sistema PIMS.

Nessa metodologia, a ênfase foi dada para garantir que a coleta de dados fosse conduzida de forma eficiente e adequada nas duas bancadas. A conclusão bem-sucedida desta etapa prepara o terreno para uma futura continuação do projeto, que permitirá a realização de uma análise qualitativa da precisão e eficiência do gêmeo digital. Essa investigação subsequente permitirá melhorar o desempenho e a compreensão do braço robótico físico e auxiliará no aprimoramento das estratégias de integração entre os sistemas PIMS e gêmeos digitais.

3.1 Implementação do Braço Robótico Físico

A implementação do braço robótico físico e sua integração com o sistema de controle e aquisição de dados envolveu várias etapas, desde a montagem mecânica até a configuração e adaptação de códigos em Arduino e Python. Este capítulo descreve as etapas seguidas para montar o braço robótico, o processo de montagem da bancada de protoboard, bem como as modificações realizadas no código Arduino e o desenvolvimento do código Python para coleta de dados no computador.

3.1.1 Montagem do Braço Robótico

O braço robótico físico, disponível em forma de um kit de mercado, foi montado utilizando peças em MDF, servomotores e parafusos. Seguiu-se à risca as instruções fornecidas pelo manual do fabricante, detalhando cada passo para a montagem dos componentes. A estrutura é composta por uma base, que permite a rotação horizontal, um ombro, um cotovelo e uma garra, garantindo movimentos em diversas direções. A representação da estrutura montada é ilustrada na Figura 1."

3.1.2 Montagem da Bancada de Protoboard

A bancada de protoboard foi montada com quatro potenciômetros, cada um responsável pelo controle de uma das quatro juntas do braço robótico. Os potenciômetros foram conectados

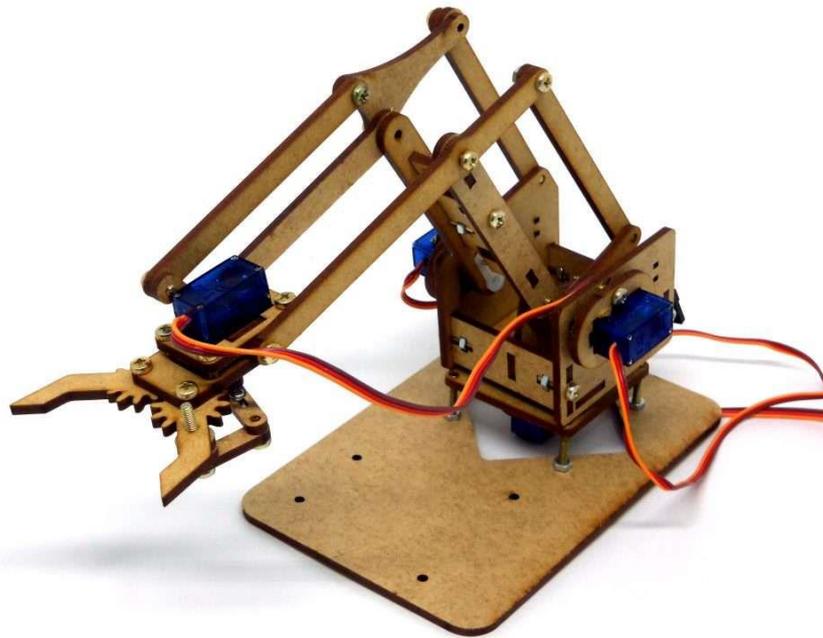


Figura 1 – Braço Robótico MDF.

aos pinos analógicos do Arduino, permitindo a leitura dos valores e o controle dos servomotores correspondentes. Dessa forma, cada potenciômetro atuava diretamente na movimentação de uma das partes do braço robótico. O diagrama da montagem é ilustrado na Figura 2.

3.1.3 Desenvolvimento do Código Arduino

O código inicial em Arduino, fornecido pelo manual do fabricante, foi adaptado para enviar dados pela porta serial. As mudanças incluem a adição de um bloco condicional para verificar se os valores dos potenciômetros mudaram, e caso haja mudança, o código envia os dados pela porta serial com o nome da junta, o tempo em milissegundos e o valor do ângulo. A adição dessas mudanças permitiu a coleta de dados no computador para análise posterior.

3.1.4 Desenvolvimento do Código Python

Um código Python foi desenvolvido para ler os dados enviados pelo Arduino através da porta serial. O código utiliza a biblioteca `serial` para estabelecer comunicação com o Arduino. Quando o script é executado, ele cria um arquivo no formato de texto e armazena os dados recebidos do Arduino, incluindo o nome da junta, o carimbo de data/hora e o valor do ângulo.

O código Python também permite a interrupção do script pressionando 'q' e 'Enter', encerrando a coleta de dados e salvando o arquivo de texto. Essa abordagem permite a coleta de dados de maneira eficiente e em tempo real, possibilitando a análise e a compreensão do desempenho do braço robótico durante seu funcionamento.

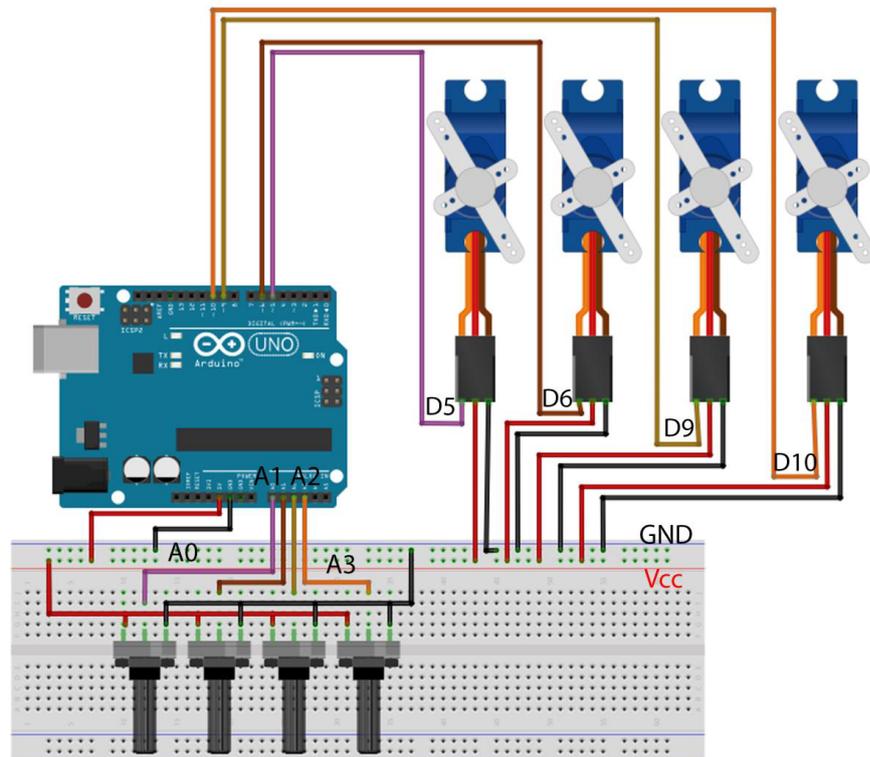


Figura 2 – Diagrama do circuito.

3.1.5 Testes e Validação

A montagem do braço robótico, juntamente com a implementação dos códigos em Arduino e Python, precedeu uma série de testes destinados à validação do funcionamento geral do sistema. Esses testes envolveram a operação do braço robótico por meio dos potenciômetros da bancada de protoboard, enquanto o código Python era responsável pela coleta dos dados de posição das juntas e seu armazenamento em um arquivo de texto.

A etapa de testes trouxe à tona desafios oriundos da montagem e do desgaste do braço robótico, este último, agravado pela idade avançada do equipamento. O sistema montado em protoboard revelou interferências indesejáveis, que geraram imprecisões nas operações das juntas. Estas foram exacerbadas pelo uso de jumpers, comumente associados à ocorrência de falhas de conexão e mal-contato, comprometendo a estabilidade da montagem.

O braço robótico, cuja aquisição data de mais de cinco anos atrás, demonstrou sinais evidentes de desgaste natural em suas peças de MDF e parafusos. Essa condição resultou em irregularidades na operação do dispositivo, manifestadas por meio de instabilidade nos movimentos e ocasional desprendimento de componentes. A questão foi especialmente notória quando as peças "agarravam" durante o movimento, fazendo com que o servo motor tentasse girar sem sucesso. A Figura 3 ilustra o braço robótico e o circuito montados.

Na tentativa de remediar as limitações identificadas, o sistema foi meticulosamente

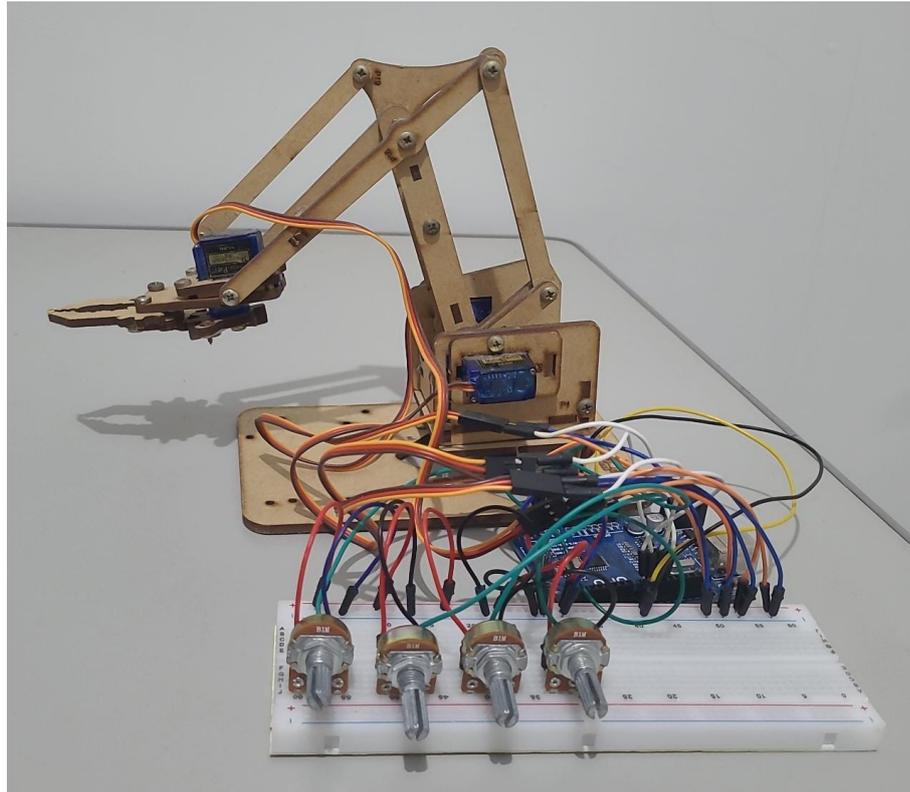


Figura 3 – Braço Robótico e Bancada de Protoboard durante os testes.

ajustado. A montagem do braço robótico foi realizada de forma criteriosa, com a verificação minuciosa de todos os encaixes e jumpers. Observou-se, ainda, que o script Python coletava uma quantidade insatisfatória de dados. Diante disso, foram realizadas alterações no código, incluindo a utilização da biblioteca `threading` para permitir a leitura de dados em uma thread separada, otimizando a eficiência na coleta de dados.

A despeito dos desafios encontrados, a combinação de controle e monitoramento eficiente do braço robótico, juntamente com a coleta de dados necessários, culminou em um projeto de sucesso. A análise qualitativa dos dados coletados, embora limitada, possibilitou a observação do comportamento do braço robótico, bem como a identificação de possíveis melhorias no sistema. Esta etapa enfatizou a importância de estar preparado para lidar com contratemplos e buscar soluções inovadoras que garantam a qualidade e a eficácia do projeto.

3.2 Desenvolvimento do Gêmeo Digital no Unity

O objetivo desta seção é descrever o processo de desenvolvimento do gêmeo digital do braço robótico utilizando o software Unity. O processo envolveu a medição das peças do braço robótico, a modelagem 3D das peças, a exportação das peças para o Unity, a criação de scripts para controle das juntas e a implementação de um script para registro dos dados das rotações das juntas.

3.2.1 Modelagem 3D

O primeiro passo para o desenvolvimento do gêmeo digital foi a medição das dimensões das peças mais importantes do braço robótico. Essas medições foram realizadas com o objetivo de obter as dimensões exatas das peças para garantir que o modelo digital fosse o mais próximo possível do braço robótico físico.

Após a medição das peças, a modelagem 3D foi realizada no software Autodesk Inventor. As peças foram modeladas de maneira otimizada, removendo elementos que eram necessários apenas para a versão física do braço robótico. Com a modelagem completa, as peças foram exportadas para o software Unity para serem utilizadas na simulação. A Figura 4 ilustra o braço robótico modelado na cena do Unity.

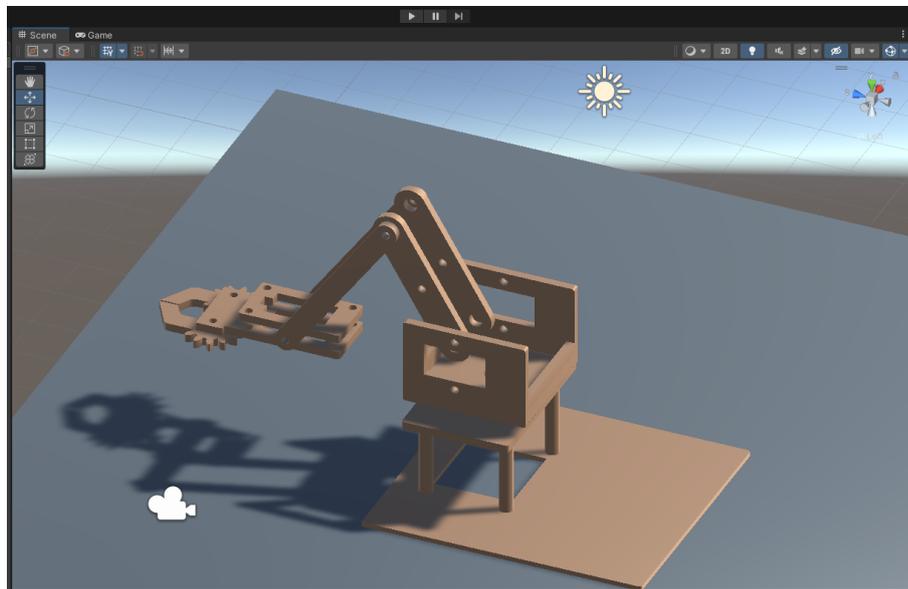


Figura 4 – Braço robótico no Unity na posição inicial, antes de iniciar a simulação.

3.2.2 Importação e Estruturação das Peças no Unity

Ao importar as peças modeladas no Unity, elas foram organizadas e estruturadas na cena de forma a montar o braço robótico digital. Foram adicionadas juntas às peças, permitindo a simulação de movimentos e a interação entre as partes do braço robótico. Neste ponto, a base, o ombro, o cotovelo e a garra do braço robótico estavam devidamente conectados e prontos para serem controlados.

3.2.3 Implementação dos Scripts de Controle das Juntas

Para controlar as juntas do braço robótico no Unity, foram desenvolvidos quatro scripts em C#. Cada script é responsável por controlar uma das juntas. Os scripts permitem a rotação

das juntas por meio das teclas do teclado. As setas direita e esquerda controlam a base, enquanto as setas para cima e para baixo controlam o ombro. Ao segurar a tecla espaço, as setas para cima e para baixo controlam o cotovelo, enquanto as setas direita e esquerda controlam a abertura e o fechamento da garra. Dois momentos distintos da simulação são ilustrados na Figura 5 e na Figura 6.

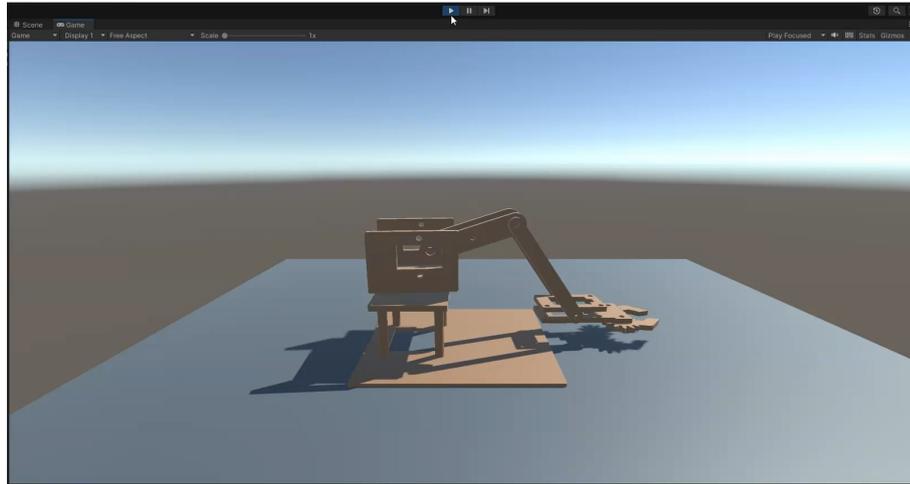


Figura 5 – Braço robótico no Unity durante a simulação.

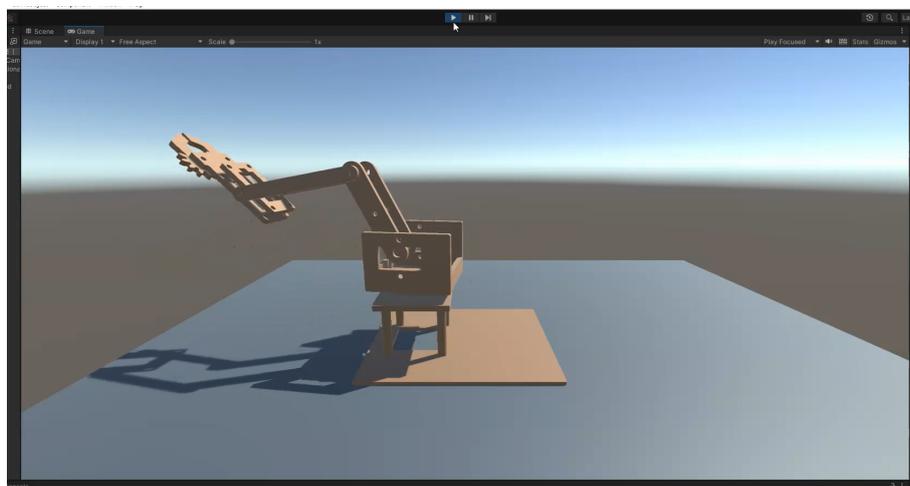


Figura 6 – Braço robótico no Unity durante a simulação.

3.2.4 Implementação do Registro dos Dados

Para coletar os dados das rotações das juntas, foi desenvolvido um script em C# que registra os dados em graus das rotações e os armazena em um arquivo .txt. O script, apresentado na seção anterior, realiza a leitura das rotações das juntas e, em seguida, escreve os dados em um arquivo de texto com informações sobre o nome da junta, a data e a hora da rotação e o ângulo da rotação.

3.3 Coleta dos Dados para Integração

A proposta inicial deste projeto era integrar os dados coletados pelo braço robótico físico e pelo gêmeo digital em um sistema PIMS, a fim de facilitar a análise e comparação desses dados, porém, devido a questões de licença, não foi possível obter acesso a tal sistema.. Essa integração proporcionaria um gerenciamento e visualização mais eficiente das informações obtidas, permitindo um estudo aprofundado do comportamento tanto do braço robótico quanto do gêmeo digital.

Independentemente da plataforma utilizada para a coleta e análise dos dados, o braço robótico físico e o gêmeo digital foram projetados para armazenar as informações de maneira otimizada para um sistema PIMS. Os dados armazenados incluem o valor, o nome da junta e o registro de data e hora (Timestamp), garantindo assim a compatibilidade de integração.

Os dados coletados estão prontos para serem integrados a um sistema PIMS, e a saída de dados foi configurada justamente para facilitar essa integração. Um método possível para essa incorporação é o Universal File Loading (UFL), que permite carregar as informações de arquivos de forma eficiente e automatizada.

Em um ambiente industrial, também é possível desenvolver e implementar diferentes métodos para coletar dados pelo sistema PIMS, além do UFL. Alguns desses métodos incluem:

- **OPC (Object Linking and Embedding for Process Control)**: um protocolo padrão para comunicação entre dispositivos de automação industrial e sistemas de supervisão e controle;
- **APIs (Application Programming Interfaces)**: interfaces de programação que facilitam a integração de dados entre diferentes softwares e plataformas;
- **Banco de dados**: conexões diretas com bancos de dados, como SQL ou Oracle, para inserir e extrair informações em tempo real.
- **MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)**: um protocolo de mensagens leve e de baixa largura de banda, projetado para comunicação em dispositivos de Internet das Coisas (IoT) e sistemas de automação industrial.

Essas experiências e desafios enfrentados durante a coleta de dados serviram como lições valiosas, reforçando a importância de se adaptar a situações imprevistas e encontrar soluções criativas para garantir a qualidade e eficácia do projeto, mesmo em ambientes industriais complexos e dinâmicos.

4 Desenvolvimento e Resultados

Os resultados obtidos neste projeto são importantes para demonstrar a viabilidade e o sucesso na criação das duas bancadas e na preparação dos dados para integração com um sistema de gerenciamento de informações de processo (PIMS). Ao longo do desenvolvimento do projeto, foi possível superar desafios e limitações, permitindo a coleta de dados tanto do braço robótico físico quanto do gêmeo digital.

4.1 Desenvolvimento, Coleta e Análise de Dados nas Bancadas

Nesta seção, é discutido o desenvolvimento das bancadas, a coleta de dados e a análise dos resultados obtidos no braço robótico físico e no gêmeo digital. A montagem do braço robótico físico em uma bancada de protoboard e a criação do gêmeo digital no ambiente Unity foram bem-sucedidas, apesar das limitações encontradas. Isso possibilitou o controle e a coleta de dados das juntas do braço robótico e de seu gêmeo digital de forma eficaz.

A coleta de dados do braço robótico físico enfrentou desafios relacionados à interferência e precisão, mas forneceu informações importantes sobre o funcionamento das juntas e a resposta dos servomotores. Além disso, a criação do gêmeo digital no Unity permitiu uma simulação detalhada e precisa do braço robótico, facilitando a coleta e validação dos dados.

Para ilustrar os resultados alcançados e comparar o desempenho do braço robótico físico e do gêmeo digital, dois gráficos de linhas foram criados, um para cada sistema. Os gráficos apresentam quatro linhas, uma para cada junta, mostrando a variação do ângulo em graus em relação ao tempo.

A análise dos gráficos (Figura 7 e Figura 8) revela a evolução dos ângulos das juntas ao longo do tempo para ambos os sistemas. Esta análise valida o funcionamento das juntas e identifica oportunidades de aprimoramento e ajustes, tais como otimizar os tempos de resposta dos servomotores e aprimorar os códigos de controle e coleta de dados.

Ao observar os gráficos, uma diferença significativa entre os resultados é notável. No gráfico do braço virtual, os valores estão em maior consonância com os movimentos realizados, sugerindo que a coleta de dados foi eficaz. No entanto, no gráfico do braço físico, os dados não refletem de forma precisa os movimentos esperados, provavelmente devido à interferências, como mal contato do circuito, e à resposta inadequada dos servomotores ao sinal enviado pelo Arduino. Ainda assim, destaca-se que os valores registrados são os medidos diretamente pelo potenciômetro. Em sistemas com melhor controle, com sensores e atuadores mais confiáveis, a

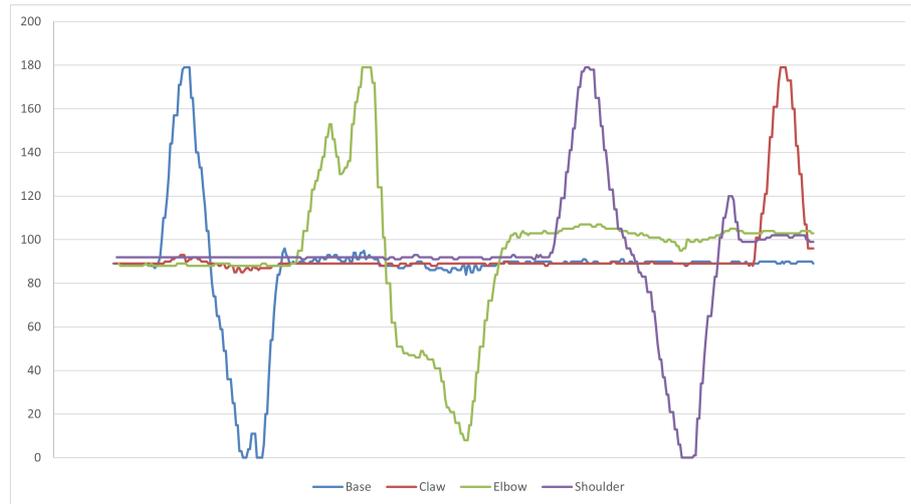


Figura 7 – Gráfico de linhas das juntas do braço robótico físico.

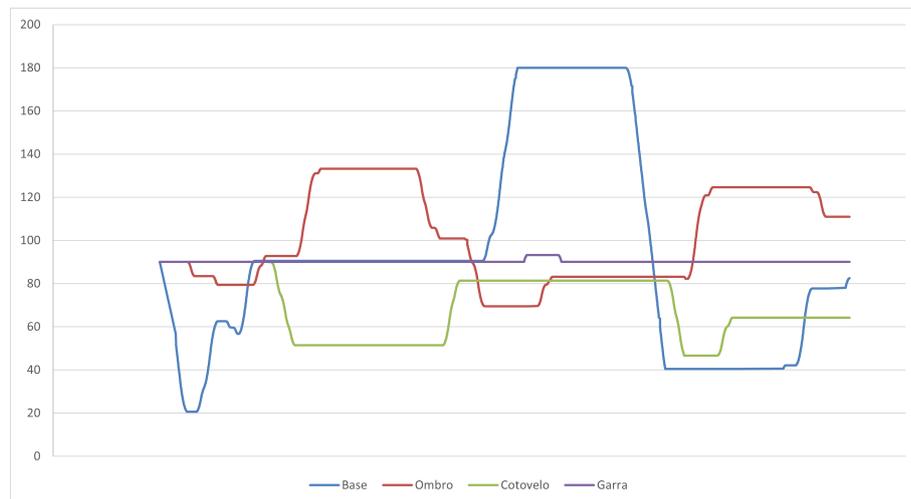


Figura 8 – Gráfico de linhas das juntas do gêmeo digital.

integração é facilitada.

Este quadro demonstra que a metodologia adotada para coleta e análise de dados das juntas do braço robótico físico e do gêmeo digital foi efetiva. Contudo, melhorias no sistema físico são necessárias, como aperfeiçoar o contato dos circuitos e utilizar servomotores e sensores de qualidade superior, para assegurar uma coleta de dados mais fidedigna e facilitar a integração entre os sistemas.

Porém, além de focar no aperfeiçoamento do sistema físico, é fundamental também dedicar tempo de estudo e desenvolvimento para replicar com precisão no gêmeo digital o comportamento da parte física, levando em conta todas as suas imperfeições e interferências. Este passo é crucial para aprimorar a simulação e tornar o gêmeo digital ainda mais realista.

A integração bem-sucedida entre o braço robótico físico e o gêmeo digital validou o

desempenho das juntas e forneceu informações valiosas para futuras melhorias e ajustes nos sistemas. A expectativa é de que, com aprimoramentos contínuos, a coleta de dados se torne ainda mais precisa e confiável, aumentando a eficiência e eficácia no controle e operação dos sistemas robóticos.

Resumidamente, a comparação entre os resultados do braço robótico físico e do gêmeo digital enfatizou a importância de uma abordagem integrada e a necessidade de investir em componentes de melhor qualidade para garantir a precisão na coleta de dados.

4.2 Preparação de Dados para Integração com um Sistema PIMS e Além

Este projeto se propôs a facilitar a coleta de dados das bancadas e prepará-los para integração com um sistema PIMS, contribuindo significativamente para a eficiência e eficácia dos processos industriais. Dados obtidos tanto do braço robótico físico quanto do gêmeo digital foram devidamente coletados, organizados e formatados. As informações incluíam valor, nome da junta, e registro de data e hora (Timestamp), a fim de atender às especificações necessárias para a interoperabilidade com um sistema PIMS.

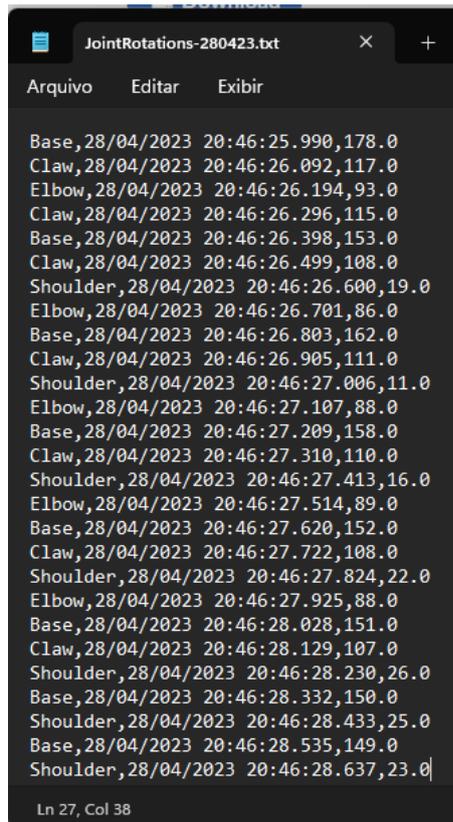
Essa organização meticulosa não apenas garante a compatibilidade com um sistema PIMS, mas também facilita a análise subsequente e a comparação dos dados no ambiente industrial, aumentando a eficiência do processo e fornecendo uma visão detalhada para futuros aprimoramentos.

A Figura 9 ilustra como os dados estão sendo registrados para ambas as bancadas. Esta visualização fornece uma visão clara da estrutura de dados organizada e formatada corretamente, preparada para integração com um sistema de gerenciamento de informações de processo.

Apesar da implementação de um servidor de sistema PIMS não ter sido realizada durante a execução deste projeto, os dados coletados estão preparados para tal integração. O método Universal File Loading (UFL), conhecido por sua eficiência e compatibilidade com arquivos gerados por uma gama diversificada de programas, pode ser usado para incorporar essas informações de maneira padronizada. No entanto, conforme discutido no capítulo 3.3, outros métodos de comunicação também podem ser considerados, e a escolha do método ideal dependerá das necessidades específicas e das condições de cada aplicação.

Além da integração com o sistema PIMS, os dados coletados e organizados podem ser úteis para outros fins, como treinamento de modelos de Machine Learning ou armazenamento em um banco de dados sequencial, ressaltando a importância de um planejamento e execução cuidadosos.

Os resultados obtidos indicam que o projeto atingiu com sucesso seus objetivos ao desenvolver as duas bancadas e preparar a coleta de dados para integração com um sistema PIMS.



```
JointRotations-280423.txt
Arquivo  Editar  Exibir

Base,28/04/2023 20:46:25.990,178.0
Claw,28/04/2023 20:46:26.092,117.0
Elbow,28/04/2023 20:46:26.194,93.0
Claw,28/04/2023 20:46:26.296,115.0
Base,28/04/2023 20:46:26.398,153.0
Claw,28/04/2023 20:46:26.499,108.0
Shoulder,28/04/2023 20:46:26.600,19.0
Elbow,28/04/2023 20:46:26.701,86.0
Base,28/04/2023 20:46:26.803,162.0
Claw,28/04/2023 20:46:26.905,111.0
Shoulder,28/04/2023 20:46:27.006,11.0
Elbow,28/04/2023 20:46:27.107,88.0
Base,28/04/2023 20:46:27.209,158.0
Claw,28/04/2023 20:46:27.310,110.0
Shoulder,28/04/2023 20:46:27.413,16.0
Elbow,28/04/2023 20:46:27.514,89.0
Base,28/04/2023 20:46:27.620,152.0
Claw,28/04/2023 20:46:27.722,108.0
Shoulder,28/04/2023 20:46:27.824,22.0
Elbow,28/04/2023 20:46:27.925,88.0
Base,28/04/2023 20:46:28.028,151.0
Claw,28/04/2023 20:46:28.129,107.0
Shoulder,28/04/2023 20:46:28.230,26.0
Base,28/04/2023 20:46:28.332,150.0
Shoulder,28/04/2023 20:46:28.433,25.0
Base,28/04/2023 20:46:28.535,149.0
Shoulder,28/04/2023 20:46:28.637,23.0|

Ln 27, Col 38
```

Figura 9 – Exemplo do registro dos dados para integração com um sistema PIMS.

A análise desses dados coletados e a comparação entre o braço robótico físico e o gêmeo digital forneceram informações valiosas que podem ser usadas para aprimoramento e otimização do sistema. Além disso, o projeto abriu caminho para futuros trabalhos e melhorias, estabelecendo uma base sólida para explorar ainda mais as possibilidades desta tecnologia emergente.

5 Considerações Finais

Este capítulo sintetiza o trabalho desenvolvido, destacando as lições aprendidas ao longo do processo, além das possibilidades para futuras melhorias e expansões do projeto. A avaliação dos resultados alcançados é realizada à luz dos objetivos iniciais, discutindo a relevância deste projeto no contexto da Indústria 4.0, com ênfase na integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS.

5.1 Lições Aprendidas

A execução deste projeto forneceu lições valiosas sobre os desafios e soluções pertinentes à implementação de um braço robótico físico e seu respectivo gêmeo digital. Dentre as lições aprendidas, destacam-se:

- A necessidade de uma análise minuciosa do comportamento da planta física para uma replicação precisa no gêmeo digital, elemento fundamental para assegurar a eficácia da simulação e a utilidade das informações geradas;
- O reconhecimento da importância de analisar o tipo de dado que se pretende integrar, visando selecionar o método de coleta e integração mais adequado, de acordo com as características específicas de cada aplicação;
- A relevância de preparar os dados coletados para facilitar a integração com diferentes sistemas e métodos de coleta, garantindo a flexibilidade e a eficiência do projeto em ambientes industriais complexos e dinâmicos;
- A essência de se trabalhar continuamente na evolução do gêmeo digital, aprimorando sua representação e comportamento em relação à planta física, o que favorece a melhoria contínua do sistema como um todo.

O conhecimento adquirido durante o desenvolvimento deste projeto ressalta a importância de se aliar a modelagem 3D à coleta de dados para avaliar e otimizar o desempenho de sistemas robóticos em ambientes industriais.

5.2 Potencial para Melhorias e Trabalhos Futuros

Com base nos resultados obtidos e nas lições aprendidas, foram identificadas oportunidades para melhorias e desenvolvimentos futuros relacionados a este projeto:

- Refinamento da coleta de dados do braço robótico físico, por exemplo, através do uso de sensores mais precisos ou da melhoria da montagem para minimizar interferências e aumentar a precisão dos dados coletados;
- Desenvolvimento e teste de diferentes métodos de coleta de dados para integração com um sistema PIMS, explorando alternativas como OPC, APIs, banco de dados e MQTT, além do UFL;
- Expansão do escopo do projeto para incluir análise de dados em tempo real, utilizando ferramentas analíticas avançadas disponíveis em sistemas PIMS, para otimizar o desempenho, a manutenção preventiva e a redução de gastos em ambientes industriais;
- Investigação da viabilidade de implementar modificações no braço robótico físico e no gêmeo digital, como a adição de novos sensores ou a substituição de motores, visando avaliar o impacto dessas mudanças no desempenho dos sistemas.
- Exploração da incorporação de ferramentas de Inteligência Artificial e Machine Learning para decifrar e interpretar os dados originados pela planta física. Tal avanço tem o potencial de otimizar o desempenho do gêmeo digital, tornando sua representação mais realista e precisa ao espelhar os comportamentos e características dinâmicas da contraparte física.

Este projeto forneceu um ponto de partida robusto para investigações futuras e aprimoramentos, demonstrando o potencial de integração entre sistemas robóticos e PIMS em ambientes industriais.

5.3 Conclusão

O objetivo central deste trabalho foi explorar e evidenciar a importância da integração entre o gêmeo digital e um sistema PIMS, visando estimular o crescimento tecnológico e a evolução da Indústria 4.0. O desenvolvimento de duas bancadas, uma com um braço robótico físico representando uma planta industrial e outra com um braço robótico virtual representando o gêmeo digital, juntamente com a viabilização da coleta de dados para integração com um sistema PIMS, objetivou enfatizar a relevância dessa conexão.

A revisão bibliográfica conduzida abordou aspectos relevantes da transformação digital, da integração tecnológica no ambiente industrial e das aplicações de sistemas PIMS e gêmeos digitais. Esses tópicos contribuíram para embasar o trabalho e entender as potencialidades e desafios da integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS.

As organizações podem considerar investir no desenvolvimento de suas plantas industriais em gêmeos digitais e na coleta de dados para análise no sistema PIMS. Desta maneira, é possível analisar os dados em conjunto e em tempo real, propiciando maior eficiência e otimização dos processos industriais.

Ao longo do processo, destacaram-se lições relevantes, tais como a necessidade de gerir as limitações e instabilidades presentes em um ambiente industrial e a importância de adaptar os métodos de coleta de dados às diferentes situações encontradas. Adicionalmente, ressaltou-se a possibilidade de melhorias e futuros trabalhos, como a implementação de novos sensores e atuadores, e a otimização dos processos de coleta e análise de dados.

Em suma, este projeto serviu como um ponto inicial para demonstrar a viabilidade e relevância da integração entre gêmeos digitais e sistemas PIMS, contribuindo para estimular o crescimento tecnológico nas empresas e fomentar a evolução da Indústria 4.0. Apesar dos resultados iniciais promissores, é crucial encarar este projeto como o início de um processo contínuo de pesquisa e desenvolvimento, com potencial para aperfeiçoar ainda mais os sistemas de controle e monitoramento em indústrias e outros setores.

Referências

- ANTONIALLI, L. M. Modelo de gestão e estratégias: o caso de duas cooperativas mistas de leite e café de minas gerais. Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade-Universidade de São Paulo, 2000. 4
- ASSOCIAÇÃO Brasileira de Internet Industrial. Acessado em 2023-03-30. Disponível em: <<https://abii.com.br/>>. 6
- BARLOW, J. P. Plant information management system: A tool for improving plant performance. *Computers in industry*, Elsevier, v. 34, n. 1, p. 1–10, 1997. 7
- BUZZELL, R. D. The pims program of strategy research: A retrospective appraisal. *Journal of business research*, Elsevier, v. 57, n. 5, p. 478–483, 2004. 1
- CARDOSO, R. d. S.; PIRES, M. Indústria 4.0 no brasil: desafios e oportunidades. *Revista Produção Online*, v. 17, n. 1, p. 7–24, 2017. 5
- CARMONA, V. E. S. Indústria 4.0 no brasil. *Revista de Administração e Inovação*, SciELO Brasil, v. 14, n. 3, p. 221–232, 2017. 6
- CARVALHO, F. B. d. et al. Sistemas pims-conceituação, usos e benefícios. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, ABM-Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 1, n. 4, p. 1–5, 2013. 1
- CHEN, X. et al. Pims-based quality control method for process industry. *Procedia Engineering*, Elsevier, v. 174, p. 1349–1356, 2017. 8, 9
- DALENOGARE, L. S. et al. The expected contribution of industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 204, p. 383–394, 2018. 6
- EBBERS, W. E.; DIJK, J. A. V. Resistance and support to electronic government, building a model of innovation. *Government information quarterly*, Elsevier, v. 24, n. 3, p. 554–575, 2007. 4
- GABOR, T. et al. A simulation-based architecture for smart cyber-physical systems. In: IEEE. *2016 IEEE international conference on autonomic computing (ICAC)*. [S.l.], 2016. p. 374–379. 1
- GLAESSGEN, E.; STARGEL, D. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Exponential Interactive*, SAE International, v. 2, n. 2, p. 34–42, 2012. 11, 12
- GLAESSGEN, E. H.; STARGEL, D. S. Digital twin and pims: A case study in renewable energy sector. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, v. 1037, p. 032024, 2018. 15
- GRIEVES, M. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*, 2014. 10, 11, 12, 13, 14
- HAAG, S.; ANDERL, R. Digital twin – proof of concept. *Manufacturing Letters*, v. 15, p. 64–66, 2018. Industry 4.0 and Smart Manufacturing. 1

- HAHN, G.; MARZANO, A. Indústria 4.0: conceitos, histórico e perspectivas. *Produção em Foco*, v. 7, n. 1, p. 83–98, 2017. 5, 6
- HORRIGAN, J. B. Americans fall along a spectrum of preparedness when it comes to using tech tools to pursue learning online, and many are not eager or ready to take the plunge. *Pew Research Center*, 2016. 4
- INDÚSTRIA, C. N. da. Indústria 4.0: Desafios e oportunidades para o Brasil. *Brasília: CNI*, 2016. 6
- LI, B.; ZHANG, L.; WANG, S. Research on intelligent manufacturing process big data management and control technology. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Springer, v. 9, n. 4, p. 1141–1149, 2018. 7, 10
- LU, Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, Elsevier, v. 6, p. 1–10, 2017. 7
- LU, Y.; HUANG, G. Q.; ZHANG, W. Cyber-physical system enabled collaboration in mixed reality for product design and manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Elsevier, v. 49, p. 245–255, 2018. 12, 14
- MCGOUGH, C. et al. Healthcare applications of digital twin and pims integration. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 61241–61251, 2019. 15
- NEGRI, E.; FUMAGALLI, L.; MACCHI, M. A review of the roles of digital twin in cps-based production systems. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 11, p. 939–948, 2017. 10, 11, 13
- NEGRI, E.; FUMAGALLI, L.; MACCHI, M. The role of digital twin in automotive industry. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 11, p. 545–554, 2017. 15
- QI, Q.; TAO, F. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, IEEE, v. 6, p. 3585–3593, 2018. 10, 11, 12
- ROSEN, R. et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 48, n. 3, p. 567–572, 2015. 1
- ROSEN, R. et al. Digital twin and pims integration in aerospace industry. *Procedia CIRP*, Elsevier, v. 41, p. 335–340, 2016. 15
- ROSENBERG, U. et al. Digital twin data modeling with automationml and a communication methodology for data exchange. *Information*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 9, p. 270, 2019. 10, 11, 12, 13
- SCHROEDER, A. et al. Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, Elsevier, v. 89, p. 23–34, 2016. 12, 13, 14
- SCHWAB, K. *The Fourth Industrial Revolution*. [S.l.]: Currency, 2016. 7
- TAO, F.; QI, Q. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 94, n. 9-12, p. 3563–3576, 2018. 10, 11, 12
- TAO, F. et al. Smart manufacturing: Digital twin and pims integration. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Springer, v. 29, p. 435–446, 2018. 15

TEIXEIRA, E. B. et al. Centralizando informações de processo e de qualidade utilizando o pims. 2015. 1

UHLEMANN, T. H.-J. et al. The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 9, p. 113–120, 2017. 1

ZANCUL, E. d. S. et al. Manufatura avançada no brasil. *Revista de Administração*, SciELO Brasil, v. 51, n. 1, p. 56–72, 2016. 5

ZHANG, Q.; VATRAPU, R.; ZHU, J. A review of the application of industry 4.0 technologies for energy management in manufacturing industry. *International Journal of Energy Research*, Wiley Online Library, v. 43, n. 12, p. 6374–6394, 2019. 8, 9