

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS

ELISEU GONÇALVES SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE UM GÊMEO DIGITAL PARA UM BRAÇO ROBÓTICO  
COM TRÊS GRAUS DE LIBERDADE

Jataí  
2025



**INSTITUTO FEDERAL**  
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

### **TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

#### **Identificação da Produção Técnico-Científica**

- |                                                                      |                                                         |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Tese                                        | <input type="checkbox"/> Artigo Científico              |
| <input type="checkbox"/> Dissertação                                 | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro              |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização                 | <input type="checkbox"/> Livro                          |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC - Graduação                  | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ |                                                         |

Nome Completo do Autor:

Matrícula:

Título do Trabalho:

#### **Autorização - Marque uma das opções**

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.  
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.  
☐ Outra justificativa: \_\_\_\_\_

#### **DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA**

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Jatui \_\_\_\_\_, 06/08/2025  
Local Data

Eliseu Gonçalves Souza  
Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

ELISEU GONÇALVES SOUZA

DESENVOLVIMENTO DE UM GÊMEO DIGITAL PARA UM BRAÇO ROBÓTICO  
COM TRÊS GRAUS DE LIBERDADE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, do INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Ma. Kennya Resende Mendonça

Jataí  
2025

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)**

Souza, Eliseu Gonçalves.

Desenvolvimento de um gêmeo digital para um braço robótico com três graus de liberdade [manuscrito]/ Eliseu Gonçalves Souza. - Jataí: IFG, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica, 2025.  
98 f.; il.

Orientadora: Profa. Ma. Kennya Resende Mendonça.

Bibliografias.

1. Gêmeo digital. 2. Braço robótico. 3. Cinemática inversa. 4. Simulink. I. Mendonça, Kennya Resende. II. IFG, Câmpus Jataí. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Téc.: Tratamento da Informação – C. Jataí – Cód. F039/2025-1.  
Bibliotecária – Rosy Cristina Oliveira Barbosa Sabino – CRB1/2380



**INSTITUTO FEDERAL**  
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS  
CÂMPUS JATAÍ

## **Folha de Aprovação**

**ELISEU GONÇALVES SOUZA**

### **DESENVOLVIMENTO DE UM GÊMEO DIGITAL PARA UM BRAÇO ROBÓTICO COM TRÊS GRAUS DE LIBERDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Jataí, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Monografia defendida e aprovada, em 24 de julho de 2025, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

#### **BANCA EXAMINADORA**

Profa. Ma. Kennya Resende Mendonça  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus  
Jataí  
(Orientadora / Presidente)

Prof. Me. Tiago Romeiro de Jesus  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus  
Jataí  
(Membro)

Prof. Me. Jonnathan Vinicius Lopes Silva  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Câmpus  
Jataí  
(Membro)

Jataí – GO

2025

Documento assinado eletronicamente por:

- **Kennya Resende Mendonca**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 05/08/2025 10:02:42.
- **Tiago Romeiro de Jesus**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 04/08/2025 13:38:11.
- **Jonnathan Vinicius Lopes Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 04/08/2025 12:24:04.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 04/08/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 675752

Código de Autenticação: ddc52f0eeb



**Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás**

Av. Presidente Juscelino Kubitschek,, 775, Residencial Flamboyant, JATAÍ / GO, CEP 75804-714  
(64) 3514-9579 (ramal: 9579)

Dedico este trabalho, com todo meu carinho e gratidão, à minha mãe, pelo amor incondicional, apoio constante e por ser meu exemplo de força e perseverança.

À minha irmã, por estar sempre ao meu lado, incentivando meus sonhos, encorajando e celebrando cada conquista.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, mulher forte, guerreira e resiliente. Mesmo diante das adversidades, sempre manteve o bom humor, o sorriso no rosto e a palavra de incentivo na ponta da língua. Sua presença constante, seu exemplo de superação foi essencial para que eu me mantivesse firme em minha caminhada. Tudo o que conquistei até aqui carrega muito da sua força e do seu amor.

À minha irmã, igualmente forte, guerreira e resiliente. Sua parceria, incentivo e sensibilidade foram fundamentais em cada etapa desta caminhada. Você sempre soube como me motivar nos momentos de dúvida e me inspirar a seguir em frente com coragem. Ter você ao meu lado tornou essa jornada mais leve e possível.

Aos demais familiares, que estiveram presentes com palavras de apoio, mensagens de carinho e a torcida de sempre. Cada gesto, por menor que parecesse, teve um impacto enorme.

Agradeço também a Deus e à espiritualidade, que me fortaleceram nos momentos mais desafiadores, guiando meus passos com fé, coragem e serenidade durante todo o percurso.

Aos amigos que estiveram ao meu lado nos bons e maus momentos, compartilhando aprendizados, desafios e conquistas. A presença de vocês tornou essa trajetória mais leve e significativa.

Aos professores que contribuíram com seu conhecimento, paciência e orientação. Em especial, agradeço àqueles que me desafiaram a ir além e acreditaram no meu potencial, contribuindo de forma decisiva para a minha formação acadêmica e pessoal.

A cada um de vocês, meu mais sincero agradecimento. Este trabalho também é resultado do apoio e da inspiração que recebi de todos.

“Não existe tal coisa como uma lição sem dor. Elas simplesmente não existem. Sacrifícios são necessários. Você não pode ganhar nada sem perder algo primeiro. No entanto, se você for capaz de suportar essa dor e seguir em frente, descobrirá que agora possui um coração forte o bastante para superar qualquer obstáculo — um coração feito de aço.”

— Edward Elric, Fullmetal Alchemist: Brotherhood

## RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso apresenta o desenvolvimento e a simulação de um gêmeo digital de um braço robótico articulado, utilizando a integração entre as plataformas *SolidWorks* e *MATLAB/Simulink*, por meio do ambiente *Simscape Multibody*. O objetivo principal é criar uma representação virtual detalhada do manipulador físico, capaz de reproduzir seu comportamento cinemático e dinâmico em tempo real, viabilizando testes de controle e planejamento de trajetória com alta fidelidade. O modelo mecânico foi inicialmente construído no *SolidWorks*, com peças desenvolvidas do zero e estruturadas para viabilizar três graus de liberdade rotacionais. Após a montagem completa, o robô foi exportado para o *MATLAB* no formato XML, utilizando a ferramenta *Simscape Multibody Link*. A partir desse modelo, foi gerado automaticamente um esquema físico de corpos rígidos e juntas rotacionais, compatível com simulações multiescalares. Na sequência, foram implementados blocos funcionais no *Simulink* para a geração de trajetórias no espaço cartesiano, utilizando matrizes de transformação homogênea  $4 \times 4$ , além de algoritmos de cinemática inversa que permitiram transformar poses desejadas em ângulos articulares. A realimentação foi realizada por meio de blocos PID, conectados a comparadores de erro angular, promovendo o controle independente de cada junta. A integração dos blocos resultou em um gêmeo digital funcional, testado com diferentes trajetórias e validado quanto à sua precisão e estabilidade. O modelo desenvolvido contribui para o avanço de aplicações em automação, ensino e desenvolvimento de protótipos digitais na área de robótica e sistemas ciberfísicos.

**Palavras-chave:** Gêmeo digital; Braço robótico; Cinemática inversa; Simulink.

## ABSTRACT

This Final Undergraduate Project presents the development and simulation of a digital twin of an articulated robotic arm, using the integration between SolidWorks and MATLAB/Simulink platforms, through the Simscape Multibody environment. The main objective is to create a detailed virtual representation of the physical manipulator, capable of reproducing its kinematic and dynamic behavior in real time, enabling high-fidelity testing of control and trajectory planning strategies. The mechanical model was initially built in SolidWorks, with custom-designed parts structured to enable three rotational degrees of freedom. After full assembly, the robot was exported to MATLAB in XML format using the Simscape Multibody Link tool. From this model, a physical schematic of rigid bodies and revolute joints was automatically generated, compatible with multiscale simulations. Subsequently, functional blocks were implemented in Simulink for generating Cartesian space trajectories using  $4 \times 4$  homogeneous transformation matrices, along with inverse kinematics algorithms that converted desired poses into joint angles. Feedback control was performed using PID blocks connected to angular error comparators, enabling independent control of each joint. The integration of all components resulted in a functional digital twin, tested with various trajectories and validated in terms of accuracy and stability. The developed model contributes to advancing applications in automation, education, and the development of digital prototypes in the fields of robotics and cyber-physical systems.

**Keywords:** Digital twin; Robotic arm; Inverse kinematics; Simulink.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 — Representação do fluxo de dados entre o Espaço Real e o Espaço Virtual em um Gêmeo Digital.....                                      | 18 |
| Figura 2 — Níveis de integração entre os tipos de Gêmeos Digitais .....                                                                         | 20 |
| Figura 3 — Arquitetura da Internet das Coisas aplicada aos Gêmeos Digitais .....                                                                | 23 |
| Figura 4 — Integração de Gêmeos Digitais com Blockchain e Contratos Inteligentes na Indústria 4.0.....                                          | 24 |
| Figura 5 — Framework de diagnóstico de falhas utilizando Gêmeos Digitais .....                                                                  | 29 |
| Figura 6 — Arquitetura de Gêmeo Digital Pessoal (GDP) baseada em dados de dispositivos vestíveis e móveis.....                                  | 31 |
| Figura 7 — Aplicação de gêmeo digital urbano com rotas e análise sintática espacial .....                                                       | 33 |
| Figura 8 — Leitura real de correntes trifásicas no Edifício Califórnia via protocolo Modbus .....                                               | 35 |
| Figura 9 — Simulação de corrente trifásica utilizando Gêmeo Digital do sistema elétrico.....                                                    | 35 |
| Figura 10 — Percepção dos estudantes sobre o uso de Gêmeos Digitais na formação em engenharia .....                                             | 37 |
| Figura 11 — Comparação entre forma virtual (Gêmeo Digital) e forma física para o treinamento com braço robótico industrial.....                 | 38 |
| Figura 12 — Panorama dos Gêmeos Digitais na agricultura: (a) campo de aplicação, (b) nível de integração e (c) maturidade tecnológica.....      | 41 |
| Figura 13 — Aplicações de Gêmeos Digitais por setor industrial e finalidade .....                                                               | 44 |
| Tabela 1 — Principais Diferenças Entre Gêmeos Digitais X Sistema Supervisório .                                                                 | 46 |
| Figura 14 — Visão geral do Ansys Twin Builder: integração entre projeto e operações com gêmeos digitais.....                                    | 47 |
| Figura 15 — Aplicações do Bentley OpenCities Planner em contextos urbanos e de saneamento.....                                                  | 48 |
| Figura 16 — Interface do Azure Digital Twins Explorer.....                                                                                      | 49 |
| Figura 17 — Casos de uso industriais do NVIDIA Omniverse em aplicações de gêmeos digitais .....                                                 | 50 |
| Figura 18 — Modelo inicial de braço robótico com 2 DOF montado no SolidWorks                                                                    | 53 |
| Figura 19 — Modelo aprimorado RoboARM_V2 com 3 DOF no ambiente CAD.....                                                                         | 54 |
| Figura 20 — Componentes principais do modelo RoboARM_V2 com vista isométrica .....                                                              | 55 |
| Figura 21 — Interface inicial do SolidWorks utilizada para a modelagem das peças do RoboARM_V2 .....                                            | 56 |
| Figura 22 — Vista explodida das peças principais do modelo RoboARM_V2 com identificação dos componentes .....                                   | 57 |
| Figura 23 — Representação dos três graus de liberdade ( $\theta_1$ , $\theta_2$ , $\theta_3$ ) no modelo RoboARM_V2 montado no SolidWorks ..... | 59 |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 24 — Eixos de rotação e peças do RoboARM_V2 preparados para exportação ao Simscape Multibody .....            | 60 |
| Figura 25 — Processo de exportação do modelo RoboARM no SolidWorks via Simscape Multibody Link.....                  | 61 |
| Figura 26 — Modelo físico do braço robótico gerado no Simulink após comando "smimport" .....                         | 63 |
| Figura 27 — Modelo Simulink com articulações controláveis via entrada e saída para integração com gêmeo digital..... | 64 |
| Figura 28 — Bloco "Trajetória Desejada" no Simulink com entradas e saída .....                                       | 65 |
| Tabela 2 — Tipos de trajetória disponíveis no bloco Trajetória Desejada.....                                         | 66 |
| Figura 29 — Bloco Cinemática Inversa no Simulink.....                                                                | 67 |
| Figura 30 — Diagrama de controle PID para as três juntas rotacionais do RoboARM no Simulink.....                     | 69 |
| Figura 31 — Arquitetura geral do sistema de controle do RoboARM implementada no Simulink.....                        | 71 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|          |                                                        |
|----------|--------------------------------------------------------|
| AAS      | Asset Administration Shell                             |
| AEC      | Arquitetura, Engenharia e Construção                   |
| AWS      | Amazon Web Services                                    |
| BIM      | Building Information Modeling                          |
| CAD      | Computer-Aided Design                                  |
| CLPs     | Controladores Lógicos Programáveis                     |
| CNC      | Controle Numérico Computadorizado                      |
| CoAP     | Constrained Application Protocol                       |
| CPS      | Cyber-Physical Systems                                 |
| DApp     | Aplicativo descentralizado                             |
| DDS      | Data Distribution Service                              |
| DT       | Digital Twin                                           |
| DT-SMSD  | Sistemas de Manufatura Inteligentes Baseados em Gêmeos |
| Digitais |                                                        |
| DTDL     | Digital Twins Definition Language                      |
| ECPS     | Energy Cyber-Physical Systems                          |
| GD       | Gêmeo digital                                          |
| GDP      | Gêmeo Digital do Paciente                              |
| GDPC     | Gêmeo Digital do Paciente com Câncer                   |
| GDs      | Gêmeos Digitais                                        |
| GDTA     | Arquitetura Genérica de Gêmeo Digital                  |
| GIS      | Geographic Information System                          |
| HTTP     | Hypertext Transfer Protocol                            |
| HVAC     | Heating, Ventilation and Air Conditioning              |
| IA       | Inteligência Artificial                                |
| IIoT     | Internet das Coisas Industrial                         |
| IoT      | A Internet das Coisas                                  |
| IPFS     | InterPlanetary File System                             |
| KPIs     | Key Performance Indicator                              |
| LPWAN    | Low Power Wide Area Network                            |
| M2M      | Machine-to-Machine                                     |
| MD       | Modelo Digital                                         |

|        |                                                     |
|--------|-----------------------------------------------------|
| MQTT   | Message Queuing Telemetry Transport                 |
| P2P    | Peer-to-peer                                        |
| PBTES  | sistema de armazenamento térmico                    |
| PCBs   | Painéis de circuito impresso                        |
| PdM    | Predictive Maintenance                              |
| PID    | Proporcional, Integral, Derivativo.                 |
| PLM    | Product Lifecycle Management                        |
| RAGs   | Redes Adversariais Generativas                      |
| RUL    | Remaining Useful Life                               |
| SCADA  | Supervisory Control and Data Acquisition            |
| SD     | Sombra Digital                                      |
| STEAM  | Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática |
| SUS    | Sistema Único de Saúde                              |
| UGVs   | Veículos terrestres não tripulados                  |
| WoT TD | Thing no Web of Things Thing Description            |
| USD    | Universal Scene Description                         |
| 2-DOF  | 2 Graus de Liberdade                                |
| 3-DOF  | 3 Graus de Liberdade                                |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                           |                                                                             |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| $[x, y, z]^T$             | Componentes do vetor posição do pulso (Forma transposta)                    |
| $D$                       | Parâmetro auxiliar calculado pela Lei dos Cossenos                          |
| $e_i(t)$                  | Erro de posição da junta $i$ no instante de tempo $t$                       |
| $e(t)$                    | Erro de posição angular no instante $t$                                     |
| $K_d$                     | Ganho derivativo do controlador PID                                         |
| $K_i$                     | Ganho integral do controlador PID                                           |
| $K_p$                     | Ganho proporcional do controlador PID                                       |
| $L_1$                     | Altura da base até o primeiro elo articulado                                |
| $L_2$                     | Comprimento do primeiro elo móvel                                           |
| $L_3$                     | Comprimento do terceiro elo (efetuador)                                     |
| $P(d)$                    | Vetor posição do efetuador desejado (extraído de $T_d$ )                    |
| $P_w$                     | Vetor posição do ponto do "pulso" (centro da junta anterior ao efetuador)   |
| $P_x(t)$                  | Componentes do vetor posição em X, em função do tempo                       |
| $P_y(t)$                  | Componentes do vetor posição em Y, em função do tempo                       |
| $P_z(t)$                  | Componentes do vetor posição em Z, em função do tempo                       |
| $P(t)$                    | Vetor posição do efetuador ao longo do tempo                                |
| $r$                       | Distância radial no plano XY (projeção horizontal)                          |
| $R_d$                     | Matriz de rotação desejada do efetuador (extraída de $T_d$ )                |
| $R_d(:,1)$                | Primeira coluna da matriz de rotação $R_d$ (direção do eixo x do efetuador) |
| $R_{ij}(t)$               | Elementos da matriz de rotação em função do tempo ( $i, j = 1, 2$ .)        |
| $\mathbb{R}^3$            | Espaço vetorial tridimensional real                                         |
| $\mathbb{R}^{3 \times 3}$ | Conjunto das matrizes reais de ordem 3×3                                    |
| $\mathbb{R}^{4 \times 4}$ | Conjunto das matrizes reais de ordem 4×4                                    |
| $R(t)$                    | Matriz de rotação do efetuador ao longo do tempo                            |
| $t$                       | Tempo                                                                       |
| $T_d$                     | Matriz homogênea desejada (pose desejada do efetuador)                      |
| $T_d(t)$                  | Matriz de transformação homogênea do efetuador ao longo do tempo            |
| $u_i(t)$                  | Sinal de controle gerado pelo controlador PID da junta $i$                  |

|                   |                                                                      |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------|
| $z_{rel}$         | Altura relativa entre o ponto do pulso e a base ( $z - L_1$ )        |
| $\theta_{i,real}$ | Ângulo de junta desejado, proveniente do bloco de cinemática         |
| inversa           |                                                                      |
| $\theta_{i,ref}$  | Ângulo real da junta, medido no modelo físico (via <i>Simscape</i> ) |
| $\theta_1$        | Ângulo da junta 1 (rotação da base no plano XY)                      |
| $\theta_2$        | Ângulo da junta 2 (elevação do braço)                                |
| $\theta_3$        | Ângulo da junta 3 (cotovelo – segunda articulação)                   |

## SUMÁRIO

|     |                                                                    |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------|----|
| 1   | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                  | 15 |
| 1.1 | OBJETIVO GERAL                                                     | 16 |
| 1.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS                                              | 16 |
| 2   | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>                                         | 18 |
| 2.1 | GÊMEOS DIGITAIS                                                    | 18 |
| 2.2 | APLICAÇÃO DA INTERNET DAS COISAS EM GÊMEOS DIGITAIS                | 21 |
| 2.3 | BLOCKCHAIN                                                         | 23 |
| 2.4 | DIFERENÇAS ENTRE GÊMEOS DIGITAIS E SIMULAÇÃO                       | 26 |
| 2.5 | APLICAÇÕES DOS GÊMEOS DIGITAIS                                     | 27 |
| 2.6 | DIFERENÇAS ENTRE GÊMEOS DIGITAIS E SISTEMA SUPERVISÓRIO            | 45 |
| 2.7 | SOFTWARES UTILIZADOS PARA CRIAÇÃO DE GEMÊOS DIGITAIS               | 47 |
| 3   | <b>METODOLOGIA</b>                                                 | 51 |
| 4   | <b>DESENVOLVIMENTO</b>                                             | 52 |
| 4.1 | VISÃO GERAL DO ROBÔ ARM                                            | 52 |
| 4.2 | CONSTRUÇÃO DAS PEÇAS E MODELAGEM CAD                               | 56 |
| 4.3 | MONTAGEM DO ROBÔ ARM                                               | 58 |
| 4.4 | EXPORTAÇÃO DO MODELO DO SOLIDWORKS PARA O MATLAB/SIMULINK          | 61 |
| 4.5 | CRIAÇÃO E MODIFICAÇÃO DO BLOCO “MODELO MECÂNICO ROBÔ ARM”          | 62 |
| 4.6 | DESENVOLVIMENTO DO BLOCO “TRAJETÓRIA DESEJADA”                     | 65 |
| 4.7 | DESENVOLVIMENTO DO BLOCO “CINEMÁTICA INVERSA”                      | 67 |
| 4.8 | CONTROLE DE JUNTAS COM SOMADORES DE ERRO E CONTROLADORES PID       | 68 |
| 4.9 | INTEGRAÇÃO DOS BLOCOS NO SIMULINK: ARQUITETURA COMPLETA DO SISTEMA | 70 |
| 5   | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>                                        | 73 |
| 5.1 | CONCLUSÃO                                                          | 73 |
| 5.2 | TRABALHOS FUTUROS                                                  | 74 |
| 5.3 | DIFICULDADES                                                       | 74 |
|     | <b>REFERÊNCIAS</b>                                                 | 76 |
|     | APÊNDICE A — ARQUIVO XML DO MODELO ROBOARM_V2                      | 84 |
|     | APÊNDICE B — CÓDIGO DO BLOCO: TRAJETORIA_DESEJADA                  | 93 |
|     | APÊNDICE C — CÓDIGO DO BLOCO: CINEMATICA_INVERSA                   | 97 |

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias de automação, modelagem computacional e computação em tempo real tem impulsionado o desenvolvimento de soluções mais inteligentes e integradas no contexto da Indústria 4.0. Nesse cenário, o conceito de gêmeo digital (*Digital Twin*) tem ganhado destaque por sua capacidade de representar digitalmente ativos físicos, permitindo a simulação, monitoramento e controle de sistemas em tempo real, com alto grau de fidelidade e interatividade.

Na área da robótica, os gêmeos digitais vêm sendo aplicados de forma crescente no desenvolvimento, teste e operação de manipuladores articulados. Essa abordagem permite criar réplicas virtuais de sistemas robóticos reais, incluindo suas características geométricas, cinemáticas e dinâmicas, possibilitando a validação de algoritmos de controle e o planejamento de movimentos de forma segura e eficiente.

Os gêmeos digitais têm sido aplicados em diversas áreas além da robótica, como na indústria, saúde, energia, agricultura, logística e cidades inteligentes. Nessas aplicações, suas principais funções são permitir a análise preditiva, otimização de processos, monitoramento remoto e redução de custos com testes físicos. Ao criar uma representação virtual fiel de ativos reais, os gêmeos digitais possibilitam a tomada de decisões com base em dados em tempo real, promovendo maior eficiência, segurança e sustentabilidade nos sistemas físicos conectados.

No contexto educacional, os gêmeos digitais vêm se consolidando como uma ferramenta inovadora no ensino de engenharia e áreas correlatas. Sua utilização permite a criação de ambientes de aprendizado imersivos, nos quais os alunos podem interagir com sistemas simulados em tempo real, testar algoritmos, observar comportamentos de máquinas e validar conceitos teóricos na prática, sem a necessidade de equipamentos físicos. Isso democratiza o acesso ao aprendizado aplicado e reduz custos com laboratórios tradicionais.

Essa integração dos gêmeos digitais à educação tem papel fundamental na formação de profissionais mais preparados para os desafios da Indústria 4.0. Ao proporcionar um aprendizado mais dinâmico, experimental e próximo da realidade industrial, contribui-se para o desenvolvimento de competências técnicas e cognitivas alinhadas às demandas atuais do mercado. Assim, o uso pedagógico de gêmeos

digitais representa um importante avanço na qualificação e capacitação de futuros engenheiros e especialistas em automação, controle e tecnologias digitais.

O presente trabalho propõe a implementação de um gêmeo digital para um braço robótico articulado com três graus de liberdade (3-DOF), desenvolvido no ambiente *MATLAB/Simulink*, utilizando a ferramenta *Simscape Multibody*. O modelo virtual foi inicialmente construído no *SolidWorks* e exportado em formato compatível para simulação. Foram implementadas rotinas de cinemática direta e inversa, geração de trajetórias espaciais e controle por PID (Proporcional, Integral, Derivativo), compondo uma arquitetura completa de simulação e controle.

A aplicação desse gêmeo digital possibilita o estudo do comportamento do manipulador em diferentes situações, permitindo a análise de precisão, estabilidade e resposta dinâmica do sistema, sem a necessidade de um protótipo físico. Além disso, o modelo desenvolvido pode ser ampliado para integração com sistemas ciberfísicos, redes de sensores e inteligência artificial.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um gêmeo digital funcional de um braço robótico com três graus de liberdade, integrando modelagem 3D, exportação via *Simscape Multibody*, geração de trajetórias e controle no ambiente *MATLAB/Simulink*, com aplicação voltada tanto para fins acadêmicos quanto para a capacitação de estudantes em contextos de ensino de engenharia, automação e tecnologias da Indústria 4.0.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Criar o modelo tridimensional de um braço robótico articulado com estrutura do tipo RRR;
- Estabelecer a comunicação entre a plataforma de modelagem e o ambiente de simulação;
- Estruturar a geração de trajetórias baseadas em poses desejadas para o efetuador final;
- Formular um algoritmo de cinemática inversa para conversão da pose em ângulos articulares;

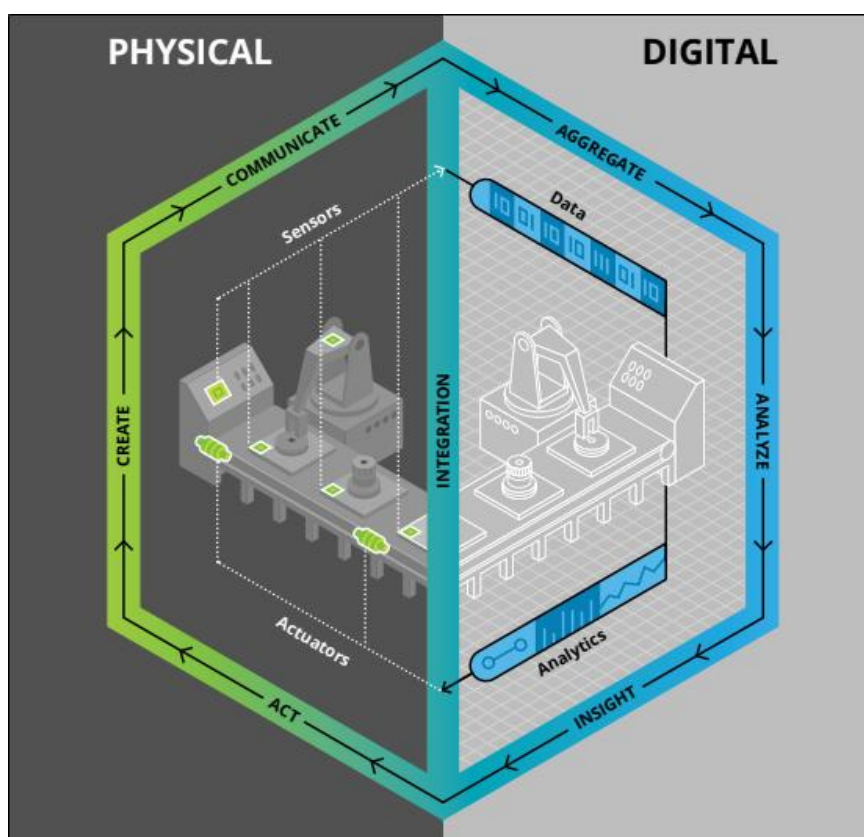
- Definir estratégias de controle para as juntas do robô com base em realimentação de posição;
- Consolidar um sistema de simulação que represente o comportamento de um manipulador robótico;

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 GÊMEOS DIGITAIS

O conceito de gêmeo digital foi inicialmente apresentado por Michael Grieves, em 2002, como uma “Ideia Conceptual para *Product Lifecycle Management* (PLM)”. Posteriormente, o termo “gêmeo digital” foi oficialmente cunhado em 2003, durante um curso ministrado pelo autor na Universidade de Michigan, sendo amplamente discutido e consolidado em trabalhos posteriores (Grieves, 2014). Embora tenha origem na indústria espacial, a aplicação da tecnologia expandiu-se para setores como engenharia, indústria automobilística, construção civil, entre outros (Souza, 2024).

Figura 1 — Representação do fluxo de dados entre o Espaço Real e o Espaço Virtual em um Gêmeo Digital



Fonte: Parrott; Warshaw. (2017).

O conceito de GDs tem evoluído significativamente nos últimos anos, especialmente em função de sua adaptação a diferentes domínios de aplicação. De acordo com Purcell e Neubauer (2023), uma definição robusta de GD o descreve como uma representação de um "produto" ativo e único, que pode incluir desde dispositivos físicos, objetos e máquinas até serviços, ativos intangíveis ou sistemas complexos compostos por produtos e seus serviços associados.

Em sua essência, um gêmeo digital é uma representação virtual de um objeto físico, sistema ou processo, refletindo, por meio de dados em tempo real, o comportamento e o desempenho do seu correspondente no mundo real (Parrot; Warshaw, 2017). Tal representação não se limita a um modelo estático: trata-se de uma estrutura dinâmica, alimentada continuamente por dados provenientes de sensores embarcados no ativo físico. Esses sensores podem incluir dispositivos para medir temperatura, pressão, vibração, deslocamento, espessura, entre outros, com comunicação baseada em protocolos como *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) ou *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT), por meio de redes como 4G, 5G ou Bluetooth. A Figura 1 ilustra o fluxo de dados entre o espaço físico e o espaço digital em um gêmeo digital, evidenciando a comunicação bidirecional entre sensores, atuadores e os processos de análise e tomada de decisão.

A estrutura de um gêmeo digital (GD) geralmente compreende três componentes principais: (i) o modelo do ativo, que descreve sua estrutura física e lógica; (ii) análises, que possibilitam prever e entender o comportamento do sistema; e (iii) uma base de conhecimento, que armazena os dados históricos e operacionais do ativo real. A gestão desse conhecimento acumulado ao longo do ciclo de vida do produto é um dos aspectos mais relevantes da tecnologia, pois permite a melhoria contínua de projetos e processos subsequentes (Souza, 2024).

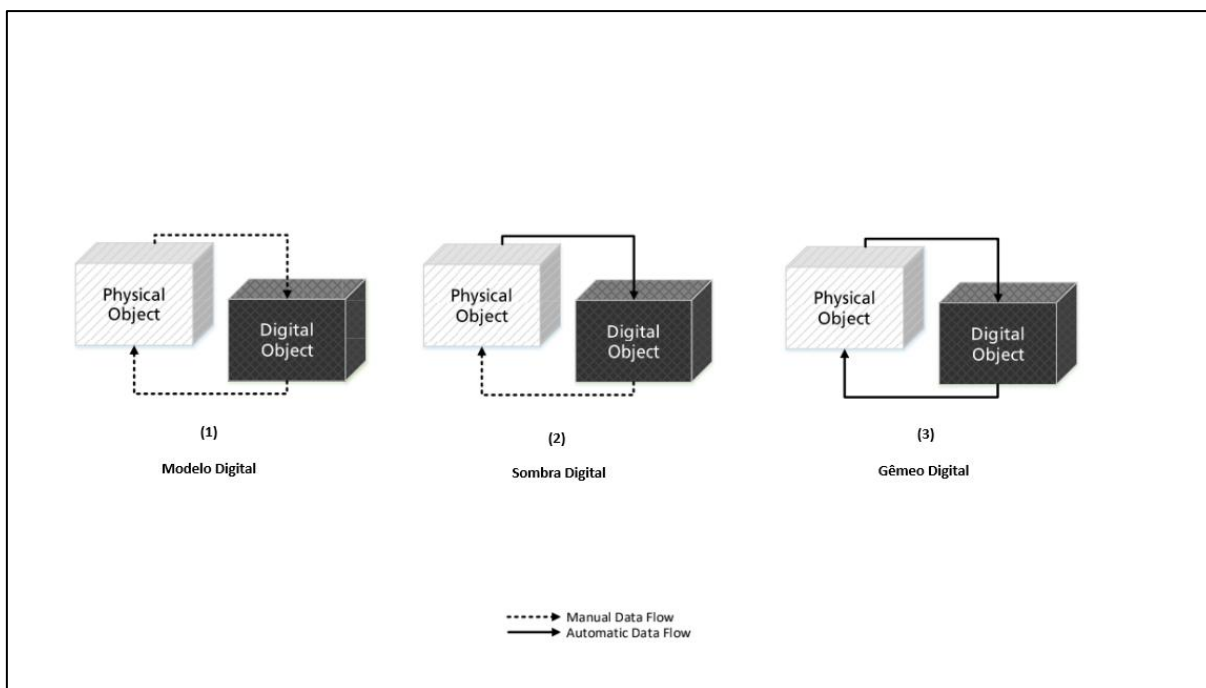
De acordo com Quinalha (2018), a utilidade dos gêmeos digitais (GDs) reside em sua capacidade de antecipar falhas, planejar cenários, realizar testes virtuais, traçar perfis evolutivos dos equipamentos, monitorar o desempenho em tempo real e auxiliar em tomadas de decisão. Ainda segundo os autores, essas características tornam os GDs ferramentas preditivas e interrogativas, capazes de prever comportamentos futuros e questionar o estado atual do sistema.

Classificam-se os GDs em três níveis, de acordo com o grau de integração entre os mundos físico e virtual:

1. Modelo Digital (MD): Representação estática do ativo, com atualizações realizadas manualmente. Não há fluxo automatizado de dados entre os sistemas.
2. Sombra Digital (SD): Existe um fluxo unilateral de dados, do físico para o digital. O modelo reflete automaticamente mudanças do sistema físico, mas intervenções digitais não impactam o objeto real.
3. Gêmeo Digital (*Digital Twin* - DT): A integração é bidirecional e automatizada, permitindo a comunicação em tempo real entre os sistemas físico e digital.

A Figura 2 ilustra graficamente os três níveis de integração propostos por Kritzinger et al. (2018), facilitando a compreensão das diferenças conceituais entre MD, SD e DT.

Figura 2 — Níveis de integração entre os tipos de Gêmeos Digitais



Fonte: Adaptado de Kritzinger et al. (2018).

A usabilidade dos GDs depende fortemente da forma como as informações são visualizadas. Dashboards interativas são amplamente utilizadas para consolidar e apresentar *Key Performance Indicator* (KPIs), facilitando o monitoramento em tempo real e a tomada de decisões com base em dados (Lucas, 2023).

Os GDs são considerados uma tecnologia habilitadora da Indústria 4.0, graças à sua capacidade de conectar os domínios físico e digital de maneira integrada (Tao

et al., 2019). No contexto da Indústria 5.0, seu papel se intensifica ao promover a personalização, a colaboração entre homem e máquina e a inteligência distribuída (Galvão, 2023).

## 2.2 APLICAÇÃO DA INTERNET DAS COISAS EM GÊMEOS DIGITAIS

A Internet das Coisas (IoT) é reconhecida como um componente fundamental para o desenvolvimento e a operação de Gêmeos Digitais, desempenhando um papel essencial na convergência entre o mundo físico e o virtual, especialmente no contexto da Indústria 4.0 e dos Sistemas Ciber-Físicos (*Cyber-Physical Systems* – CPS). A IoT permite a conexão e o monitoramento contínuo de recursos físicos por meio da coleta e transmissão de dados em tempo real, os quais alimentam o modelo virtual correspondente GD, possibilitando a replicação fiel de seu comportamento e estado (Minerva; Lee; Crespi, 2020).

De acordo com Jacoby; Usländer (2020), tanto a IoT quanto os GDs compartilham uma estrutura conceitual centrada em recursos, ainda que com escopos distintos: na IoT, o foco recai sobre dispositivos conectados à internet, enquanto os GDs abrangem entidades físicas e virtuais de forma mais ampla. Ambas as tecnologias se fundamentam em comunicações predominantemente Máquina-a-Máquina (*Machine-to-Machine* – M2M) e requerem, como funções básicas, a descrição, descoberta e acesso aos recursos.

A descrição de recursos, segundo os autores, deve ser formal e legível por máquinas, incluindo propriedades, serviços e eventos. A identificação única dos recursos é essencial, sendo possível por meio de identificadores como IRI ou IRDI. Os padrões utilizados nessa descrição variam, adotando termos como *asset* na *Asset Administration Shell* (AAS), interfaces na *Digital Twins Definition Language* (DTDL), ou *Thing* no *Web of Things Thing Description* (WoT TD). Além disso, a interoperabilidade entre recursos é facilitada por anotações semânticas (Jacoby; Usländer., 2020).

Após descritos, os recursos devem ser descobertos e acessados. A descoberta pode ocorrer de forma distribuída (*peer-to-peer* - P2P) ou centralizada (via diretório), e o acesso às descrições permite que sistemas consumidores compreendam como interagir com os respectivos recursos. Os padrões atuais, tanto de GD quanto de IoT,

utilizam abordagens comuns, como a representação dos recursos por meio de propriedades, serviços e eventos, a adoção do formato JSON-LD e o uso do protocolo HTTP, embora existam variações quanto ao suporte a tipos específicos de dados (geo-espaciais, históricos, etc.) e às linguagens de consulta empregadas (Jacoby; Usländer., 2020).

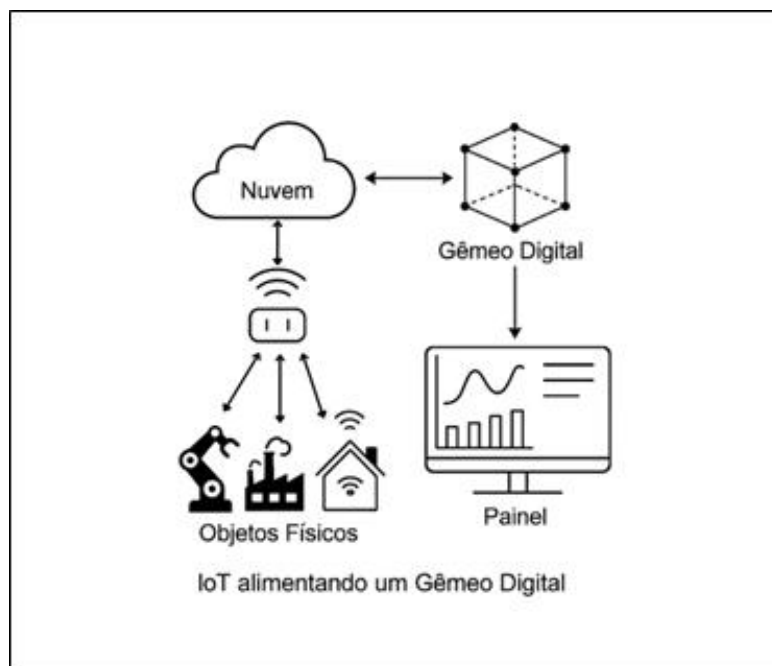
No contexto energético, Saad; Faddel; Mohammed. (2020) apresentaram uma metodologia de modelagem de GDs baseada em IoT aplicada a Sistemas Ciber-Físicos de Energia (*Energy Cyber-Physical Systems – ECPS*). A proposta envolveu a criação de modelos digitais de recursos energéticos, como micro redes interconectadas, utilizando a nuvem como infraestrutura. Os autores desenvolveram um GD físico baseado em conversores DC/DC e um modelo virtual capaz de representar tanto características fixas (metadados) quanto variáveis de entidades físicas e *cyber*, além da topologia de comunicação entre controladores. Essa abordagem demonstrou viabilidade prática em tempo real utilizando tecnologias como *Amazon Web Services (AWS)*, MQTT e *Data Distribution Service (DDS)*, com precisão de replicação de estados abaixo de 4%, mesmo em condições adversas, como ataques cibernéticos (Saad et al., 2020).

A relação entre GDs e IoT é ainda reforçada por Minerva; Lee; Crespi (2020), que identificam um conjunto de propriedades essenciais à aplicação do conceito de Gêmeo Digital no contexto da Internet das Coisas. Entre essas propriedades estão: identidade (identificação única do objeto físico e sua réplica lógica), representatividade (adequação ao contexto), reflexão (atualização dos atributos em tempo real), replicação (sincronização entre cópias), conectividade (comunicação contínua entre físico e virtual), pontualidade (resposta em tempo real), memorização (armazenamento de dados passados), composabilidade (agregação de entidades), aumento (capacidade de evolução funcional), propriedade (gestão de dados e representações) e servitização (oferta de funcionalidades baseadas em *software*).

Essas propriedades não apenas fundamentam o desenvolvimento de GDs robustos e eficazes, como também evidenciam a importância de uma infraestrutura de *software* adequada. Todavia, desafios técnicos ainda persistem, como a escalabilidade, segurança, agregação de dados, autogerenciamento e a falta de padrões abertos consolidados, que dificultam a interoperabilidade entre sistemas distintos (Minerva; Lee; Crespi, 2020).

Dessa forma, a IoT configura-se como um elemento indispensável para a concretização do conceito de GD, fornecendo os dados e a conectividade necessários para a construção de modelos virtuais dinâmicos, atualizáveis e integráveis como apresentado na figura 3.

Figura 3 — Arquitetura da Internet das Coisas aplicada aos Gêmeos Digitais



Fonte: O autor (2025).

A adoção de arquiteturas padronizadas, interoperáveis e seguras será fundamental para viabilizar o pleno potencial dos GDs em diversos domínios da engenharia e da indústria.

### 2.3 BLOCKCHAIN

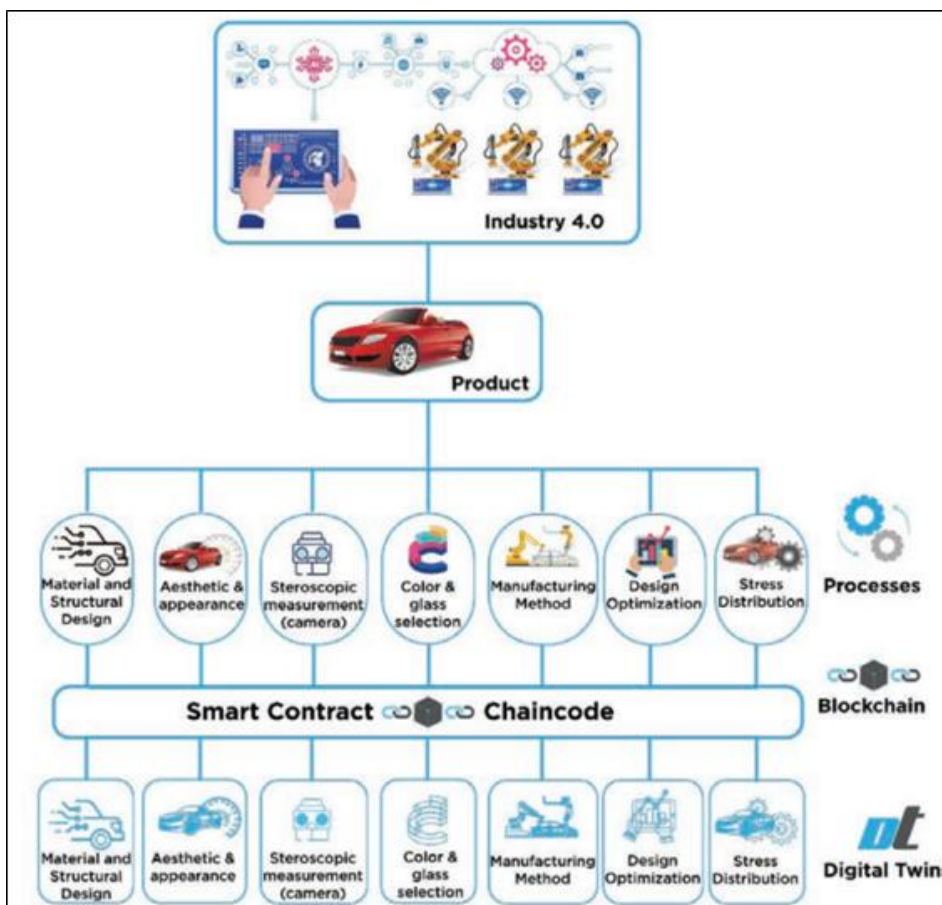
A integração da tecnologia *blockchain* com GDs representa um avanço significativo no que tange à segurança, rastreabilidade e descentralização na gestão do ciclo de vida de ativos físicos e digitais. Tal combinação é promissora, sobretudo, para setores como manufatura, construção civil, e Internet das Coisas Industrial (IIoT), onde a confiabilidade dos dados e a transparência das operações são críticas.

A utilização de *blockchain* em GDs tem como um de seus principais benefícios o fortalecimento da segurança das informações, dado que essa tecnologia emprega algoritmos criptográficos robustos, como o *hashing*, para assegurar a integridade e a

imutabilidade dos dados. Conforme Yaqoob et al. (2020), o armazenamento de informações em *ledgers* distribuídos inalteráveis elimina a dependência de uma autoridade central, aumentando a confiança dos *stakeholders* e facilitando auditorias.

Nesse contexto, a aplicação de arquiteturas baseadas em contratos inteligentes (*smart contracts*) oferece recursos para automação e governança segura das interações entre sistemas e usuários. Nielsen; Silva; Yu. (2020) explicam que esses contratos permitem transações condicionais baseadas em parâmetros previamente estabelecidos, otimizando processos como pagamentos automáticos e controle de acesso. Em setores como a construção civil, tais funcionalidades aumentam a transparência entre agentes, protegem a propriedade intelectual (PI) e viabilizam o compartilhamento seguro de dados sensíveis (Adu-amankwa et al., 2023). A Figura 4 apresenta um exemplo visual da integração entre contratos inteligentes, blockchain e gêmeos digitais, destacando seu papel na digitalização e automação de processos produtivos no contexto da Indústria 4.0.

Figura 4 — Integração de Gêmeos Digitais com Blockchain e Contratos Inteligentes na Indústria 4.0



Fonte: Yaqoob et al. (2020).

Um exemplo prático de aplicação encontra-se no protótipo *EtherTwin*, desenvolvido por Putz et al. (2021), que representa um aplicativo descentralizado (DApp) voltado ao gerenciamento seguro de informações de gêmeos digitais. A arquitetura do *EtherTwin* foi concebida para superar os desafios de descentralização e compartilhamento seguro de dados, utilizando componentes lógicos como *Registry*, *Authorization* e *Twin Data*. A solução adota padrões como *Contract Registry*, *Factory Contract* e *Multiple Authorization* para controle de acesso, além de um modelo híbrido de armazenamento, onde metadados e referências são mantidos *on-chain* e os dados completos são criptografados e armazenados *off-chain*.

Esse tipo de abordagem permite que grandes volumes de dados operacionais, como aqueles provenientes da manufatura de painéis de circuito impresso (PCBs), sejam tratados com eficiência e segurança. O estudo de caso avaliado por Putz et al. (2021), aliado a entrevistas com especialistas, demonstrou a viabilidade prática dessa arquitetura para o monitoramento de máquinas e gestão documental em ambientes industriais.

Outra solução relevante é a proposta de Hasan et al. (2020), que utiliza o sistema IPFS (*InterPlanetary File System*) para armazenar dados de gêmeos digitais fora da cadeia de blocos, mantendo apenas o *hash* na *blockchain*. Essa estrutura garante que qualquer alteração nos dados seja detectável, promovendo integridade, rastreabilidade e confidencialidade, visto que as chaves de criptografia são compartilhadas apenas entre usuários autorizados. A característica “*append-only*” da *blockchain* contribui para o rastreamento completo das alterações no histórico dos GDs (Putz et al., 2021 e Suhail et al., 2021).

A integração de GDs com *blockchain* também se mostra estratégica para a proteção da PI. Nielsen; Silva; Yu. (2020) argumentam que a representação de ativos físicos por meio de tokens não fungíveis (como ERC721 na rede Ethereum) permite que empresas, especialmente *start-ups*, mantenham controle sobre informações sensíveis do produto. Adu-Amankwa et al. (2023) reforçam essa visão ao evidenciar que contratos inteligentes podem assegurar o compartilhamento autenticado de dados entre designers, minimizando os riscos de exposição indevida de informações valiosas.

No que se refere à aplicação setorial, a literatura indica que a combinação GD+*Blockchain* tem sido explorada principalmente nas fases de construção e

operação de ativos no setor de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), com uma atenção crescente à fase de pós-construção (Adu-amankwa et al., 2023). Outros casos de uso incluem manutenção preditiva, gerenciamento de qualidade e planejamento logístico (Yaqoob et al., 2020 e Suhail et al., 2021).

Contudo, apesar dos avanços, desafios persistem. Putz et al. (2021) alertam para limitações de desempenho, como latência em redes distribuídas (e.g., Swarm), e riscos relacionados à segurança, como a perda de chaves de criptografia ou entrada indevida de dados. Há também obstáculos quanto à acessibilidade da tecnologia, conforme observado por Yaqoob et al. (2020), os quais destacam a necessidade de políticas públicas e incentivos à adoção por pequenas e médias empresas.

Por fim, a pesquisa de Putz et al. (2021) é destacada como uma das primeiras a adotar uma abordagem metodológica sistemática para avaliar a integração de *blockchain* na gestão de GDs. Adu-Amankwa et al. (2023) também ressaltam a necessidade de investigações empíricas que validem as promessas da integração GD+*Blockchain*, sobretudo na fase de transição entre construção e operação, uma lacuna ainda pouco explorada.

## 2.4 DIFERENÇAS ENTRE GÊMEOS DIGITAIS E SIMULAÇÃO

A simulação e os GDs são ferramentas computacionais amplamente utilizadas na engenharia e na indústria para modelagem, análise e otimização de sistemas. Embora possam parecer similares em determinados contextos, seus princípios, aplicações e funcionalidades diferem de maneira substancial.

A simulação tradicional refere-se a um modelo computacional que representa o comportamento de um sistema real sob determinadas condições. Trata-se de uma representação estática, comumente utilizada para estudar fenômenos específicos a partir de dados históricos ou parametrizações hipotéticas, sendo amplamente empregada na fase de projeto e desenvolvimento de produtos e processos (SIMULARGE, 2024).

Por outro lado, o GD é definido como uma réplica digital dinâmica de um objeto físico ou processo, constantemente alimentada por dados em tempo real oriundos de sensores e dispositivos conectados via IoT. De acordo com a Amazon Web Services (2024), “um gêmeo digital é uma representação virtual de um objeto ou processo físico

que serve como contraparte digital atualizada em tempo real”. Diferente da simulação, o GD não apenas representa o sistema, mas interage com ele continuamente, possibilitando a previsão de falhas, otimizações operacionais e tomada de decisões automatizadas com base em dados reais.

A TWI Global (2023) destaca que “a principal diferença entre simulações e gêmeos digitais reside na bidirecionalidade dos dados”. Enquanto a simulação depende de entradas definidas previamente, o GD é alimentado continuamente por dados do sistema físico, o que permite ajustes em tempo real e uma visão contínua do ciclo de vida do ativo monitorado.

Assim, a simulação pode ser compreendida como uma etapa analítica e preditiva isolada, enquanto o GD constitui uma infraestrutura de monitoramento, controle e *feedback* contínuo, integrando diferentes disciplinas de engenharia com tecnologias de *big data* e inteligência artificial (IA).

## 2.5 APLICAÇÕES DOS GÊMEOS DIGITAIS

Atualmente no âmbito da tecnologia, o conceito de Gêmeo Digital emerge como um instrumento poderoso e revolucionário em diversos setores de nossa sociedade. Este capítulo tem como intuito explorar suas aplicações e impactos desta ferramenta em diferentes setores, desde manufatura, saúde, manutenção entre outros.

### **Manufatura Inteligente**

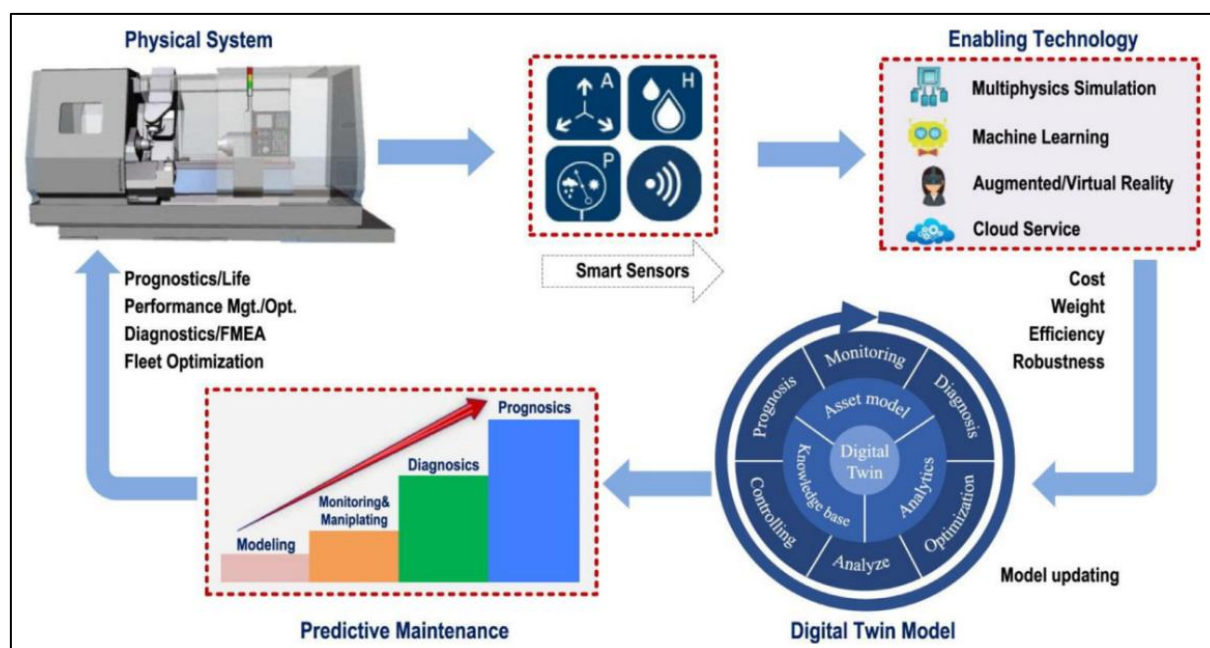
A manufatura inteligente tem se consolidado como um campo de pesquisa essencial para a evolução industrial, impulsionada pela digitalização e automação dos processos produtivos. Nesse contexto, os GDs, definidos como representações virtuais de sistemas ou processos físicos para monitoramento, análise e otimização em tempo real, têm se mostrado uma solução promissora. Essa tecnologia permite modelar, antecipar e aprimorar produtos e processos industriais antes da construção de protótipos e infraestrutura física, contribuindo para uma maior eficiência e redução de custos (Soori; Arezoo; Dastres. 2023). O interesse acadêmico e industrial por gêmeos digitais tem crescido significativamente desde 2015, impulsionado pelos avanços em aprendizado de máquina, comunicação sem fio e computação em nuvem

(Lu et al., 2020). Esse crescimento pode ser observado pelo aumento expressivo no número de publicações científicas sobre o tema, com destaque para pesquisas oriundas dos EUA, Alemanha e China (Lu et al., 2020).

Os GDs têm sido aplicados em diversas áreas da manufatura inteligente, possibilitando melhorias significativas. Dentre as principais aplicações, destacam-se a otimização de recursos e eficiência operacional por meio da criação de ambientes auto-organizáveis que oferecem visibilidade e flexibilidade completas. A simulação de processos de montagem por meio de gêmeos digitais permite otimizar a manufatura e melhorar a qualidade do produto, reduzindo custos e aumentando a eficiência. Além disso, a integração de GDs distribuídos entre empresas proporciona maior visibilidade do desempenho operacional e previsão de necessidades futuras (Lu et al., 2020). Outra aplicação relevante está na melhoria do planejamento de processos, com aumento da velocidade e precisão na manufatura, permitindo analisar a manufaturabilidade, custo e eficiência desde as fases iniciais do projeto (Leng et al. 2021).

A tecnologia de GDs também tem sido amplamente utilizada na avaliação de técnicas de usinagem Controle Numérico Computadorizado (CNC) em ambientes virtuais, permitindo a simulação e aprimoramento dessas operações. Estudos demonstram que essa abordagem viabiliza a análise do impacto de parâmetros de corte na vida útil da ferramenta e na temperatura de corte durante operações de fresamento. Além disso, a modelagem do consumo de energia em processos de manufatura permite identificar oportunidades para reduzir impactos ambientais e aumentar a sustentabilidade industrial. Outra aplicação estratégica é a previsão do desgaste de ferramentas de corte, que contribui para a manutenção preditiva e otimização do tempo de uso das ferramentas, reduzindo custos operacionais. O comissionamento virtual e a simulação de montagem também se mostram relevantes, permitindo otimizar processos de manufatura e melhorar a qualidade do produto por meio de simulações antes da implementação física (Soori; Arezoo; Dastres. 2023). A Figura 5 ilustra um framework típico de uso de gêmeos digitais no diagnóstico de falhas e manutenção preditiva em sistemas físicos complexos, com destaque para sensores inteligentes, simulações multiphysics e atualização contínua do modelo.

Figura 5 — Framework de diagnóstico de falhas utilizando Gêmeos Digitais



Fonte: Soori; Arezoo; Dastres (2023).

Apesar dos avanços, desafios ainda persistem na adoção dos GDs na manufatura inteligente. A interoperabilidade e a acessibilidade dessa tecnologia são limitadas pela ausência de padrões uniformizados de comunicação de dados (Lu et al., 2020). A implementação do padrão *MTConnect* tem sido uma solução viável para melhorar a interoperabilidade e acessibilidade dos gêmeos digitais em processos de usinagem. Outro aspecto relevante é o desenvolvimento de sistemas de manufatura inteligentes baseados em gêmeos digitais (DT-SMSD), que combinam modelos de simulação multifísica com dados em tempo real para projeto, implantação e comissionamento de processos industriais. No entanto, os modelos de DT-SMSD ainda requerem evolução para garantir uma integração completa e precisa entre os modelos virtuais e os sistemas físicos (Leng et al., 2021). As pesquisas futuras devem focar na integração do projeto de sistemas de manufatura com o desenvolvimento de novos produtos e na criação de padrões e critérios de avaliação para os modelos DT-SMSD. Além disso, a elaboração de arquiteturas de referência que considerem aspectos metodológicos, tecnológicos e operacionais é fundamental para consolidar a aplicação dos GDs na manufatura inteligente.

Os GDs representam um grande avanço para a manufatura inteligente, permitindo a otimização de processos, redução de custos e melhoria na qualidade dos

produtos. No entanto, desafios relacionados à padronização e integração ainda precisam ser superados para que essa tecnologia atinja seu potencial máximo. O desenvolvimento de normas internacionais e arquiteturas de referência é essencial para a consolidação da manufatura baseada em GDs.

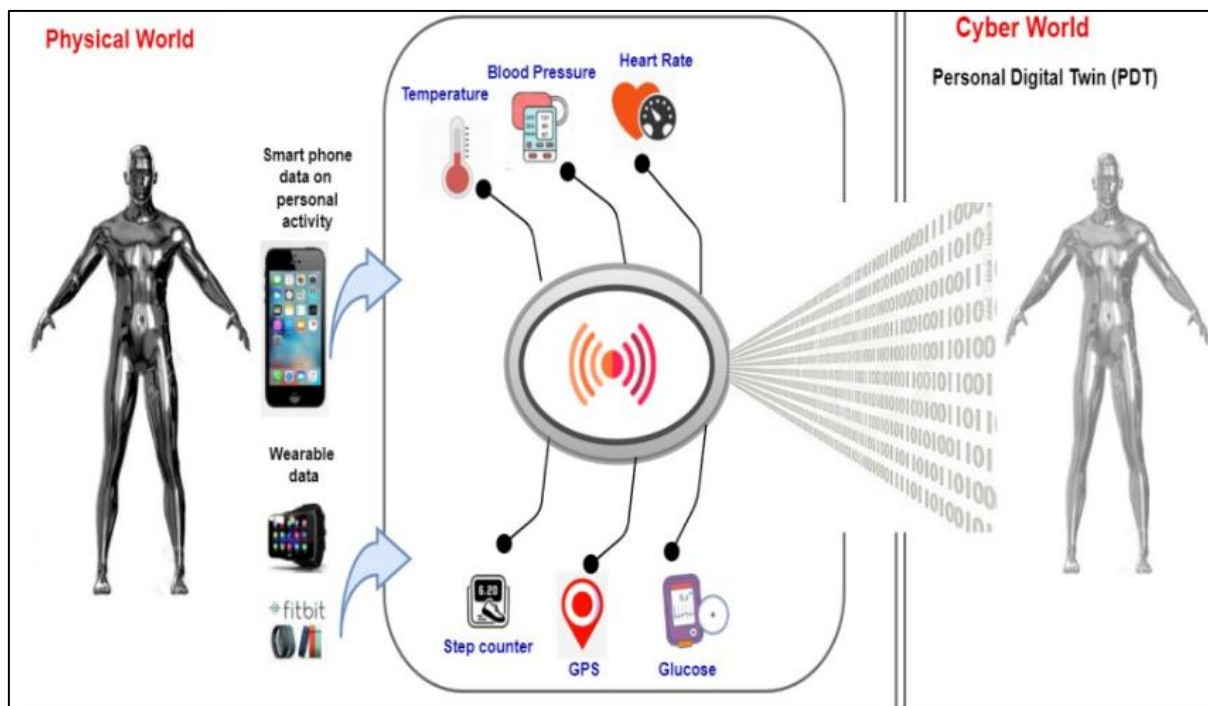
## **Saúde e Medicina**

Os avanços tecnológicos têm permitido a incorporação de gêmeos digitais no setor da saúde, proporcionando inovações em gestão pública, medicina personalizada e simulações clínicas. Essa tecnologia consiste na criação de réplicas digitais de sistemas físicos, permitindo a análise preditiva e a otimização de processos (Santos, 2022).

Na administração pública e na saúde coletiva, Ribeiro et al. (2022) propõem a aplicação de um GD integrado ao sistema de informação do Programa Nacional de Imunização do Brasil. A implementação desse modelo traria ganhos de eficiência e eficácia na gestão do programa, permitindo a análise de indicadores de qualidade em tempo real. Entre as vantagens destacam-se a otimização da aplicação de vacinas, redução do desperdício de doses, gerenciamento da troca de fabricantes entre doses, atualização do cadastro nacional do Cartão SUS e mitigação de fraudes. Além disso, a tecnologia possibilita o controle interno e externo, permitindo o envio de documentos comprobatórios ao Ministério Público em tempo real.

No contexto da medicina personalizada e de precisão, os GDs são considerados ferramentas promissoras para diagnósticos mais precisos, planejamento de tratamentos e previsão de efeitos terapêuticos. Santos (2022) destaca que a criação de réplicas digitais de pacientes possibilita análises individualizadas com dados em tempo real, ajustando tratamentos, monitorando respostas e rastreando modificações no estilo de vida, especialmente na oncologia. Sahal; Alsamhi; Brown. (2022) apresentam o conceito de Gêmeo Digital do Paciente (GDP) como uma versão aprimorada dessa tecnologia, oferecendo insights acionáveis para diagnósticos personalizados, seleção de terapias e planejamento de procedimentos. A Figura 6 ilustra a estrutura geral do GDP, mostrando como dados de sensores vestíveis e dispositivos móveis são capturados no mundo físico e traduzidos em representações digitais detalhadas no mundo cibernético.

Figura 6 — Arquitetura de Gêmeo Digital Pessoal (GDP) baseada em dados de dispositivos vestíveis e móveis



Fonte: Sahal; Alsamhi; Brown. (2022).

Na oncologia, Santos. (2022) propõem um modelo de Gêmeo Digital do Paciente com Câncer (GDPC), com um ciclo de vida contínuo para tomada de decisão compartilhada, avançando a oncologia preditiva e permitindo sistemas de saúde em tempo real. Kim et al. (2022) demonstraram a aplicação de gêmeos digitais na previsão de recorrência bioquímica do câncer de próstata utilizando aprendizado de máquina. Santos. (2022) utilizaram Redes Adversariais Generativas (RAGs) para criar GDs seguros voltados para a personalização do tratamento do câncer de pulmão.

Do ponto de vista tecnológico e ético, a maioria das aplicações de gêmeos digitais na saúde utiliza IA e aprendizado de máquina para modelagem e simulação. Entretanto, desafios relacionados à privacidade e segurança dos dados precisam ser abordados. Para mitigar esses riscos, Santos. (2022) propõem a anonimização de dados por meio de RAGs, enquanto Sahal; Alsamhi; Brown. (2022) sugerem o uso de *blockchain*. Aspectos éticos também são discutidos por Bruynseels; Santoni de Sio; Hoven (2018) e Popa et al. (2021), enfatizando a necessidade de regulamentações para garantir a transparência e o uso responsável dessa tecnologia.

Em suma, os GDs representam uma tecnologia promissora com ampla aplicação na medicina, desde a otimização de processos de saúde pública até a personalização de diagnósticos e tratamentos. No entanto, desafios relacionados à padronização, privacidade e segurança de dados ainda devem ser superados para permitir sua implementação em larga escala.

### **Cidades Inteligentes e Infraestrutura Urbana**

O conceito de GD tem ganhado relevância crescente no contexto de Cidades Inteligentes, em virtude de sua capacidade de integrar dados provenientes de sensores físicos IoT, IA e modelos computacionais com o objetivo de otimizar a gestão urbana e a infraestrutura crítica. A aplicação de GDs nesse domínio visa proporcionar uma representação virtual precisa e dinâmica dos ativos urbanos, permitindo simulações, diagnósticos em tempo real, manutenção preditiva, análise de cenários e suporte à tomada de decisão baseada em dados.

O uso de GDS em cidades inteligentes está fortemente associado à integração com IoT e IA, buscando-se um ecossistema urbano mais eficiente, sustentável e resiliente. A obra apresenta uma abordagem interdisciplinar, reunindo diretrizes para implementação de GDs voltadas à gestão de ativos urbanos, considerando aspectos como sustentabilidade, segurança e confiabilidade. Os autores destacam a convergência entre GD, IoT e aprendizado de máquina como essencial para transformar grandes volumes de dados urbanos em ações concretas, além de enfatizarem a importância de protocolos leves e seguros como o *Constrained Application Protocol* (CoAP) para a comunicação de dispositivos (Farsi et al., 2020).

No levantamento realizado por Mylonas et al. (2021), foi identificada a aplicação dos GDS em diversos setores urbanos, incluindo transporte inteligente, gestão de energia, planejamento urbano e monitoramento ambiental. A análise de mais de 240 publicações evidenciou que, embora haja um grande potencial na adoção de GDs em ambientes urbanos, ainda existem desafios significativos a serem superados, como a ambiguidade conceitual do termo, a carência de arquiteturas sistemáticas e a necessidade de maior maturidade nas abordagens de implementação (Liu et al., 2021). Além disso, a pesquisa de Miehe et al. (2021) apontou a escassez de trabalhos com abordagem ascendente voltada à sustentabilidade urbana, sugerindo que o

desenvolvimento de GDs deve incorporar desde as fases iniciais requisitos ligados à produção e operação sustentáveis.

Outro exemplo prático de aplicação está no estudo empírico conduzido por Dembski et al. (2020), no qual ferramentas de GDs foram empregadas para fomentar a participação pública no contexto da transição energética na cidade de Herrenberg, Alemanha. Nesse caso, a utilização de perfis de polaridade permitiu captar percepções dos cidadãos em relação aos modelos urbanos digitais, promovendo um engajamento mais efetivo das partes interessadas no processo de transformação urbana. A Figura 7 ilustra uma dessas aplicações, mostrando a visualização de rotas de pedestres e o modelo sintático espacial inserido no gêmeo digital urbano, utilizado para simular o potencial de mobilidade e ocupação do espaço.

Figura 7 — Aplicação de gêmeo digital urbano com rotas e análise sintática espacial



Fonte: Dembski et al. (2020).

Em síntese, os GDs despontam como uma ferramenta estratégica para o desenvolvimento de Cidades Inteligentes, oferecendo uma plataforma integrada para o monitoramento, simulação e gestão dos sistemas urbanos. Contudo, conforme destacam as diversas fontes analisadas, a consolidação dessa tecnologia requer o enfrentamento de desafios técnicos e conceituais, sobretudo no que tange à segurança da informação, à padronização das arquiteturas e à integração com políticas públicas sustentáveis.

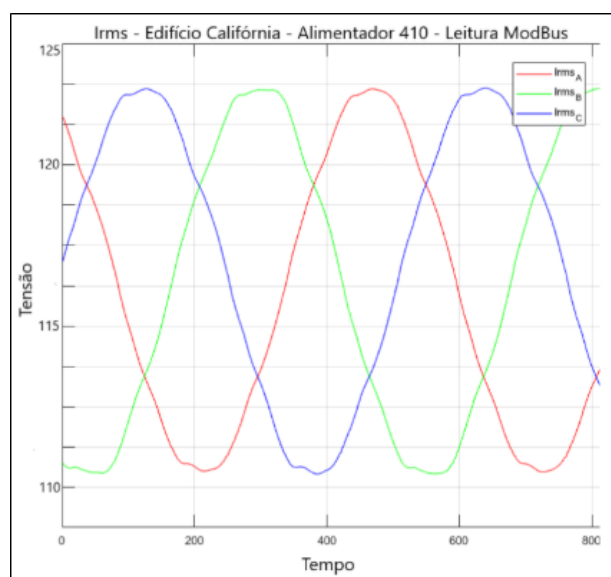
## Energia e Sustentabilidade

Os GDs têm se consolidado como uma ferramenta estratégica para a modernização e a sustentabilidade no setor de energia. Sua aplicação permite simulações, análises preditivas e controle em tempo real de sistemas físicos, promovendo eficiência energética, confiabilidade operacional e suporte à tomada de decisão com base em dados reais.

Na área de distribuição de energia elétrica, Fischer et al. (2024) demonstraram a aplicação de gêmeos digitais em sistemas subterrâneos duplo radiais seletivos, utilizando a tecnologia OPAL-RT para simulações de parâmetros elétricos como tensão, corrente e fator de potência. A substituição de chaves seccionadoras manuais por chaves a gás SF<sub>6</sub>, aliada à comunicação via protocolo *Modbus*, permitiu a operação remota e o monitoramento em tempo real do sistema. Os resultados das simulações apresentaram boa aproximação com os dados reais (erro de cerca de 5%), reforçando o potencial da tecnologia para prevenir falhas e proteger equipamentos, além de embasar estratégias de modernização das redes urbanas.

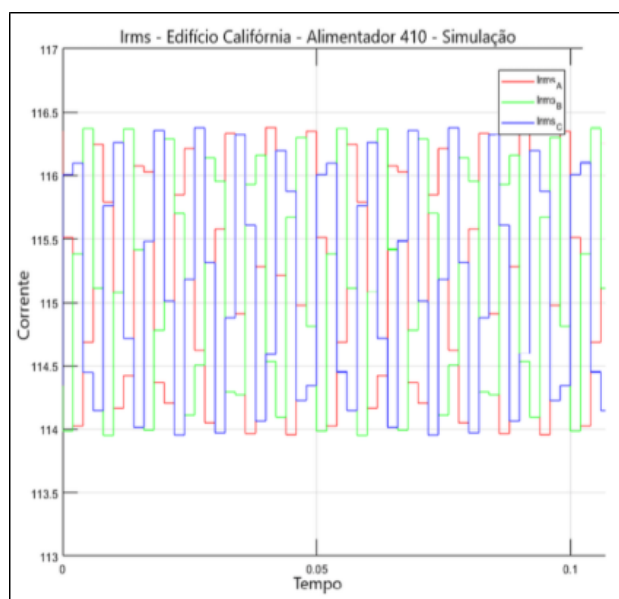
Outro exemplo de aplicação é a proposta de uma Arquitetura Genérica de Gêmeo Digital (GDTA) por Steindl et al. (2020), voltada a sistemas industriais de energia. A GDTA, baseada na estrutura *Reference Architectural Model for Industrie 4.0* (RAMI 4.0) e utilizando tecnologias da *Web Semântica*, foi validada em um sistema de armazenamento térmico (PBTES). A arquitetura facilitou a integração de informações, a simulação de desempenho térmico e o compartilhamento de dados em uma base de conhecimento comum, demonstrando que GDs podem ser desenvolvidos de forma independente da tecnologia utilizada, aumentando a interoperabilidade e o reuso de soluções em diferentes contextos energéticos. A Figura 8 apresenta os dados reais de tensão obtidos por leitura *Modbus* em um edifício comercial, enquanto a Figura 9 mostra a simulação correspondente realizada com base no modelo digital implementado no Gêmeo Digital. A boa correlação entre os sinais reforça a confiabilidade da modelagem.

Figura 8 — Leitura real de correntes trifásicas no Edifício Califórnia via protocolo Modbus



Fonte: Fischer et al. (2024).

Figura 9 — Simulação de corrente trifásica utilizando Gêmeo Digital do sistema elétrico



Fonte: Fischer et al. (2024).

No contexto da eficiência energética em edifícios, Bortolini et al. (2022) categorizaram as aplicações dos GDs em quatro frentes principais: otimização de projeto, conforto dos ocupantes, operação e manutenção, e simulação de consumo de energia. Em projetos de *retrofit*, por exemplo, o uso de sistemas *Heating, Ventilation and Air Conditioning* (HVAC) otimizados e chaminés solares possibilitou

reduções significativas na demanda energética. Em ambientes universitários, a integração com IoT e sensores permitiu manter níveis de conforto enquanto se reduziam os gastos com energia. Além disso, a manutenção preditiva baseada em dados reais melhorou o desempenho de sistemas de climatização e iluminação, reduzindo custos operacionais. A aplicação de modelos de aprendizado de máquina, especialmente redes neurais artificiais, aliada ao uso de plataformas *Building Information Modeling* (BIM), mostrou-se essencial para simulações energéticas precisas em escala urbana.

No setor de energia renovável, os GDs têm sido empregados para otimizar o desempenho de ativos solares, eólicos e de armazenamento. De acordo com Bassey et al. (2024), a tecnologia permite prever a produção de energia, planejar manutenções de forma proativa e gerenciar o ciclo de vida de ativos com maior eficiência. Isso resulta não apenas em um melhor retorno sobre os investimentos, mas também na redução de riscos operacionais e custos associados. Ao permitir simulações avançadas e avaliação de viabilidade com base em dados reais, os GDs aumentam a transparência para investidores, potencializando a captação de recursos para projetos sustentáveis. Além disso, a adoção contínua desses sistemas impulsiona a inovação tecnológica no setor, favorecendo a transição para um modelo energético mais limpo, seguro e economicamente viável.

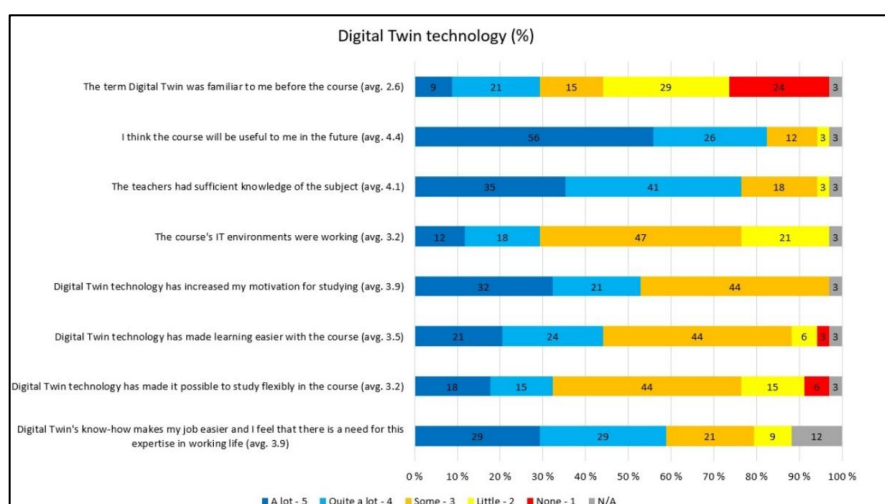
Em síntese, os gêmeos digitais se destacam como ferramentas essenciais para promover a sustentabilidade energética, seja por meio da modernização de redes, da eficiência em edificações ou da otimização de fontes renováveis. Sua adoção fortalece a resiliência dos sistemas de energia, ao mesmo tempo que contribui para a redução de emissões e o uso inteligente dos recursos naturais.

## **Educação**

A incorporação de tecnologias digitais avançadas na educação tem ganhado crescente atenção no cenário acadêmico e industrial, destacando-se os GDs como uma das abordagens mais promissoras. Um GD consiste na representação virtual de um sistema físico, permitindo simulações, interações e análises em tempo real. Na área educacional, essa tecnologia apresenta múltiplas aplicações e benefícios, especialmente no contexto da educação em engenharia e áreas correlatas.

Diversos estudos demonstram que o uso de GDs pode aumentar a motivação dos estudantes, melhorar o aprendizado e proporcionar maior engajamento quando utilizados de maneira adequada. Segundo os autores, a experiência de implementação de GDs em cursos de engenharia confirmou resultados anteriores sobre os impactos positivos da digitalização no ensino técnico. Entre os principais benefícios observados, destaca-se o desenvolvimento de expertise técnica e o aumento da responsabilidade dos alunos no processo de aprendizagem, além de oportunidades de empregabilidade decorrentes da familiarização com essa tecnologia (Liljaniemi; Paavilainen. 2020). As Figuras 9 a seguir ilustram os resultados da pesquisa aplicada aos estudantes do curso "Simulation in Control System Design", evidenciando a percepção positiva sobre ferramentas digitais em geral e sobre a tecnologia de Gêmeos Digitais em particular.

Figura 10 — Percepção dos estudantes sobre o uso de Gêmeos Digitais na formação em engenharia

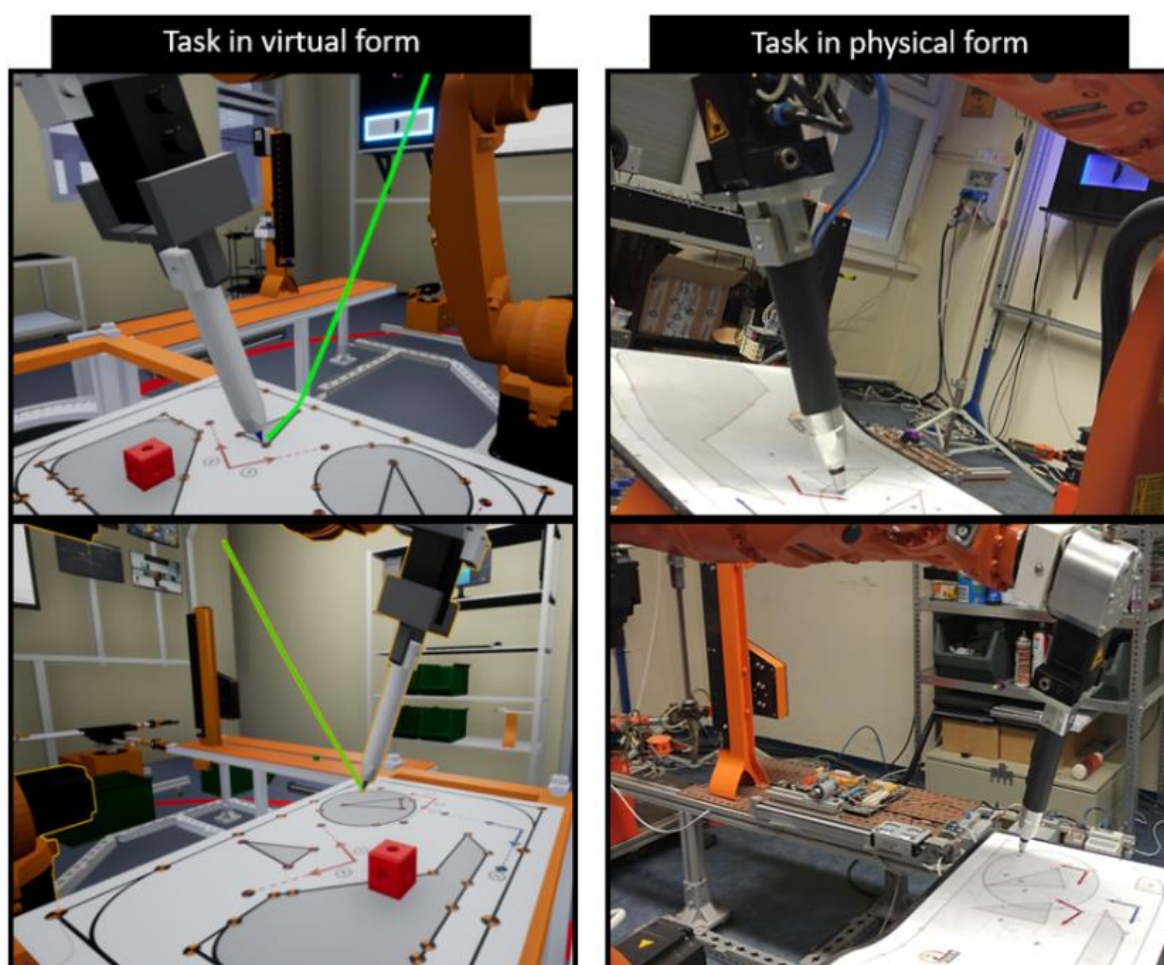


Fonte: Liljaniemi; Paavilainen. (2020).

A criação de ambientes de simulação realistas e interativos, proporcionada pelos GDs, permite que os alunos explorem conceitos complexos de maneira prática e contextualizada. Universidades podem utilizar essa tecnologia para virtualizar campi, aprimorar processos de ensino, realizar treinamentos técnicos, gamificar disciplinas e reduzir custos operacionais com laboratórios físicos (Bachmann; Silveira; Martins., 2024). A redução de custos também é destacada por Zacher (2020), que identificou uma economia de aproximadamente 26% ao comparar o uso de GDs com a construção de múltiplos dispositivos físicos em laboratórios de ensino.

A possibilidade de simular ambientes técnicos e equipamentos de alto custo torna os GDs uma alternativa viável, principalmente para instituições que não dispõem de infraestrutura física adequada. Além disso, a implementação da tecnologia permite a participação simultânea de um número ilimitado de estudantes, eliminando a necessidade de instalação de hardware específico e criando um ambiente de aprendizagem mais acessível (Zacher, 2020).

Figura 11 — Comparação entre forma virtual (Gêmeo Digital) e forma física para o treinamento com braço robótico industrial



Fonte: Erdei; Krakó; Husi. (2022).

A gamificação de disciplinas por meio de GDs também tem sido explorada, como no caso do ensino de Matemática na Coreia do Sul, onde o uso dessa tecnologia contribuiu para tornar o aprendizado mais envolvente, especialmente para alunos de

áreas menos afins. Ademais, a complexidade envolvida no desenvolvimento de GDs pode ser explorada como oportunidade para o desenvolvimento de competências em gerenciamento de projetos, dada a natureza interdisciplinar dessas soluções (Bachmann; Silveira; Martins., 2024).

No campo da robótica educacional, os GDs têm sido empregados para virtualizar centros de treinamento, oferecendo aos estudantes uma experiência mais imersiva e eficaz. Erdei; Krakó; Husi (2022) demonstraram que alunos que utilizaram GDs de braços robóticos industriais apresentaram desempenho superior àqueles treinados com materiais convencionais, evidenciando o potencial da tecnologia para elevar a qualidade do aprendizado técnico. A Figura 11 ilustra esse cenário, apresentando lado a lado a execução de uma tarefa com braço robótico em sua versão virtual GD e em sua forma física, conforme observado no estudo.

As aplicações dos GDs se estendem ainda para áreas como STEAM (Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática), saúde, arquitetura e engenharia civil (AEC), bem como treinamento técnico industrial. Na Educação em Saúde, os GDs têm potencial emergente, permitindo a simulação de anatomia, procedimentos cirúrgicos e personalização de tratamentos médicos. No setor AEC, apesar de ainda se encontrar em fase prototípica devido à ausência de protocolos padronizados, a academia e a indústria vêm colaborando para superar tais limitações. Já em setores consolidados, como o automotivo e o energético, os GDs são amplamente empregados para pesquisa, desenvolvimento e capacitação, inclusive com simulações para cibersegurança em redes inteligentes (Bachmann; Silveira; Martins., 2024).

As aplicações dos GDs se estendem ainda para áreas como STEAM (Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática), saúde, arquitetura e engenharia civil (AEC), bem como treinamento técnico industrial. Na Educação em Saúde, os GDs têm potencial emergente, permitindo a simulação de anatomia, procedimentos cirúrgicos e personalização de tratamentos médicos. No setor AEC, apesar de ainda se encontrar em fase prototípica devido à ausência de protocolos padronizados, a academia e a indústria vêm colaborando para superar tais limitações. Já em setores consolidados, como o automotivo e o energético, os GDs são amplamente empregados para pesquisa, desenvolvimento e capacitação, inclusive com

simulações para cibersegurança em redes inteligentes (Bachmann; Silveira; Martins., 2024).

Em suma, os GDs representam uma ferramenta poderosa para a transformação do ensino técnico e científico, contribuindo para a formação de profissionais mais preparados para os desafios do mercado, ao mesmo tempo em que promovem uma educação mais acessível, motivadora e eficiente.

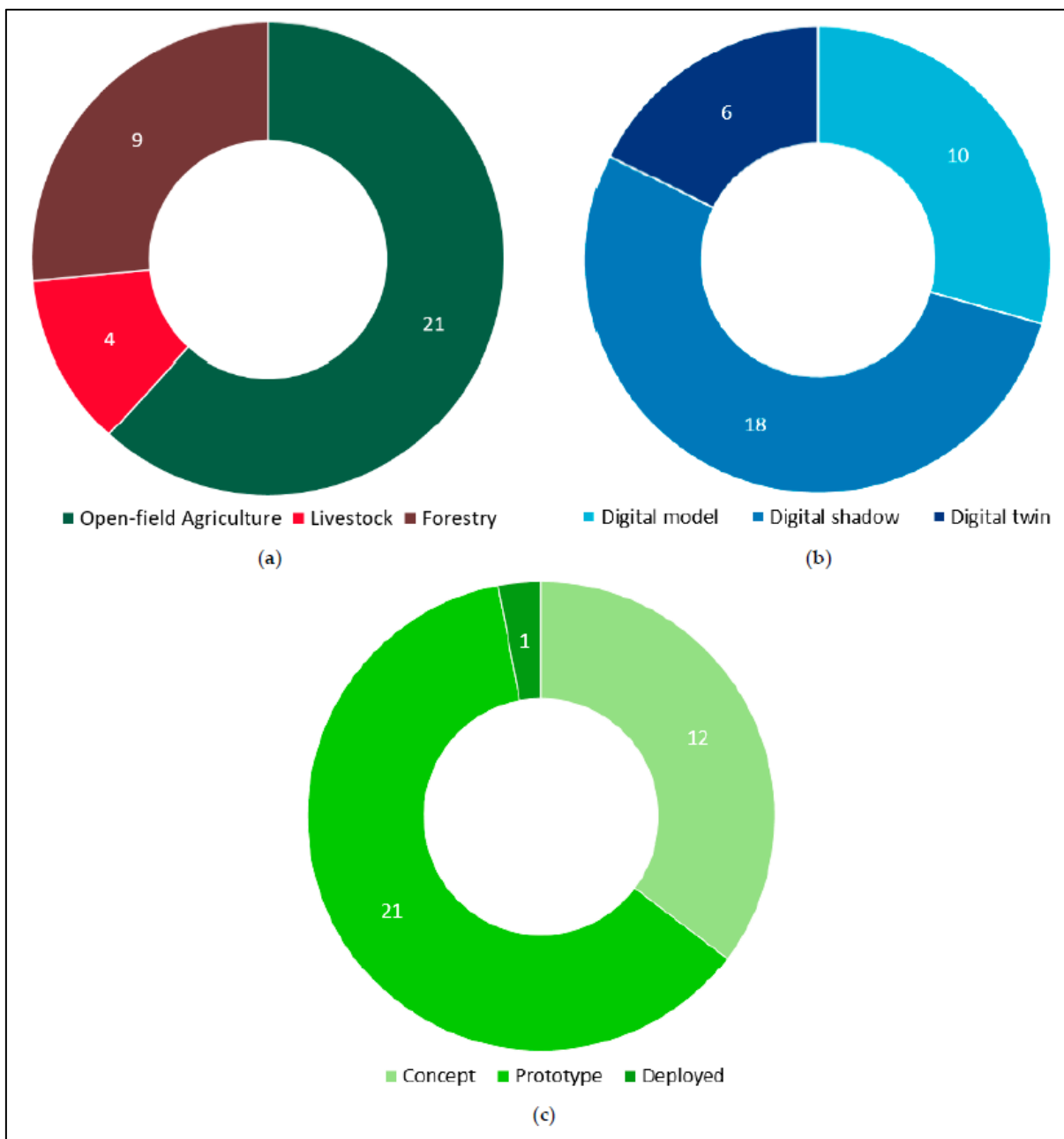
## **Agricultura**

Na agricultura, a aplicação de GDs ainda se encontra em estágio de desenvolvimento, com predominância de implementações classificadas como Modelo Digital (MD) ou Sombra Digital (SD), segundo a taxonomia proposta por Kritzinger et al. (2018).

Ainda que a maioria dos casos se restrinja aos dois primeiros níveis de maturidade, diversas aplicações já demonstram o potencial transformador dos GDs na agricultura. Entre os exemplos mais notáveis está o monitoramento contínuo de culturas e solo, no qual GDs fornecem informações detalhadas e atualizadas, permitindo respostas rápidas a anomalias. Também se destaca a otimização de layout de pomares e a detecção precoce de indicadores de degradação vegetal, por meio da análise de imagens e dispositivos holográficos (Pylianidis; Osinga; Athanasiadis, 2021). A Figura 12 resume as principais evidências encontradas na literatura sobre o uso de Gêmeos Digitais na agricultura e em áreas relacionadas, incluindo o campo de aplicação, o grau de integração digital e o nível de maturidade tecnológica das soluções.

Outro uso relevante é a emulação de veículos terrestres não tripulados (UGVs), por meio de modelos tridimensionais dos campos, o que possibilita testes virtuais de eficiência operacional. Além disso, a identificação de pragas e doenças em plantas tem sido facilitada com o uso de aplicativos móveis, os quais integram dados visuais e consultas especializadas (Pylianidis; Osinga; Athanasiadis, 2021).

Figura 12 — Panorama dos Gêmeos Digitais na agricultura: (a) campo de aplicação, (b) nível de integração e (c) maturidade tecnológica



Fonte: Tagarakis et al. (2024).

No contexto da pecuária, o monitoramento contínuo de gado mediante GDs permite identificar oportunidades de melhoria, promover o bem-estar animal e elevar a produtividade leiteira. Outros exemplos incluem a otimização de operações agrícolas, por meio da análise dos dados coletados em campo, e o controle ambiental

para produção de malte, baseado em sensores IoT que regulam variáveis como temperatura e umidade (Purcell; Neubauer, 2023).

Avanços também têm sido observados na aplicação de GDs para monitoramento de árvores em pomares, utilizando sensores LIDAR 3D e câmeras, além do suporte ao planejamento territorial por meio de gêmeos digitais espaço-temporais de paisagens cultivadas, que contribuem para o *geodesign* rural (Purcell; Neubauer, 2023).

A proposta do *framework* AgriLoRa também é relevante, ao oferecer uma solução de baixo custo para detecção de doenças, ervas daninhas e deficiências nutricionais, utilizando redes de sensores sem fio e algoritmos de visão computacional (Angin et al., 2020). Complementarmente, a otimização de irrigação de precisão tem sido possível com sensores que medem variáveis como umidade, temperatura e luminosidade, associados à localização geoespacial (Peladarinos et al., 2023).

Do ponto de vista tecnológico, a arquitetura de um GD agrícola abrange componentes como IA, simulações, modelos preditivos, visualização em tempo real e comunicação por meio de protocolos como MQTT, CoAP e redes *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) (Escribà-Gelonch et al., 2024), (Angin et al., 2020) e (Peladarinos et al., 2023). A IA, em especial, tem se mostrado fundamental para lidar com grandes volumes de dados e executar ações de maneira eficiente (Escribà-Gelonch et al., 2024).

Entretanto, diversos desafios ainda limitam a expansão dos GDs na agricultura. A complexidade dos sistemas biológicos, a escassez de dados de campo de qualidade, as dificuldades de integração de dados multimodais e a ausência de arquiteturas computacionais escaláveis são alguns dos principais entraves (Pylianidis; Osinga; Athanasiadis, 2021) e (Tagarakis et al., 2024). Questões éticas relacionadas à propriedade de dados e à privacidade também requerem atenção especial (Escribà-Gelonch et al., 2024).

## **Manutenção**

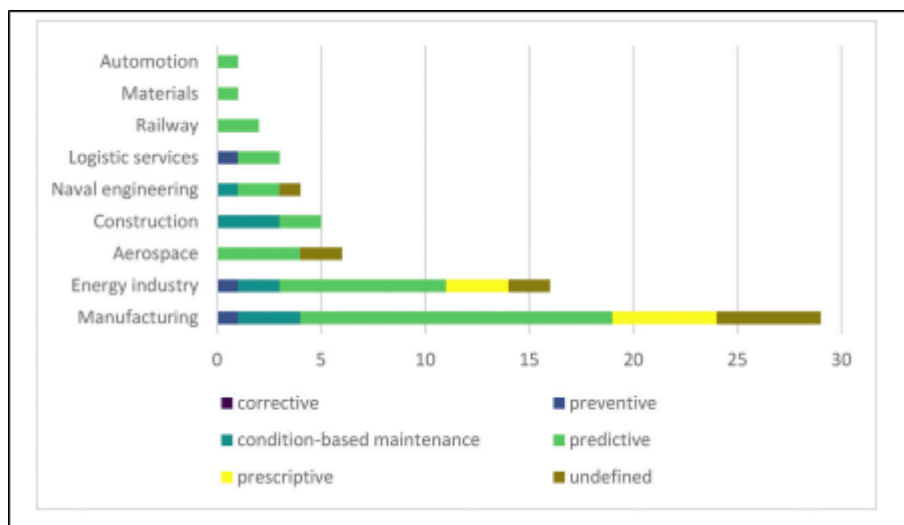
Os Gêmeos Digitais (GDs) vêm se consolidando como uma das tecnologias mais promissoras no âmbito da Indústria 4.0, sobretudo na área de manutenção e inspeção de ativos físicos. A capacidade dessa tecnologia de integrar modelos

computacionais a dados em tempo real, oriundos de sensores e dispositivos IoT, permite a construção de réplicas digitais fiéis de sistemas e equipamentos. Esses modelos possibilitam não apenas a visualização do estado atual do ativo, mas também a simulação de seu comportamento futuro, promovendo a transição de abordagens corretivas e preventivas para estratégias baseadas em manutenção preditiva (*Predictive Maintenance* – PdM).

Uma revisão sistemática abrangente da literatura conduzida por Van Dinter; Tekinerdogan; Catal. (2022) identificou 42 estudos primários que tratam da aplicação de GDs especificamente em manutenção preditiva. A análise revelou aspectos essenciais, como os objetivos dos estudos, os domínios industriais de aplicação, as plataformas de desenvolvimento utilizadas, os tipos de modelagem empregados, os níveis de abstração dos modelos, os protocolos de comunicação de dados, os parâmetros monitorados e os desafios técnicos enfrentados. Dentre os principais desafios, destacam-se o ônus computacional elevado, a diversidade e o volume de dados gerados, além da complexidade dos modelos, tanto em nível de ativos quanto de componentes individuais.

No que diz respeito aos setores de aplicação, tanto Van Dinter; Tekinerdogan; Catal. (2022) quanto Errandonea; Beltrán; Arrizabalaga. (2020) apontam a manufatura, a indústria de energia e o setor aeroespacial como os principais domínios em que GDs têm sido empregados para fins de manutenção. Esses setores se destacam por apresentarem ativos de alto valor agregado, cujas falhas acarretam custos significativos de inatividade e riscos operacionais. A adoção de GDs nesses contextos viabiliza a análise contínua de indicadores de saúde dos ativos, permitindo, por exemplo, a estimativa do Remaining Useful Life (RUL), que é amplamente utilizada para prever o tempo restante de operação segura de um equipamento (Van Dinter; Tekinerdogan; Catal, 2022). A Figura 13 ilustra a distribuição dos usos de Gêmeos Digitais em diferentes setores industriais, com ênfase na manutenção, otimização de processos, e design.

Figura 13 — Aplicações de Gêmeos Digitais por setor industrial e finalidade



Fonte: Errandonea; Beltrán; Arrizabalaga et al. (2020).

A classificação proposta por You et al. (2022) organiza os esforços de pesquisa em três categorias fundamentais: (1) estruturas de aplicação, que se referem aos *frameworks* conceituais e arquiteturas tecnológicas para implementação de GDs; (2) métodos de modelagem, que abrangem técnicas como simulação multifísica, *machine learning* e redes neurais; e (3) a interação dinâmica entre o gêmeo digital e o ativo físico, a qual depende de um fluxo contínuo de dados bidirecionais. Os autores observam que a maioria dos estudos analisados se concentra em componentes mecânicos individuais, com relativamente poucos trabalhos abordando a modelagem de sistemas completos, o que evidencia uma lacuna na literatura atual.

Além dos setores tradicionais, outros domínios têm explorado o uso de GDs. Silva; Porto; Kalili. (2024), por exemplo, desenvolveram um estudo de caso aplicado à indústria automotiva, no qual um gêmeo digital foi criado com o objetivo de otimizar o desempenho de veículos e implementar rotinas de manutenção mais precisas. Este estudo ilustra não apenas a aplicabilidade da tecnologia a novos contextos industriais, mas também os benefícios adicionais como maior eficiência operacional, aumento da segurança e promoção da sustentabilidade.

Ainda assim, diversos desafios precisam ser enfrentados para a implementação efetiva de GDs em PdM. Entre os principais entraves técnicos estão a complexidade dos modelos, que impõe elevadas demandas computacionais, e a necessidade de dados de alta qualidade e com falhas rotuladas para o treinamento de algoritmos preditivos robustos (Van Dinter; Tekinerdogan; Catal, 2022) e (You et al., 2022). A

ausência de padronização nos *frameworks* de desenvolvimento, a dificuldade de se construir modelos digitais de alta fidelidade e a gestão de sistemas multi-níveis e multi-componentes são obstáculos adicionais que dificultam a escalabilidade da tecnologia.

No caso específico da indústria automotiva, Silva; Porto; Kalili, (2024) destacam ainda desafios como os altos custos relacionados ao armazenamento e ao processamento do grande volume de dados gerados, os riscos de segurança cibernética derivados da troca contínua de informações e a escassez de profissionais especializados em modelagem digital e análise preditiva.

Apesar desses desafios, os benefícios proporcionados pelos GDs são amplamente reconhecidos. Errandonea; Beltrán; Arrizabalaga. (2020) identificaram a PdM como a estratégia de manutenção mais comumente associada a GDs. You et al. (2022) salientam a significativa redução nos custos associados a falhas inesperadas e paradas não planejadas, enquanto Silva; Porto; Kalili. (2024) destacam os ganhos em sustentabilidade, segurança e desempenho operacional. Além disso, observa-se um aumento expressivo no número de publicações científicas sobre o tema a partir de 2018, refletindo o crescente interesse da comunidade acadêmica e industrial (Errandonea; Beltrán; Arrizabalaga, 2020).

Adicionalmente, Menegon e Isatto (2023) analisaram o uso de GDs no setor da construção civil, com foco na inspeção e manutenção de estruturas existentes. A aplicação neste setor amplia ainda mais o escopo dos GDs, indicando sua versatilidade e potencial transformador em diferentes contextos industriais.

## 2.6 DIFERENÇAS ENTRE GÊMEOS DIGITAIS E SISTEMA SUPERVISÓRIO

Os avanços recentes na digitalização industrial impulsionaram o desenvolvimento de tecnologias que visam aumentar a eficiência e a previsibilidade dos sistemas produtivos. Entre essas tecnologias, destacam-se os sistemas supervisórios, comumente conhecidos como SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), e os GDs, que embora apresentem funcionalidades complementares, possuem naturezas distintas.

Os sistemas supervisórios são tradicionalmente utilizados para o monitoramento e controle em tempo real de processos industriais, como no setor de energia, saneamento e manufatura. Eles permitem a visualização de variáveis de

processo, envio de comandos remotos e emissão de alarmes em caso de desvios operacionais (THINGABLE, 2023). Sua estrutura se baseia na coleta de dados por sensores e CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), que são visualizados em uma interface gráfica centralizada.

Por outro lado, os GDs representam uma réplica virtual de ativos físicos ou sistemas, conectada continuamente aos dados em tempo real da planta física, com a finalidade de simular, prever e otimizar seu comportamento (REINPOLD et al., 2023). A proposta dos gêmeos digitais não se limita ao acompanhamento do estado atual do sistema, como o SCADA, mas envolve a modelagem matemática e preditiva baseada em IA e aprendizado de máquina, proporcionando uma análise mais aprofundada e proativa do sistema (ELECTRICAL VOICE, 2022).

Segundo Casne Engineering (2021), os sistemas supervisórios funcionam como uma "janela para o presente", enquanto os GDs se propõem a "modelar o presente, prever o futuro e influenciar as decisões". Além disso, a comunicação dos gêmeos digitais com os sistemas físicos é bidirecional, o que permite simulações de cenários e ajustes preditivos, ao contrário dos sistemas SCADA, cuja comunicação é geralmente unidirecional – da planta para a interface de supervisão.

A Tabela 1 ilustra de forma resumida as principais diferenças entre essas tecnologias.

Tabela 1 — Principais Diferenças Entre Gêmeos Digitais X Sistema Supervisório

| Aspecto             | Gêmeos Digitais                                                          | Sistemas Supervisórios (SCADA)         |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Objetivo principal  | Simulação, otimização preditiva e monitoramento e controle em tempo real | Monitoramento e controle em tempo real |
| Tipo de comunicação | Bidirecional (sistema ↔ modelo)                                          | Unidirecional (sistema ↔ supervisão)   |
| Base tecnológica    | Modelagem matemática, IA e machine learning                              | Sensoriamento e controle em tempo real |
| Aplicações          | Previsão de falhas, simulação, desenvolvimento, operação e manutenção    | Operação e manutenção                  |

Fonte: O autor (2025).

Essa diferenciação é fundamental para compreender a evolução dos sistemas de automação industrial e as novas possibilidades trazidas pela Indústria 4.0.

## 2.7 SOFTWARES UTILIZADOS PARA CRIAÇÃO DE GÊMEOS DIGITAIS

O desenvolvimento de gêmeos digitais depende da utilização de plataformas e ferramentas computacionais capazes de integrar modelagem física, conectividade em tempo real, análise de dados e visualização imersiva. Esses softwares são fundamentais para representar digitalmente ativos físicos e seus comportamentos, permitindo a simulação contínua e a tomada de decisões orientadas por dados. A seguir, apresentam-se algumas das principais soluções utilizadas atualmente no setor industrial e urbano.

### Ansys Twin Builder

Entre as ferramentas mais robustas disponíveis, destaca-se o Ansys Twin Builder, que permite a criação de modelos de ordem reduzida a partir de simulações 3D complexas, combinando dados de sensores com simulações baseadas em física para calibrar e validar o comportamento do ativo físico (ANSYS, 2024).

Figura 14 — Visão geral do Ansys Twin Builder: integração entre projeto e operações com gêmeos digitais



Fonte: Ansys (2024).

A solução oferece suporte à modelagem multidomínio e à integração com plataformas como Microsoft Azure IoT e PTC ThingWorx, sendo amplamente aplicada nos setores automotivo, aeroespacial e de energia. A Figura 14 ilustra a proposta do Ansys como elo entre design e operações, com destaque para a reutilização do projeto em campo, aprendizado com dados e previsões baseadas em modelos híbridos.

## Bentley

No campo das aplicações urbanas e de infraestrutura, o Bentley OpenCities Planner é amplamente utilizado para a construção de gêmeos digitais de cidades inteligentes. A ferramenta permite a integração de dados *Computer-Aided Design* (CAD), BIM e *Geographic Information System* (GIS), possibilitando a visualização tridimensional de grandes áreas urbanas e a realização de análises baseadas em dados geoespaciais (BENTLEY SYSTEMS, 2024). Um diferencial dessa plataforma é a sua capacidade de comunicação com *stakeholders* por meio de visualizações interativas e acessíveis via dispositivos móveis e realidade virtual. A Figura 15 mostra a interface do Bentley OpenCities Planner com exemplos de uso em planejamento urbano, mapeamento 3D e saneamento básico, demonstrando como a tecnologia de gêmeos digitais pode ser aplicada à infraestrutura das cidades.

Figura 15 — Aplicações do Bentley OpenCities Planner em contextos urbanos e de saneamento

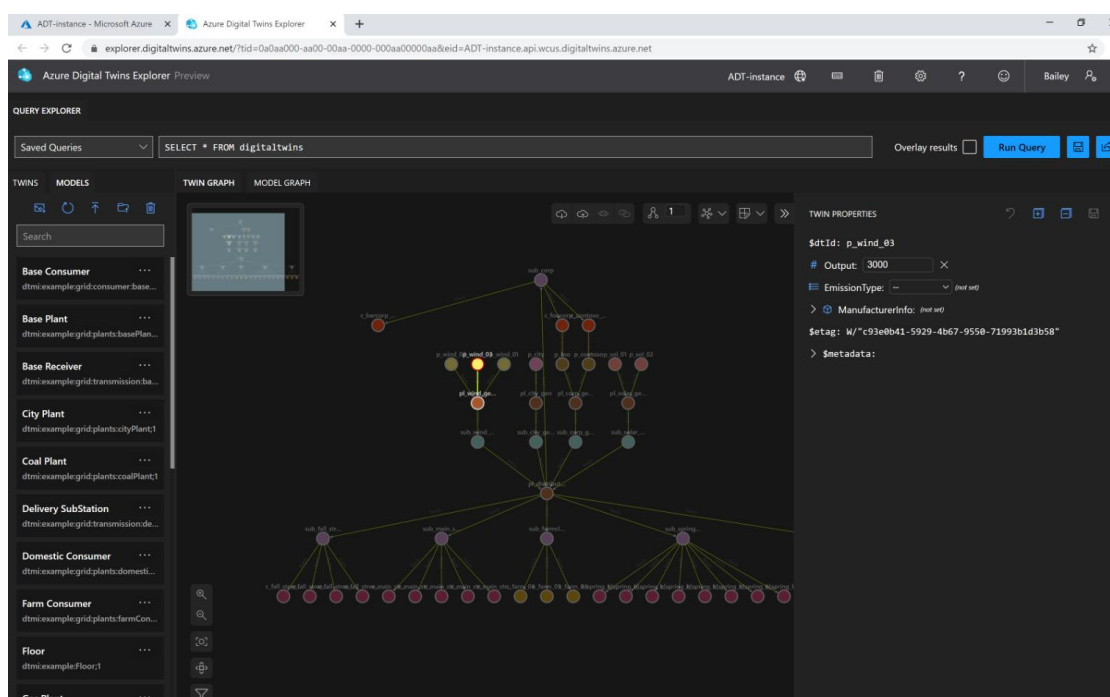


Fonte: Bentley Systems (2024).

## Microsoft Azure

A plataforma Microsoft Azure Digital Twins representa uma abordagem baseada em nuvem voltada para a modelagem de ambientes físicos complexos. Por meio da Digital Twins Definition Language (DTDL), permite a definição de relações e interações entre entidades digitais, conectando dispositivos reais via IoT e mantendo um grafo de execução que reflete o estado atual do ambiente físico (MICROSOFT, 2025). Essa arquitetura facilita a análise operacional em tempo real e é adotada em projetos de gestão predial, manufatura e redes urbanas. A Figura 16 apresenta a interface da plataforma Microsoft Azure Digital Twins Explorer, com um exemplo de grafo relacional dinâmico representando ativos físicos conectados via IoT e suas respectivas propriedades digitais.

Figura 16 — Interface do Azure Digital Twins Explorer



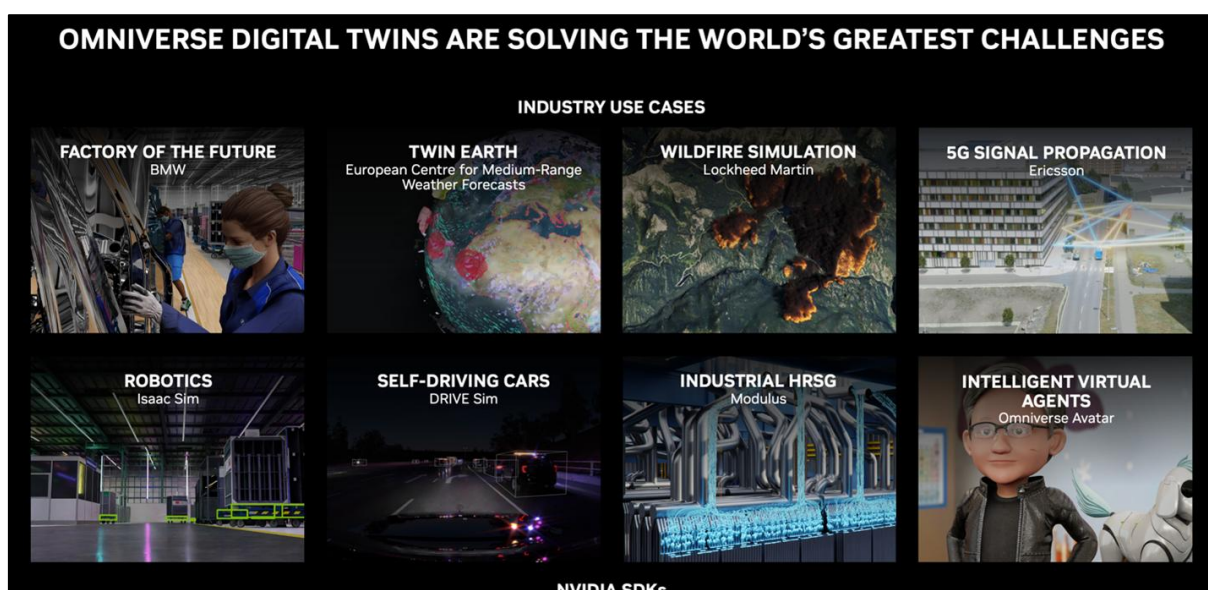
Fonte: Microsoft (2025).

## Omniverse

Um dos mais inovadores ecossistemas para gêmeos digitais é o NVIDIA Omniverse, uma plataforma colaborativa de simulação física que oferece renderização realista em tempo real, integração com ferramentas de criação 3D e suporte a fluxos

de trabalho baseados na linguagem *Universal Scene Description* (USD). Empresas como BMW, Siemens e Ericsson já utilizam o Omniverse para simular desde linhas de montagem até redes de telecomunicações (NVIDIA, 2024). A plataforma também se destaca pela sua compatibilidade com IA e *machine learning*, viabilizando simulações inteligentes e preditivas. A Figura 17 ilustra os principais casos de uso do NVIDIA Omniverse em diferentes setores industriais, incluindo simulações de fábricas, veículos autônomos, agentes inteligentes, robótica, e previsões climáticas.

Figura 17 — Casos de uso industriais do NVIDIA Omniverse em aplicações de gêmeos digitais



Fonte: NVIDIA (2024).

## FA<sup>3</sup>ST

Além dessas soluções comerciais, destaca-se o FA<sup>3</sup>ST Service, software de código aberto desenvolvido pelo instituto alemão Fraunhofer. Baseado na especificação AAS, o FA<sup>3</sup>ST permite a criação de gêmeos digitais padronizados e interoperáveis, sendo especialmente útil em contextos industriais que exigem conformidade com normas de integração e reprodutibilidade de sistemas (ARANDA, 2022).

Em síntese, a escolha do software para o desenvolvimento de um gêmeo digital deve considerar fatores como o domínio de aplicação, a necessidade de integração com dispositivos físicos, os requisitos de simulação e análise, além da capacidade de visualização e escalabilidade do sistema.

### 3 METODOLOGIA

O desenvolvimento do trabalho será estruturado em etapas sequenciais e interdependentes:

- Modelagem: A estrutura mecânica do braço robótico será projetada no *SolidWorks*, utilizando juntas do tipo rotacional para representar os três graus de liberdade do manipulador.
- Exportação para o *MATLAB*: A montagem criada será exportada utilizando a extensão *Simscape Multibody Link*, gerando um arquivo XML compatível com o *MATLAB/Simulink*. Serão aplicadas restrições geométricas (concêntricas e coincidentes) para garantir a integridade cinemática do modelo.
- Geração de Trajetória: No *Simulink*, será construído um bloco de geração de trajetórias utilizando matrizes de transformação homogênea  $4 \times 4$ , representando as posições e orientações desejadas para o efetuador final.
- Cinemática Inversa: Um algoritmo de cinemática inversa será implementado em linguagem *MATLAB*, a fim de calcular os ângulos das juntas que possibilitem alcançar as poses definidas na trajetória.
- Controle de Juntas: Serão implementadas malhas de controle de posição para cada junta do braço robótico, utilizando controladores PID clássicos com realimentação da posição, com o objetivo de minimizar o erro entre a referência e a resposta real.
- Integração do Sistema: Todos os blocos desenvolvidos serão integrados no ambiente *Simulink*, compondo um sistema de simulação completo, capaz de representar virtualmente o funcionamento do braço robótico.

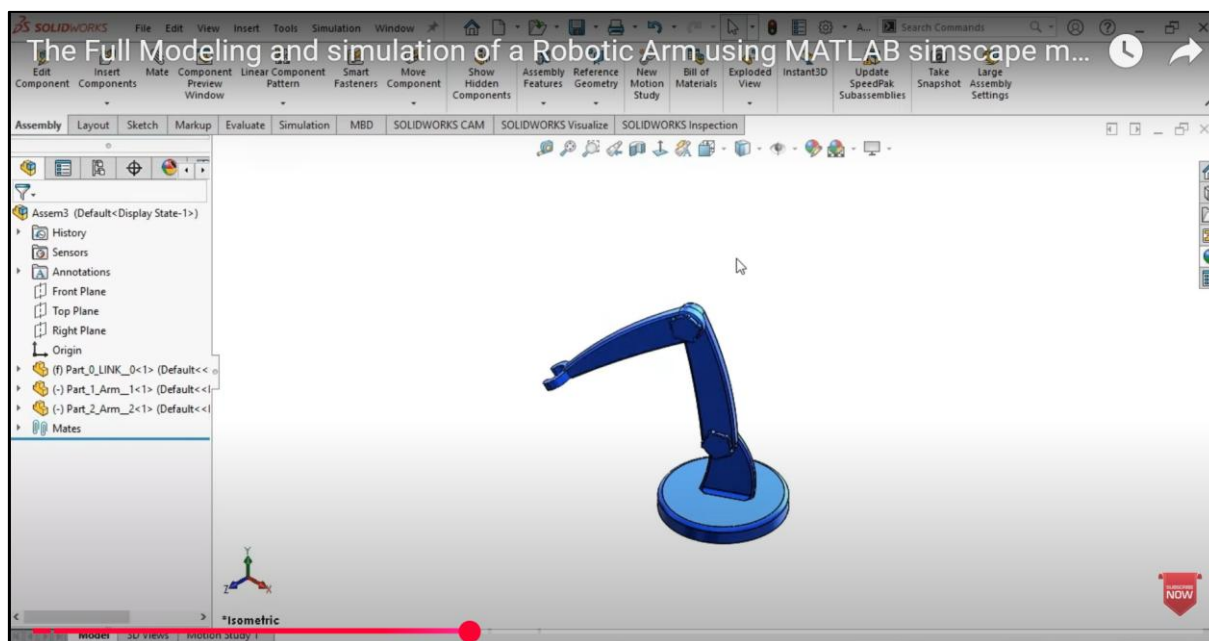
## 4 DESENVOLVIMENTO

O presente capítulo apresenta, em detalhes, o processo de desenvolvimento do gêmeo digital funcional de um braço robótico com três graus de liberdade (3-DOF), conforme proposto nos objetivos geral e específicos deste trabalho. A construção do sistema envolveu desde a modelagem tridimensional dos componentes mecânicos no ambiente *SolidWorks* até a integração dos blocos de controle, geração de trajetórias e simulação no *MATLAB/Simulink*, utilizando a ferramenta *Simscape Multibody*. O projeto teve como ponto de partida a estrutura mostrada no vídeo de referência do canal (MT ENGINEERING, 2022), onde é demonstrado um modelo simplificado de braço robótico com apenas dois graus de liberdade e três peças principais. No entanto, foram realizadas modificações substanciais a partir dessa base: o robô foi reestruturado para possuir três graus de liberdade, com a adição de um terceiro elo e o redesenho do modelo 3D, além da implementação de rotinas. Também foram reformulados os blocos de geração de trajetória e cinemática inversa, de modo que as entradas e saídas passassem a utilizar matrizes homogêneas 4×4, conforme adotado em aplicações profissionais e acadêmicas substituindo a abordagem funcional direta usada no vídeo original. Tais avanços ampliaram significativamente as funcionalidades da simulação, permitindo uma representação mais fiel do comportamento físico e dinâmico do sistema, especialmente para fins educacionais e de capacitação de futuros profissionais da área da engenharia e automação.

### 4.1 VISÃO GERAL DO ROBÔ ARM

Este projeto tem como ponto de partida um modelo de braço robótico articulado originalmente apresentado em vídeo instrucional de acesso público (MT ENGINEERING, 2022). O modelo inicial consistia em um manipulador com dois graus de liberdade (2-DOF), composto por três peças principais e operando de forma restrita em um plano vertical. Essa configuração limitava a mobilidade do sistema e restringia sua aplicabilidade a simulações básicas. A Figura 18 apresenta a visualização do modelo original no ambiente CAD *SolidWorks*, evidenciando a estrutura articulada básica do braço robótico.

Figura 18 — Modelo inicial de braço robótico com 2 DOF montado no SolidWorks



Fonte: O autor (2025), adaptado de MT Engineering (2022).

Com o objetivo de expandir suas funcionalidades e viabilizar aplicações mais avançadas, como a implementação de gêmeos digitais e controle de trajetória em múltiplos eixos, foram realizadas modificações estruturais substanciais no modelo original por parte do autor. A nova versão, nomeada RoboARM\_V2, apresenta uma série de aprimoramentos que elevam significativamente a complexidade e o potencial de aplicação do sistema. A Figura 19 ilustra a nova estrutura do modelo, destacando a adição da base rotativa e o terceiro grau de liberdade, características que o aproximam de um braço robótico industrial.

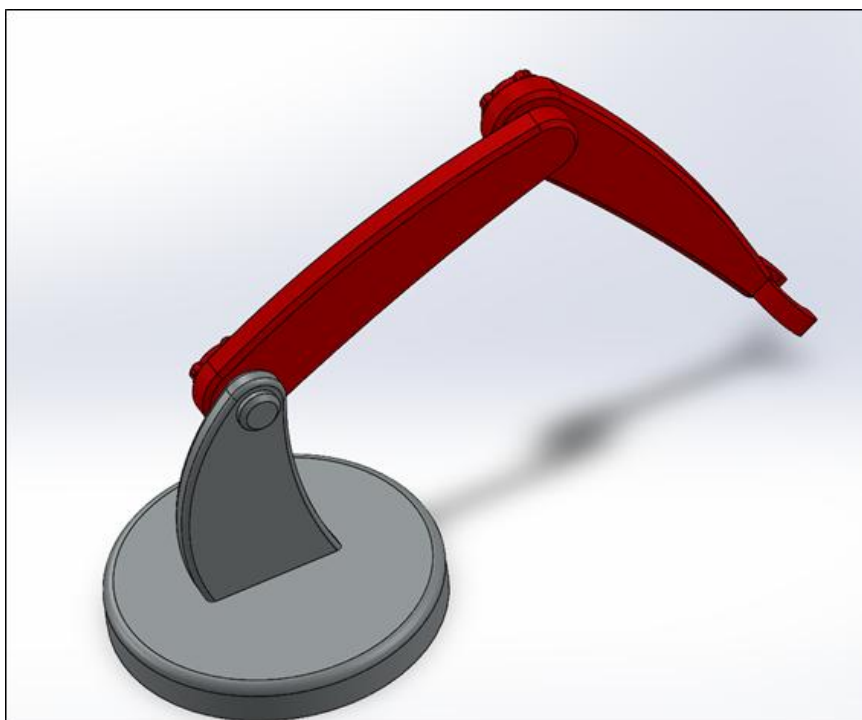
As principais alterações incluem:

- A adição de um terceiro grau de liberdade (3-DOF), que permite ao robô executar movimentos rotacionais em torno do eixo vertical (eixo Z), possibilitando a atuação tridimensional;
- A introdução de uma quarta peça estrutural, designada como Peça0\_1, a qual viabiliza a rotação da base. Esta peça não estava presente na versão anterior (RoboARM\_V1), que continha apenas as peças Peça0, Peça1 e Peça2;
- A reformulação da arquitetura cinemática, que passou de uma configuração planar do tipo RR (Rotacional-Rotacional) para uma estrutura mais robusta do

tipo RRR (Rotacional-Rotacional-Rotacional), semelhante aos braços robóticos industriais;

- A inclusão de novas conexões cinemáticas, implementadas através de restrições geométricas do tipo concêntrica e coincidente, registradas no arquivo de exportação XML gerado no *SolidWorks* e compatível com o *Simscape Multibody* do *MATLAB*, conforme apresentado no apêndice A.

Figura 19 — Modelo aprimorado RoboARM\_V2 com 3 DOF no ambiente CAD



Fonte: O autor (2025).

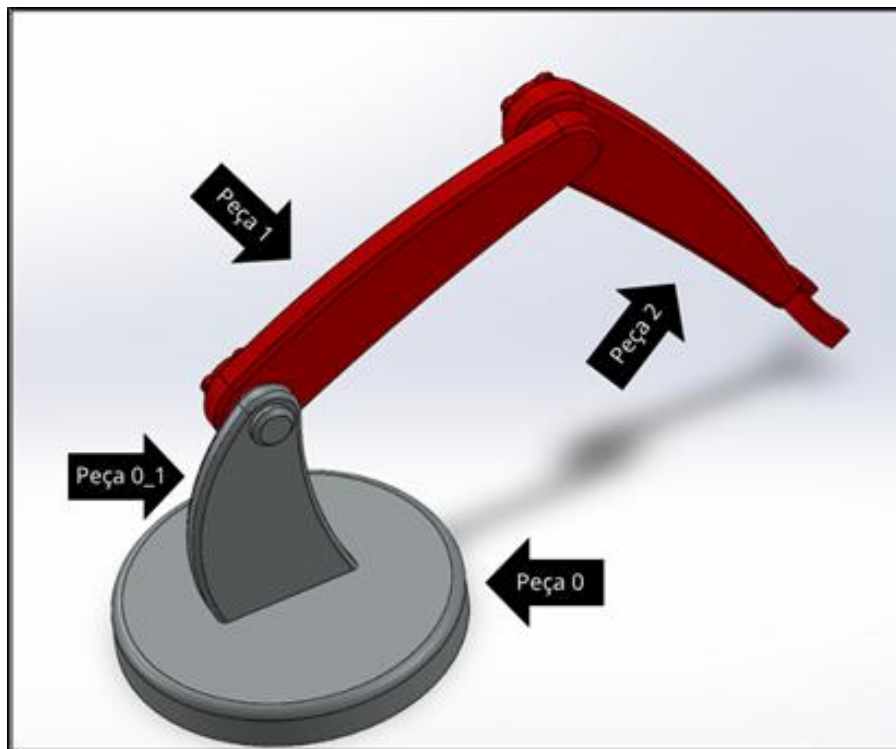
A versão atual do robô é composta pelos seguintes componentes principais:

A Figura 20 apresenta uma visualização geral do modelo tridimensional com os quatro elementos estruturais identificados, destacando o grau de liberdade adicional obtido com a peça rotacional da base.

- Peça0-1: base fixa, que serve como ancoragem do sistema ao solo e proporciona suporte estrutural;
- Peça0\_1-1: elemento rotacional adicionado, que fornece o movimento horizontal necessário para o terceiro grau de liberdade;
- Peça1-1: primeiro elo articulado, responsável pelo movimento vertical inicial;

- Peça2-1: segundo elo articulado, que amplia o alcance do manipulador no plano vertical.

Figura 20 — Componentes principais do modelo RoboARM\_V2 com vista isométrica



Fonte: O autor (2025).

As propriedades físicas, como massa, centro de gravidade e tensores de inércia, foram mantidas a partir dos dados extraídos do *software* CAD e inseridas automaticamente na simulação física por meio da exportação XML. As principais dimensões aproximadas do manipulador são:

- Comprimento do primeiro elo ( $L_1$ ): 120 mm;
- Comprimento do segundo elo ( $L_2$ ): 120 mm;
- Comprimento do terceiro elo ( $L_3$ ): 80 mm;
- Deslocamento vertical entre a base e o primeiro eixo de rotação (*offset z*): 80 mm.

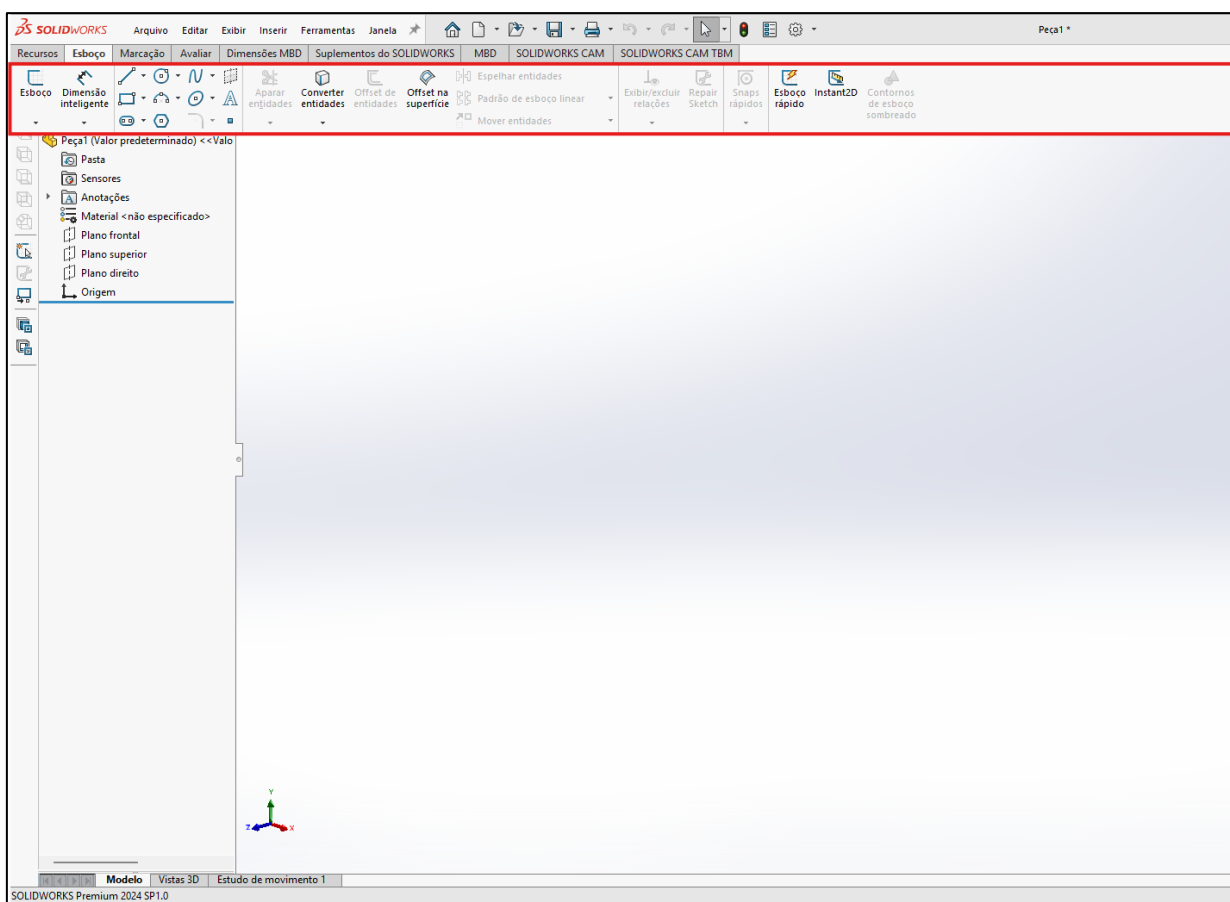
Com essas modificações, o modelo passou de um sistema simplificado e bidimensional para uma estrutura mais completa e tridimensional, compatível com o desenvolvimento de controladores baseados em cinemática direta e inversa, algoritmos de trajetória e implementação de gêmeos digitais. A nova arquitetura torna

possível a simulação de cenários realistas e a análise dinâmica do manipulador em aplicações industriais ou acadêmicas.

## 4.2 CONSTRUÇÃO DAS PEÇAS E MODELAGEM CAD

A construção geométrica do braço robótico foi realizada por meio do software *SolidWorks*, amplamente utilizado na modelagem tridimensional de sistemas mecânicos. Para viabilizar a estrutura cinemática desejada, composta por três graus de liberdade, foram desenvolvidas individualmente quatro peças principais que, em conjunto, compõem o modelo RoboARM\_V2. A Figura 21 apresenta a interface inicial do software *SolidWorks* utilizada para a modelagem das peças, evidenciando o ambiente onde foram desenvolvidos os esboços tridimensionais do manipulador robótico.

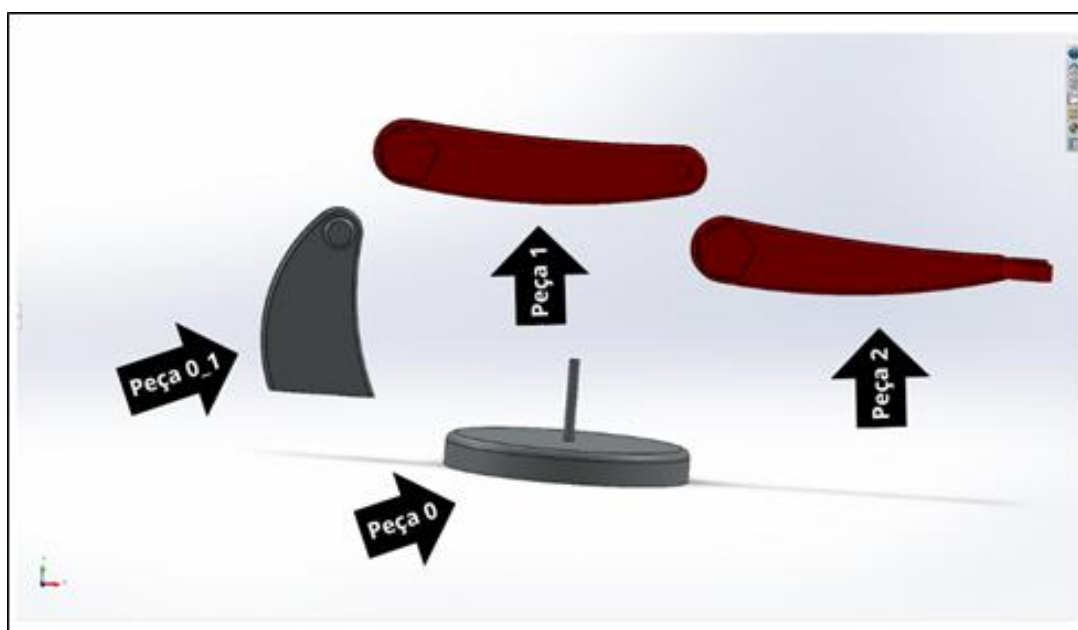
Figura 21 — Interface inicial do SolidWorks utilizada para a modelagem das peças do RoboARM\_V2



Fonte: O autor (2025).

As peças foram projetadas com o objetivo de permitir movimentos rotacionais articulados, respeitando os eixos definidos para a manipulação do braço. O processo de modelagem considerou aspectos como simplicidade geométrica, facilidade de montagem e compatibilidade com a exportação para simulação no ambiente *MATLAB/Simulink*. A Figura 22 apresenta essas peças de forma separada e identificada, evidenciando sua geometria individual e posicionamento relativo.

Figura 22 — Vista explodida das peças principais do modelo RoboARM\_V2 com identificação dos componentes



Fonte: O autor (2025).

As peças construídas foram as seguintes:

- Peça0: trata-se da base fixa do sistema, projetada para servir como referência absoluta de posição e rotação. Esta peça é ancorada ao solo virtual, sendo considerada imóvel em todas as simulações.
- Peça0\_1: elemento adicional criado para permitir a rotação horizontal do braço em torno do eixo vertical. Sua inclusão no projeto foi uma das principais modificações em relação ao modelo original, viabilizando o terceiro grau de liberdade (DOF). Esta peça conecta a base ao primeiro elo móvel.
- Peça1: primeiro elo articulado, projetado para executar movimentos no plano vertical a partir da rotação em seu eixo de ligação com a Peça0\_1. Sua

geometria foi simplificada para facilitar o cálculo de transformações homogêneas.

- Peça2: segundo elo do manipulador, conectado ao final da Peça1. Seu movimento complementa o alcance do braço robótico, permitindo a definição de posições finais no espaço tridimensional.

Cada peça foi construída de forma paramétrica, considerando dimensões compatíveis com aplicações didáticas e simulações em tempo real. A modelagem CAD também contemplou a definição de eixos de rotação bem posicionados, de modo a facilitar a aplicação de juntas mecânicas no *SolidWorks* e posterior extração correta para o ambiente *Simulink*.

A construção das peças também levou em consideração as propriedades físicas do sistema, como massas, centros de massa e momentos de inércia. Tais propriedades foram atribuídas automaticamente pelo software, com base na geometria e material padrão, e exportadas juntamente com o modelo para o ambiente MATLAB, garantindo maior realismo dinâmico nas simulações.

#### 4.3 MONTAGEM DO ROBÔ ARM

Após a modelagem individual das peças estruturais, foi realizada a montagem completa do braço robótico no ambiente *SolidWorks*, resultando no conjunto denominado RoboARM\_V2.SLDASM. Esta montagem foi projetada com base em princípios da robótica articulada e seguiu uma lógica sequencial de graus de liberdade, onde cada elo é conectado ao anterior por meio de juntas rotacionais.

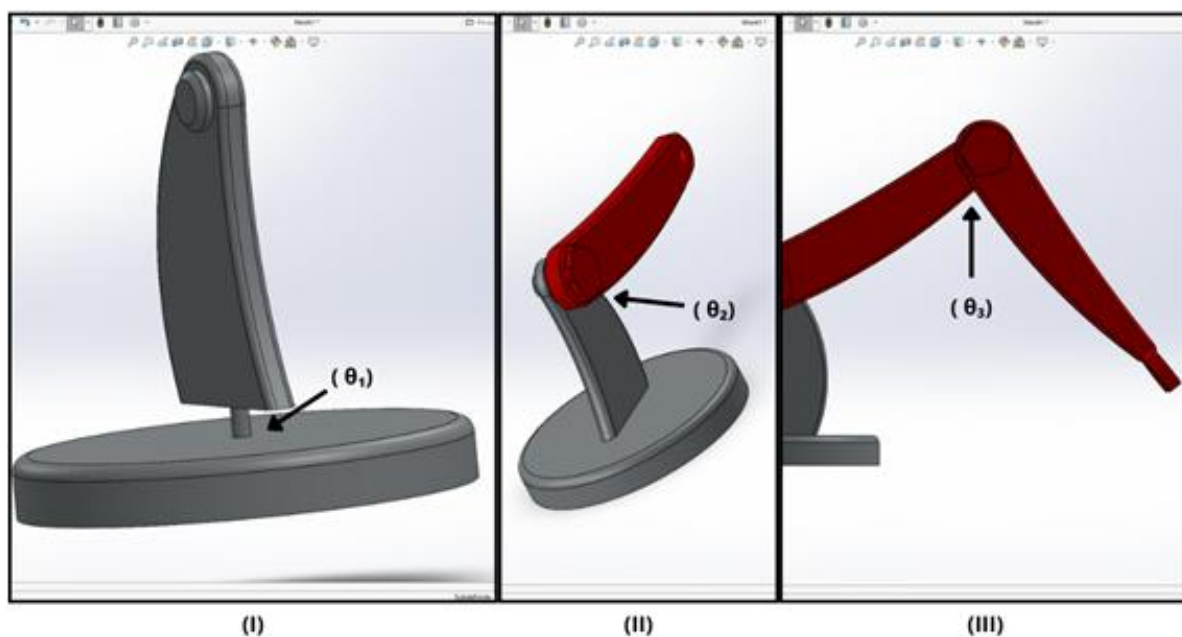
A montagem teve como objetivo principal assegurar a mobilidade do sistema em três graus de liberdade (3-DOF), todos do tipo rotacional. Para isso, foram utilizadas restrições geométricas do tipo coincidente e concêntrica, que garantem o alinhamento preciso dos eixos de rotação e a ligação funcional entre os corpos sólidos. Tais restrições são essenciais tanto para o correto comportamento cinemático no CAD quanto para a futura simulação física no *Simulink*.

As ligações foram definidas da seguinte forma:

- A Peça0 (base fixa) foi ancorada ao solo do ambiente virtual e serve como referência absoluta para os demais elementos.

- A Peça0\_1, posicionada sobre a base, foi conectada por meio de uma restrição concêntrica, permitindo sua rotação horizontal em torno do eixo Z. Essa peça constitui o primeiro grau de liberdade ( $\theta_1$ ), responsável pela orientação geral do braço no espaço.
- A Peça1 foi conectada à Peça0\_1 utilizando também restrições concêntricas e coincidentes, permitindo uma rotação vertical em torno do eixo Y. Esse movimento representa o segundo grau de liberdade ( $\theta_2$ ).
- A Peça2, por sua vez, foi fixada à extremidade da Peça1 através de uma nova junta rotacional, permitindo a extensão do braço com uma terceira rotação ( $\theta_3$ ) no plano vertical, completando a estrutura do manipulador do tipo RRR. A Figura 23 apresenta a montagem final do RoboARM\_V2 no *SolidWorks*, destacando os três graus de liberdade rotacionais:  $\theta_1$  (rotação da base),  $\theta_2$  (movimento do primeiro elo) e  $\theta_3$  (movimento do segundo elo).

Figura 23 — Representação dos três graus de liberdade ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ) no modelo RoboARM\_V2 montado no *SolidWorks*



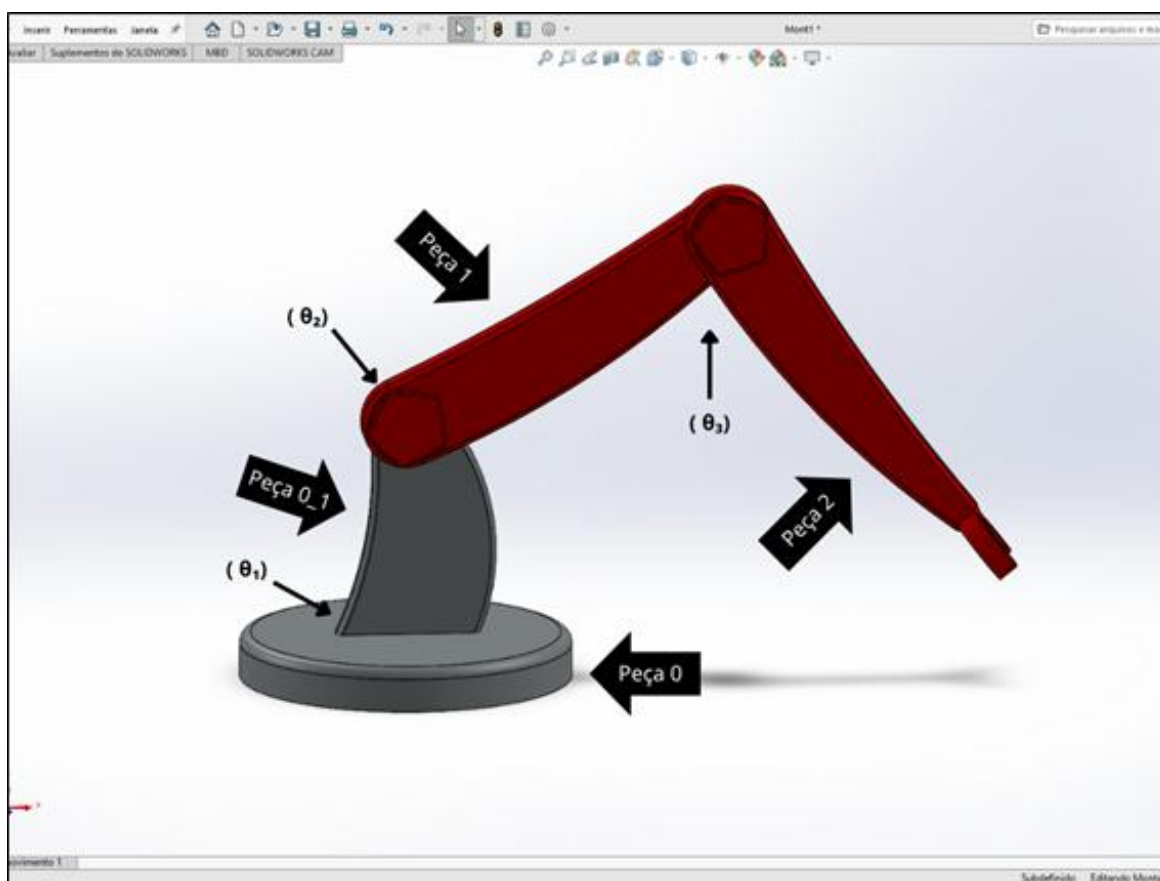
Fonte: O autor (2025).

Para garantir que o modelo fosse compatível com o *Simscape Multibody*, cada eixo de rotação foi cuidadosamente alinhado com os planos principais (XY, YZ, XZ) do sistema de coordenadas do *SolidWorks*. Isso permitiu a correta identificação dos

eixos de junta durante a exportação do modelo. As restrições aplicadas geraram automaticamente os graus de liberdade controláveis no ambiente *MATLAB*, correspondentes às três juntas rotacionais do sistema.

Além disso, foram evitadas redundâncias cinemáticas e sobreposições de restrição, o que poderia comprometer a validade do modelo físico no *Simulink*. O resultado é uma estrutura articulada funcional, adequada para análise cinemática, geração de trajetórias e controle dinâmico. A Figura 24 ilustra os eixos de rotação e a correspondência entre as peças modeladas no *SolidWorks*, destacando o alinhamento com os planos de coordenadas e os graus de liberdade exportáveis para o ambiente *MATLAB/Simulink*.

Figura 24 — Eixos de rotação e peças do RoboARM\_V2 preparados para exportação ao Simscape Multibody



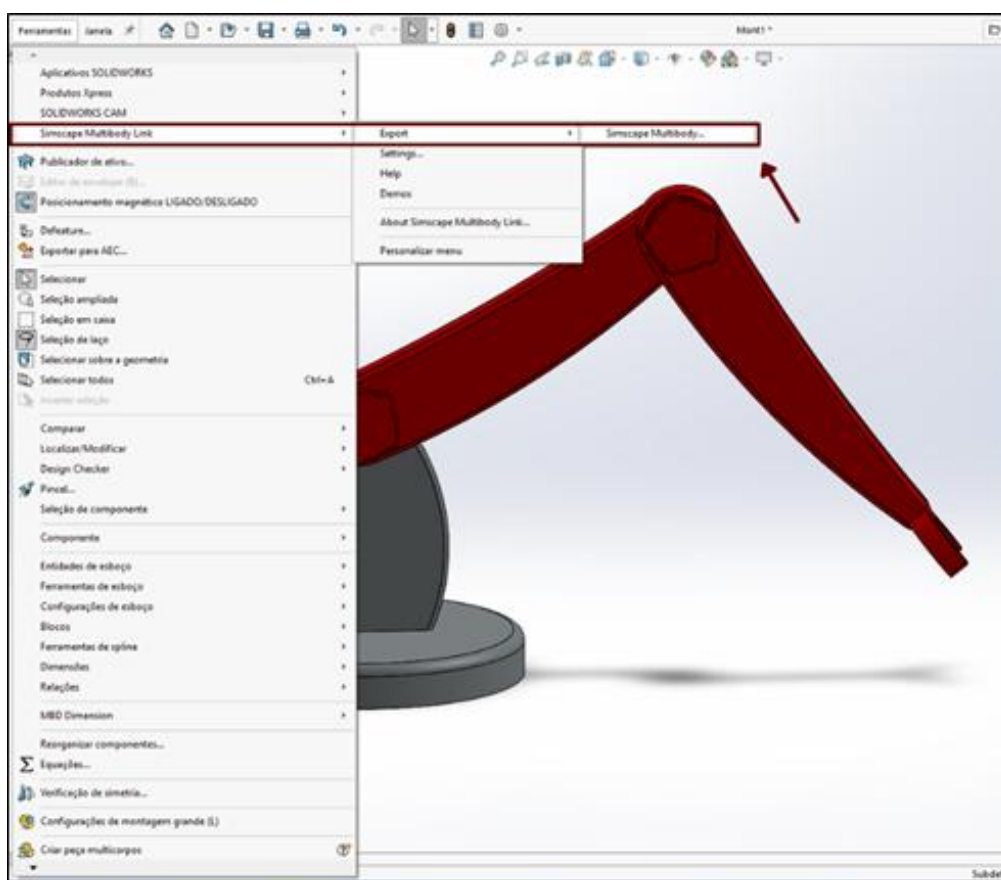
Fonte: O autor (2025).

A montagem RoboARM\_V2 representa, portanto, uma versão ampliada e aprimorada do modelo original, sendo adequada tanto para estudos didáticos como para aplicações em simulações de gêmeos digitais com alta fidelidade.

#### 4.4 EXPORTAÇÃO DO MODELO DO SOLIDWORKS PARA O MATLAB/SIMULINK

A exportação do modelo tridimensional do braço robótico para o ambiente *MATLAB/Simulink* foi realizada por meio da ferramenta *Simscape Multibody Link*, disponibilizada pela *MathWorks*. Esta integração permite converter montagens CAD em modelos físicos compatíveis com simulações multiescalares, utilizando o ambiente *Simscape*.

Figura 25 — Processo de exportação do modelo RoboARM no SolidWorks via Simscape Multibody Link



Fonte: O autor (2025).

O processo de exportação teve início após a finalização da montagem no *SolidWorks*, seguindo os seguintes passos metodológicos:

1. Ativação do suplemento *Simscape Multibody Link* no *SolidWorks* e configuração das unidades de projeto (massa em quilogramas e comprimento em milímetros), para garantir compatibilidade com o ambiente *MATLAB*;

2. Acesso à opção *Export > Simscape Multibody > Export .XML File*, a partir do menu do suplemento, gerando dois arquivos principais:

- Um arquivo do tipo .xml, contendo a descrição completa da montagem, juntas, transformações e propriedades físicas do modelo;
- Um conjunto de arquivos .STEP, correspondentes às geometrias 3D de cada peça. A Figura 25 apresenta a interface do *SolidWorks* com o caminho de exportação via suplemento *Simscape Multibody Link*

3. A exportação considerou cuidadosamente os nomes e identificadores de cada peça e instância, assegurando clareza na construção dos diagramas de blocos gerados automaticamente pelo *MATLAB*.

4. No ambiente *MATLAB*, o modelo foi importado com o comando:

```
"smimport('RoboARM_V12.xml")"
```

Esse comando gerou automaticamente um modelo *Simulink* com blocos de corpos rígidos, juntas e eixos coordenados compatíveis com o *Simscape Multibody*.

5. Após a importação, foram realizadas as seguintes etapas de refinamento no modelo *Simulink*:

- Conversão das unidades de comprimento para metros, utilizando os parâmetros de *ModelUnits* e *DataUnits* definidos no XML;
- Verificação e correção da orientação dos eixos de junta, garantindo que os movimentos rotacionais ocorressem conforme o previsto nos planos XY e YZ;
- Substituição de juntas fixas por juntas rotacionais, onde necessário, para garantir a ativação dos três graus de liberdade do modelo.

A correta exportação do modelo é etapa fundamental para garantir que as análises de cinemática e dinâmica a serem desenvolvidas nas seções seguintes estejam de acordo com o comportamento físico esperado do manipulador. Além disso, o uso de arquivos XML garante a portabilidade e reusabilidade do modelo em projetos futuros ou em ambientes colaborativos, facilitando a integração com controladores, sensores virtuais e algoritmos de trajetória.

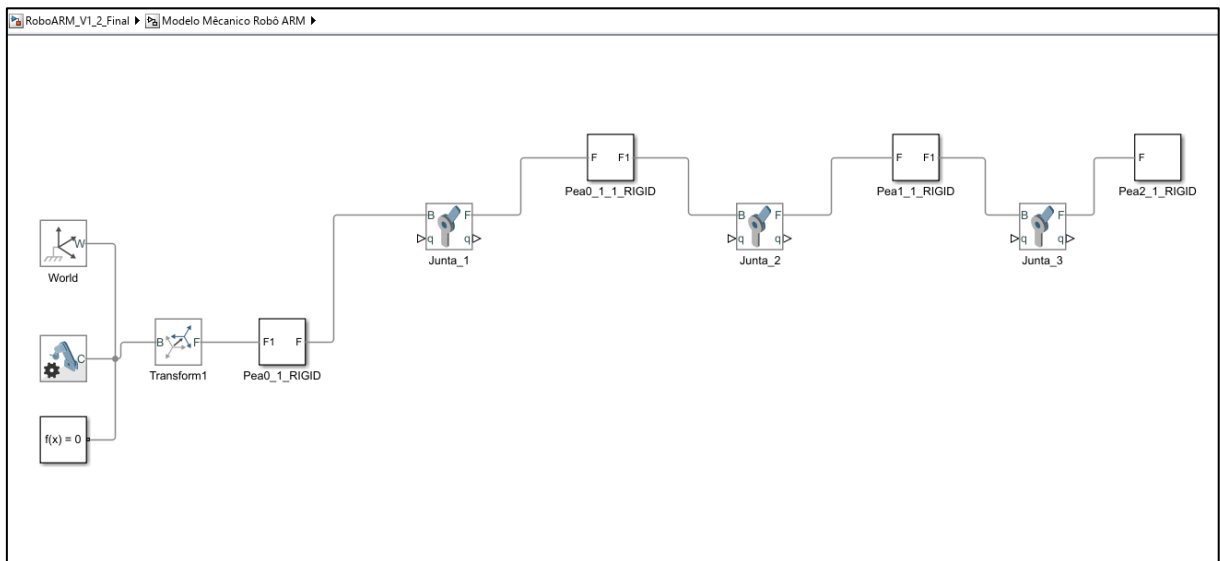
#### 4.5 CRIAÇÃO E MODIFICAÇÃO DO BLOCO “MODELO MECÂNICO ROBÔ ARM”

Após a exportação do modelo tridimensional *RoboARM\_V2* para o *MATLAB*, foi realizada a geração automática do modelo físico no ambiente *Simulink*, utilizando

o comando `smimport`. Esta função converte o conteúdo do arquivo `.xml`, previamente gerado no *SolidWorks* por meio da ferramenta *Simscape Multibody Link*, em um diagrama de blocos compatível com o *Simscape Multibody*, incorporando corpos rígidos, juntas e sistemas de coordenadas.

O resultado desse processo é o bloco denominado “Modelo Mecânico Robô ARM”, o qual representa a estrutura cinemática completa do manipulador robótico em ambiente gráfico. O modelo gerado contém os três graus de liberdade desejados, todos do tipo rotacional, conectando as peças Peça0, Peça0\_1, Peça1 e Peça2 de forma sequencial. A Figura 26 apresenta o diagrama de blocos gerado automaticamente no *Simulink*, contendo os blocos de juntas rotacionais, corpos rígidos e sistemas de coordenadas, resultantes da exportação via *Simscape Multibody Link*.

Figura 26 — Modelo físico do braço robótico gerado no Simulink após comando "smimport"



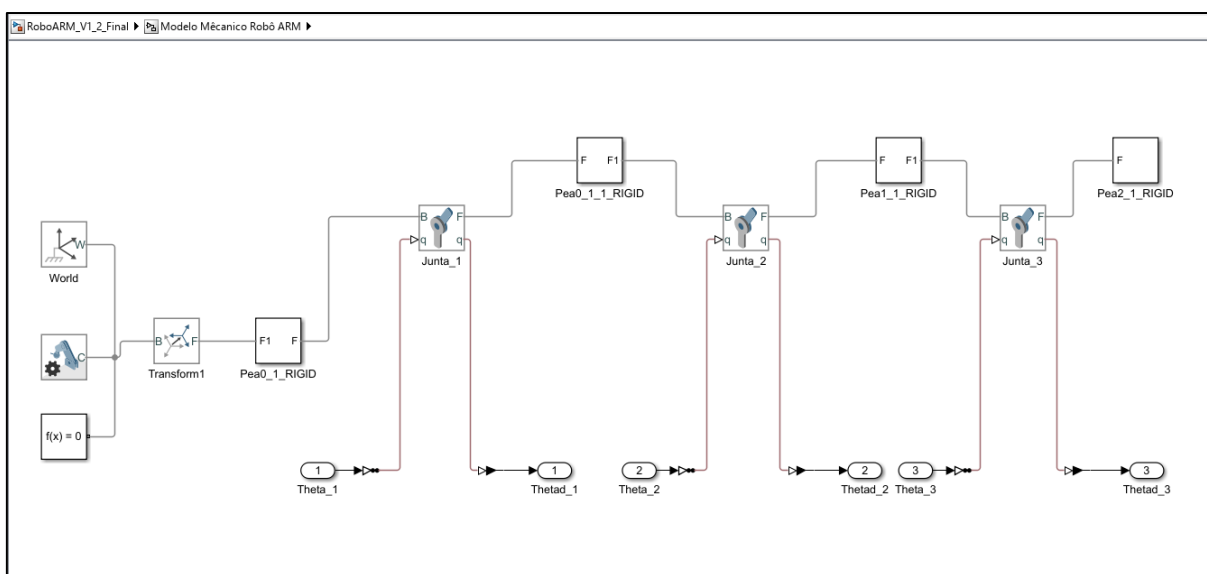
Fonte: O autor (2025).

Neste modelo, os principais elementos são:

- *World*: sistema de referência absoluto da simulação;
- *Transform*: bloco de orientação inicial da base fixa;
- Corpos rígidos (*Rigid Bodies*): correspondem às geometrias CAD de cada peça importada;
- Juntas rotacionais (*Junta\_1*, *Junta\_2*, *Junta\_3*): representam os eixos de movimento  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$  do braço robótico.

A fim de viabilizar o controle direto das articulações e o monitoramento em tempo real, o modelo foi modificado para incluir entradas e saídas nas juntas rotacionais. As alterações tornaram o modelo adequado à integração com funções de controle e simulações de gêmeos digitais. A Figura 27 ilustra a estrutura modificada no ambiente *Simulink*, já contendo as portas de entrada para controle das juntas e as saídas para leitura em tempo real das variáveis de estado de cada articulação.

Figura 27 — Modelo Simulink com articulações controláveis via entrada e saída para integração com gêmeo digital



Fonte: O autor (2025).

As modificações implementadas são detalhadas a seguir:

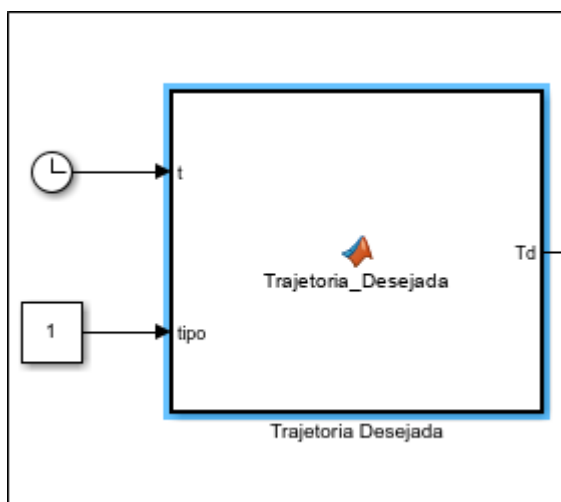
- Entradas de posição angular ( $\theta_1$ ,  $\theta_2$ ,  $\theta_3$ ): foram ativadas nas portas de controle das juntas rotacionais. Com isso, o manipulador pode receber comandos diretos de posição, seja por controle manual, funções de trajetória, ou algoritmos de cinemática inversa;
- Saídas de velocidade angular ( $\dot{\theta}_1$ ,  $\dot{\theta}_2$ ,  $\dot{\theta}_3$ ): foram habilitadas para leitura das velocidades em tempo real, o que possibilita o uso em malhas de controle, estimativas de estado e análise dinâmica;
- As conexões foram organizadas com blocos de identificação numérica, facilitando a integração com outras partes do modelo, como o sistema de geração de trajetória, o bloco de cinemática direta e os comparadores de erro.

Com essas adaptações, o bloco “Modelo Mecânico Robô ARM” passa a operar como um subsistema ativo dentro do ambiente *Simulink*, permitindo a simulação de movimentos articulados sob controle programável, com capacidade de medição e retroalimentação. Tal estrutura é indispensável para a construção de um gêmeo digital funcional e representa a base sobre a qual serão implementados os algoritmos de controle desenvolvidos nas seções seguintes.

#### 4.6 DESENVOLVIMENTO DO BLOCO “TRAJETÓRIA DESEJADA”

O bloco “Trajetória Desejada” foi desenvolvido com o objetivo de gerar, em tempo real, a referência espacial desejada para o efetuador final do braço robótico. Esta referência é expressa na forma de uma matriz de transformação homogênea 4×4, representando simultaneamente a posição e a orientação no espaço tridimensional.

Figura 28 — Bloco “Trajetória Desejada” no Simulink com entradas e saída



Fonte: O autor (2025).

A implementação foi realizada por meio de um bloco do tipo *MATLAB Function Block* no ambiente *Simulink*, conforme mostrado na Figura 28. O bloco recebe duas entradas:

- t: tempo da simulação, proveniente de um bloco *Clock*;
- tipo: seletor numérico que determina a trajetória a ser executada (valores entre 1 e 6).

A saída do bloco é  $T_d$ , uma matriz homogênea  $4 \times 4$ , que define a pose (posição + orientação) desejada do efetuador ao longo do tempo.

O código fonte embutido no bloco está estruturado para gerar diferentes tipos de trajetória, conforme descrito na Tabela 2:

Tabela 2 — Tipos de trajetória disponíveis no bloco Trajetória Desejada

| Tipo | Descrição                            | Características principais                                    |
|------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1    | Helicoidal                           | Movimento circular no plano XY com oscilação vertical (Z)     |
| 2    | Linha reta com rotação               | Interpolação linear entre dois pontos com rotação progressiva |
| 3    | Curva em "8" (lemniscata)            | Movimento planar no XY em forma de "8" com altura constante   |
| 4    | Pegar e deixar (movimento funcional) | Sequência de pontos para simular coleta e entrega de objeto   |
| 5    | Espiral com raio crescente           | Trajетória em espiral com rotação e raio variável             |
| 6    | Linha reta inclinada com rotação     | Movimento retilíneo entre dois pontos com rotação fixa        |

Fonte: O autor (2025).

A lógica do código realiza o cálculo da posição vetorial  $P(t) \in \mathbb{R}^3$  e da matriz de rotação  $R(t) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ , com base no tempo da simulação. Esses componentes são organizados na forma da matriz homogênea:

$$T_d(t) = \begin{bmatrix} R_{11}(t) & R_{12}(t) & R_{13}(t) & P_x(t) \\ R_{21}(t) & R_{22}(t) & R_{23}(t) & P_y(t) \\ R_{31}(t) & R_{32}(t) & R_{33}(t) & P_z(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Esse formato padronizado é compatível com os demais blocos do sistema (como cinemática inversa e comparação de pose), permitindo a propagação da referência espacial de maneira contínua e precisa.

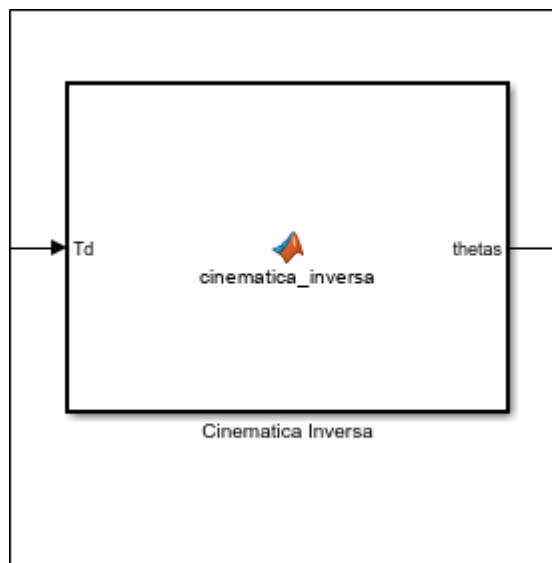
O código-fonte completo da função `Trajетoria_Desejada`, implementada em linguagem *MATLAB* no interior do bloco encontrasse no apêndice B.

#### 4.7 DESENVOLVIMENTO DO BLOCO “CINEMÁTICA INVERSA”

O bloco “Cinemática Inversa” tem como objetivo transformar uma pose desejada do efetuador final (representada por uma matriz de transformação homogênea  $T_d \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ ) nos ângulos articulares necessários para que o robô atinja essa configuração. Esse processo é essencial na cadeia de controle de robôs manipuladores, especialmente em aplicações de gêmeos digitais e simulações baseadas em trajetória.

O bloco foi implementado por meio de um *MATLAB Function Block* no ambiente *Simulink*, e está ilustrado na Figura 29. A entrada do bloco é a matriz  $T_d$ , fornecida pelo módulo de geração de trajetória, e a saída é um vetor coluna  $\theta = [\theta_1 \theta_2 \theta_3]^T$ , com os ângulos das três juntas rotacionais.

Figura 29 — Bloco Cinemática Inversa no Simulink



Fonte: O autor (2025).

##### Funcionamento do Algoritmo

A função implementa a solução geométrica da cinemática inversa para um robô do tipo RRR (três juntas rotacionais coplanares), considerando os seguintes parâmetros físicos do braço:

- $L_1 = 0,12m$ : altura entre a base e o primeiro eixo articulado;
- $L_2 = 0,12m$ : comprimento do primeiro elo móvel;
- $L_3 = 0,08m$ : comprimento do elo terminal (efetuador).

A partir da matriz  $T_d$ , são extraídas as informações de posição  $P(d) \in \mathbb{R}^3$  e rotação  $R(d) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ . A posição do “pulso” (centro da junta anterior ao efetuador) é calculada por:

$$P_w = P_d - L_3 * R_d(:,1)$$

A partir de  $P_w = [x, y, z]^T$  os ângulos articulares são obtidos por:

- $\theta_1$ : rotação da base no plano XY:

$$\theta_1 = \text{atan2}(x, y)$$

- $\theta_3$ , calculado pela lei dos cossenos:

$$D = \frac{r^2 + z_{rel}^2 - L_2^2 - z_3^2}{2L_2L_3}, \quad \theta_3 = \text{atan2}(\sqrt{1 - D^2}, D)$$

- $\theta_2$ : ângulo da elevação do braço:

$$\theta_2 = \text{atan2}(z_{rel}, r) - \text{atan2}(L_3 \sin(\theta_3), L_2 + L_3 \cos(\theta_3))$$

Onde:

- $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  é a projeção no plano XY;
- $z_{rel} = z - L_1$  é a altura relativa do ponto do pulso.

O código-fonte completo do bloco `cinematica_inversa` se encontra presente no apêndice C.

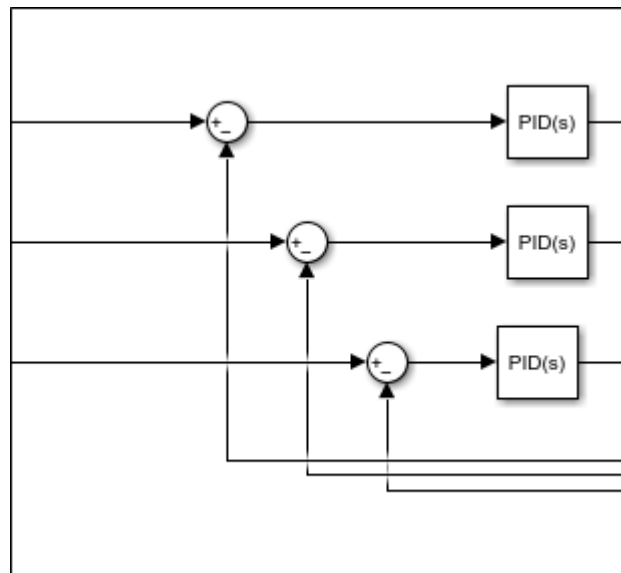
Esse bloco é parte fundamental do sistema de controle do robô, pois traduz a referência espacial recebida da trajetória desejada em comandos articulares compatíveis com o modelo mecânico do manipulador.

#### 4.8 CONTROLE DE JUNTAS COM SOMADORES DE ERRO E CONTROLADORES PID

O controle de movimento das juntas do manipulador robótico é realizado por meio de uma estrutura clássica de malha fechada com controle proporcional–integral–

derivativo (PID). Esse controle é responsável por ajustar o movimento de cada junta rotacional de forma a minimizar o erro entre o valor de referência (desejado) e o valor medido (real) durante a execução da trajetória. A estrutura foi implementada diretamente no ambiente Simulink e está composta por três pares de blocos somadores e controladores PID, um para cada uma das três juntas do sistema. Para otimizar o desempenho do sistema de controle, foi utilizado o recurso de autotuning dos blocos PID do Simulink, que ajusta automaticamente os ganhos proporcional, integral e derivativo com base na dinâmica do sistema, visando uma resposta mais estável e precisa. A Figura 30 ilustra a organização desse bloco de controle.

Figura 30 — Diagrama de controle PID para as três juntas rotacionais do RoboARM no Simulink



Fonte: O autor (2025).

### Estrutura do Controle

Cada elo do manipulador possui um somador de erro, que realiza a seguinte operação:

$$e_i(t) = \theta_{i,ref}(t) - \theta_{i,real}(t)$$

onde:

- $\theta_{i,ref}$  é o ângulo de junta desejado, proveniente do bloco de cinemática inversa;
- $\theta_{i,real}$  é o ângulo real da junta, medido no modelo físico *Simscape*;
- $e_i(t)$  é o erro de posição da junta  $i$  ao tempo  $t$ .

Esse erro é então enviado para um controlador PID individualizado por junta. O controlador gera um sinal de comando que atua diretamente sobre a respectiva junta do modelo mecânico, simulando o acionamento de motores reais. O controle PID segue a seguinte equação geral:

$$u_i(t) = K_p e_i(t) + K_i \int e_i(t) dt + K_d \frac{de_i(t)}{dt}$$

onde  $u_i(t)$  é o sinal de controle para a junta  $i$ , e os ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  são ajustáveis conforme o comportamento dinâmico desejado (tempo de resposta, *overshoot*, etc.).

#### Vantagens da Abordagem

A estrutura modular com três malhas independentes permite:

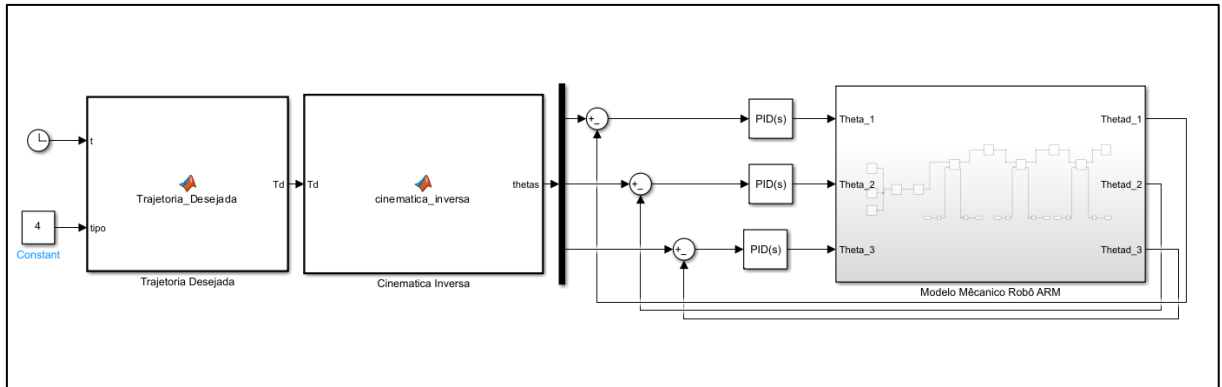
- Facilidade de ajuste individual para cada junta, de acordo com suas características mecânicas (inércia, atrito, etc.);
- Interoperabilidade com blocos de *Simscape Multibody*, que recebem o torque ou a posição de junta como entrada.

Os controladores podem ser ajustados manualmente ou via algoritmos de sintonia (*autotuning* do próprio *Simulink*).

## 4.9 INTEGRAÇÃO DOS BLOCOS NO SIMULINK: ARQUITETURA COMPLETA DO SISTEMA

A Figura 31 apresenta a arquitetura geral do sistema de controle e simulação, integrando todos os blocos desenvolvidos no ambiente *Simulink* para a operação completa do braço robótico com três graus de liberdade (3-DOF). A estrutura implementa um fluxo contínuo de cálculo e ação, baseado nos princípios de gêmeos digitais, onde há atualização em tempo real da referência desejada, controle de juntas e resposta física simulada.

Figura 31 — Arquitetura geral do sistema de controle do RoboARM implementada no Simulink



Fonte: O autor (2025).

### Descrição do Funcionamento

O sistema é composto por seis grandes blocos funcionais interconectados em uma malha de controle fechada:

#### 1. Bloco “Trajetória Desejada”

Gera a referência da pose do efetuador final  $T_d(t)$ , baseada no tempo da simulação e no tipo de trajetória selecionado. Essa matriz  $4 \times 4$  representa a posição e orientação desejadas do manipulador.

#### 2. Bloco “Cinemática Inversa”

Recebe  $T_d(t)$  e calcula os ângulos articulares  $\theta_{ref} = [\theta_1 \theta_2 \theta_3]^T$  necessários para que o robô alcance a posição desejada. Esses valores tornam-se as referências de posição para as juntas.

#### 3. Somadores de Erro

Calculam, em tempo real, o erro entre os ângulos desejados ( $\theta_{ref}$ ) e os ângulos reais medidos do modelo ( $\theta_{real}$ ):

$$e(t) = \theta_{ref}(t) - \theta_{real}(t)$$

#### 4. Blocos PID

Cada erro  $e_i(t)$  é enviado a um controlador PID dedicado, que gera o comando de posição ou torque para a junta  $i$ , minimizando o erro ao longo do tempo. O PID garante estabilidade e resposta adequada do sistema.

#### 5. Bloco “Modelo Mecânico Robô ARM”

Recebe os sinais de controle das três juntas e simula a resposta física do robô no ambiente do *Simscape Multibody*. O modelo atualiza os ângulos das juntas e fornece os valores reais  $\theta_{real}(t)$  e as velocidades  $\dot{\theta}(t)$ .

## 6. Realimentação

Os ângulos reais retornam ao sistema de controle, fechando a malha e permitindo a correção contínua do movimento em tempo real, como em um sistema robótico real.

### Considerações Técnicas

Essa integração de blocos representa um gêmeo digital funcional do braço robótico, onde cada parte do modelo possui uma correspondência clara com um subsistema físico ou lógico de um manipulador real. O uso de referências cartesianas (matrizes homogêneas), a resolução da cinemática inversa e o controle por PID criam um ambiente de simulação que permite:

- Testar trajetórias complexas em segurança;
- Avaliar o comportamento do robô sem a necessidade de hardware físico;
- Implementar e validar algoritmos de controle e inteligência embarcada.

Além disso, essa arquitetura modular permite a expansão futura com inclusão de sensores virtuais, distúrbios externos, controle por torque ou mesmo estratégias avançadas como controle adaptativo ou aprendizado de máquina.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento completo de um sistema de gêmeo digital aplicado a um braço robótico com três graus de liberdade, modelado no ambiente *SolidWorks*, exportado para o *MATLAB/Simulink* via *Simscape Multibody*, e controlado em tempo real por meio de algoritmos de cinemática e controladores PID.

A primeira etapa consistiu na construção paramétrica das peças mecânicas e montagem do manipulador, respeitando uma configuração articulada do tipo RRR. Em seguida, foi realizada a exportação para o ambiente *Simulink*, com geração automática da topologia física do modelo. Após isso, desenvolveu-se a arquitetura de simulação, composta pelos blocos de geração de trajetória desejada, resolução da cinemática inversa, malha de controle e resposta física.

A implementação do controle baseado em pose (por meio de matriz de transformação homogênea  $4 \times 4$ ) foi um dos principais diferenciais deste trabalho, permitindo o mapeamento direto entre o espaço cartesiano e o espaço articular. Além disso, a utilização de controladores PID independentes para cada junta possibilitou uma resposta dinâmica estável e ajustável, comprovada por meio da execução bem-sucedida de diferentes tipos de trajetória, como helicoidal, espiral, curva em oito e movimento funcional de pegar e deixar.

Do ponto de vista educacional, este projeto reforça o papel dos gêmeos digitais como instrumentos valiosos para o ensino de engenharia, automação e controle. A simulação do manipulador robótico permite que estudantes compreendam de forma prática conceitos abstratos, como transformações espaciais, sistemas de coordenadas e comportamento dinâmico de sistemas mecânicos. Além disso, a estrutura modular desenvolvida pode ser reutilizada em ambientes acadêmicos como plataforma experimental, contribuindo para a formação de profissionais mais preparados para os desafios da Indústria 4.0.

A abordagem adotada demonstra, de forma eficaz, como o conceito de gêmeo digital pode ser empregado como ferramenta para desenvolvimento, validação e controle de sistemas robóticos no contexto da Indústria 4.0. O modelo proposto permite monitoramento, controle e simulação com alto grau de fidelidade, mesmo sem

a presença de hardware físico, o que amplia significativamente seu potencial de aplicação acadêmica e industrial.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

A continuidade deste trabalho pode seguir múltiplas direções, tanto no aprimoramento da precisão quanto na complexidade do sistema simulado. Entre os principais trabalhos futuros sugeridos, destacam-se:

- Validação física com hardware real: a conexão do modelo digital com um braço robótico real, utilizando sensores embarcados e controladores embarcados (ex. Arduino, ESP32 ou PLC), possibilitará a validação experimental do gêmeo digital e o fechamento de um ciclo ciberfísico completo;
- Inserção de sensores virtuais: integrar ao sistema blocos de sensores simulados (câmeras, acelerômetros, sensores de força, etc.) permitirá desenvolver algoritmos de percepção artificial e controle adaptativo;
- Uso de aprendizado de máquina: investigar algoritmos de Machine Learning, como redes neurais ou reforço profundo, aplicados ao controle adaptativo das juntas com base em simulações e erros acumulados;
- Expansão para múltiplos manipuladores: simular a cooperação entre dois ou mais braços robóticos no mesmo ambiente *Simulink*, com troca de informação entre gêmeos digitais, ampliando o escopo para tarefas colaborativas;

Essas sugestões visam transformar o sistema proposto em uma plataforma robusta e versátil para ensino, pesquisa e aplicações industriais envolvendo gêmeos digitais, robótica e automação avançada.

## 5.3 DIFICULDADES

Uma das principais dificuldades enfrentadas neste trabalho foi a escassez de materiais de referência em português sobre o desenvolvimento de gêmeos digitais aplicados à robótica e à educação. A maior parte da literatura técnica e científica disponível está em inglês, o que exigiu a constante leitura e interpretação de artigos, manuais, vídeos e documentação técnica internacional. Além disso, o conceito de gêmeo digital ainda se encontra em consolidação, sem um framework universalmente

aceito ou diretrizes bem estabelecidas. Essa ausência de padronização dificultou a definição da arquitetura geral do sistema, da metodologia de validação do modelo e dos limites de escopo da aplicação, exigindo uma abordagem mais exploratória e iterativa.

Do ponto de vista técnico, a etapa de modelagem CAD das peças no *SolidWorks* apresentou desafios relevantes, especialmente no que diz respeito ao alinhamento preciso dos eixos de rotação e à correta definição das relações geométricas entre os componentes. Como o modelo exigia movimentos articulados com três graus de liberdade, foi necessário garantir que os elos fossem compatíveis com as futuras juntas mecânicas e transformações homogêneas. Isso exigiu ajustes frequentes na geometria e estrutura das peças para assegurar fidelidade física e compatibilidade com o ambiente de simulação.

Outro ponto crítico foi a exportação do modelo 3D para o *MATLAB/Simulink* por meio da ferramenta *Simscape Multibody Link*. Durante essa etapa, surgiram dificuldades relacionadas à geração dos arquivos .xml e .slx, especialmente no que diz respeito à manutenção dos referenciais locais, propriedades físicas e organização da árvore de montagem. Pequenas inconsistências durante esse processo resultavam em erros na simulação ou comportamentos inesperados, o que exigiu múltiplas tentativas até alcançar um modelo funcional e estável.

Por fim, a implementação dos blocos de cinemática inversa e geração de trajetória representou um desafio importante. Diferente do modelo simplificado apresentado no vídeo de referência utilizado como base, que operava com variáveis escalares e lógica direta, optou-se neste trabalho pelo uso de matrizes de transformação homogênea  $4 \times 4$  uma abordagem mais robusta e condizente com aplicações profissionais. Essa escolha implicou em um nível maior de complexidade matemática e exigiu domínio das transformações espaciais tridimensionais, além de testes rigorosos para garantir a precisão dos resultados obtidos.

Apesar dessas dificuldades, todas as etapas superadas contribuíram significativamente para o amadurecimento do projeto e para o aprendizado técnico, teórico e metodológico ao longo da sua execução.

## REFERÊNCIAS

- ADU-AMANKWA, Nana Akua *et al.* Digital Twins and Blockchain technologies for building lifecycle management. **Automation in Construction**, Elsevier B.V., v. 155, Nov 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105064>. Acesso em: 5 mai. 2025.
- AMAZON WEB SERVICES. **O que é tecnologia de gêmeos digitais?**. AWS Amazon. Amazon, 2024. Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/what-is/digital-twin/>. Acesso em: 13 mai. 2025.
- ANGIN, Pelin *et al.* AgriLoRa: A Digital Twin Framework for Smart Agriculture. **Jowua**, v. 11, p. 77-96, Dez 2020. Disponível em: DOI: 10.22667/JOWUA.2020.12.31.77. Acesso em: 10 abr. 2025.
- ANSYS. **Ansys Twin Builder**. 2024. Disponível em: <https://www.ansys.com/products/digital-twin/ansys-twin-builder>. Acesso em: 5 mai. 2025.
- ARANDA. **Software de código aberto para criação de gêmeos digitais**. 2022. Disponível em: <https://www.arandanet.com.br/revista/mm/noticia/4165-Software-de-codigo-aberto-para-criacao-de-gemeos-digitais.html>. Acesso em: 5 mai. 2025.
- BACHMANN, João Eduardo; SILVEIRA, Ismar; MARTINS, Valeria. Digital Twins for Education: A Literature Review. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO*, n. 35. 2024. Anais [...] Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2024, p. 722-736. Disponível em: <https://doi.org/10.5753/sbie.2024.242288>. Acesso em: 9 abr. 2025.
- BASSEY, Kelvin *et al.* Economic impact of digital twins on renewable energy investments. **Engineering Science & Technology Journal**, ResearchGate, p. 2232-2247, Jul 2024. Disponível em: 10.51594/estj.v5i7.1318. Acesso em: 9 abr. 2025.
- BENTLEY SYSTEMS. **OpenCities Planner**. 2024. Disponível em: <https://br.bentley.com/software/opencities-planner/>. Acesso em: 5 mai. 2025.
- BORTOLINI, Rafaela *et al.* Digital Twins' Applications for Building Energy Efficiency: A Review. **Energies**, MPDI, v. 15, Set 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15197002>. Acesso em: 9 abr. 2025.
- BRUYNSEELS, Koen; SANTONI DE SIO, Filippo; HOVEN, Jeroen. **Digital Twins in Health Care: Ethical Implications of an Emerging Engineering**

**Paradigm.** Frontiers. 2018. Disponível em: doi: 10.3389/fgene.2018.00031. Acesso em: 20 mai. 2024.

CASNE ENGINEERING. **Digital twins: not your father's BMS and SCADA systems.** Casne Blog. 2021. Disponível em: <https://blog.casne.com/blog/digital-twins-not-your-fathers-bms-and-scada-systems>. Acesso em: 13 mai. 2025.

DEMBSKI, Fabian *et al.* Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany. **Sustainability**, MDPI, v. 12, Mar 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12062307>. Acesso em: 19 jun. 2024.

ELECTRICAL VOICE. **SCADA vs Digital Twin – Difference.** Eletrical Voice. 2022. Disponível em: <https://electricalvoice.com/scada-vs-digital-twin-difference/>. Acesso em: 13 mai. 2025.

ERDEI, Timotei; KRAKÓ, Rudolf; HUSI, Géza. Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm. **Applied Sciences**, Appl. Sci, set 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12178862>. Acesso em: 9 abr. 2025.

ERRANDONEA, Itxaro; BELTRÁN, Sergio; ARRIZABALAGA, Saioa. Digital Twin for maintenance: A literature review. **Computers in Industry**, Elsevier B.V, v. 123, Dez 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103316>. Acesso em: 23 jun. 2025.

ESCRIBÀ-GELONCH, Marc *et al.* Digital Twins in Agriculture: Orchestration and Applications. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, ACS Publications, v. 72, Mai 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.4c01934>. Acesso em: 10 jun. 2024.

FARSI, Maryam *et al.* **Digital Twin Technologies and Smart Cities.** Springer, v. 3, f. 109, 2020. 217 p. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-18732-3>. Acesso em: 4 jun. 2024.

FISCHER, Henrique *et al.* Implementação de Gêmeos Digitais Aplicado a um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Subterrâneo. *In: PROCEEDINGS OF THE SEMINAR ON POWER ELECTRONICS AND CONTROL (SEPOC)*, n. 16. 2024, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/33753>. Acesso em: 9 abr. 2025.

GALVÃO, Gabriel *et al.* Aplicação de Gêmeos Digitais em um ambiente BIM de monitoramento de estruturas de edificações. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO*,

n. 4. 2023, Aracaju, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.46421/sbtic.v4i00.2590>. Acesso em: 1 mai. 2025.

GRIEVES, Michael. **Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication**. ResearchGate. 2015. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/275211047\\_Digital\\_Twin\\_Manufacturing\\_Excellence\\_through\\_Virtual\\_Factory\\_Replication](https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication). Acesso em: 1 mai. 2025.

HASAN, Haya *et al.* A Blockchain-Based Approach for the Creation of Digital Twins. **IEEE Access**, IEEE, v. 8, p. 34113 - 34126, Fev 2020. Disponível em: 10.1109/ACCESS.2020.2974810. Acesso em: 5 mai. 2025.

JACOBY, Michael; USLÄNDER, Thomas. **Digital Twin and Internet of Things—Current Standards Landscape**. Applied Sciences. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10186519>. Acesso em: 3 mai. 2025.

KIM, Jae-Kwon *et al.* Machine-Learning-Based Digital Twin System for Predicting the Progression of Prostate Cancer. **Appl. Sci.** MDPI, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12168156>. Acesso em: 20 mai. 2024.

KRITZINGER, Werner *et al.* Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. **IFAC-PapersOnLine**, Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018., v. 51, n. n.11, p. 1016-1022, 11 Junho 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>. Acesso em: 1 mai. 2025.

LENG, Jiewu *et al.* Digital twins-based smart manufacturing system design in Industry 4.0: A review. **Journal of Manufacturing Systems**, Elsevier Ltd., v. 60, p. 119-137, Jul 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.05.011>. Acesso em: 14 mai. 2024.

LILJANIEMI, Antti; PAAVILAINEN, Heikki. Using Digital Twin Technology in Engineering Education – Course Concept to Explore Benefits and Barriers. **Open Engineering**, De Gruyter, v. 10, p. 377-385, Mai 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/eng-2020-0040>. Acesso em: 9 abr. 2025.

LIU, Mengnan *et al.* Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. **Journal of Manufacturing Systems**, Elsevier Ltd, v. 58, p. 346-361, Jan 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>. Acesso em: 18 jun. 2024.

LU, Yuqian *et al.* Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. **Robotics and Computer-Integrated**

**Manufacturing**, Elsevier Ltd., v. 61, Fev 2020. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>. Acesso em: 14 mai. 2024.

LUCAS, Alexandre Luís. **DIGITAL TWINS @ FACTORIES OF THE FUTURE** Dissertação (Engenharia Informática) - Universidade D Coimbra, Coimbra, 2023. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10316/107896>. Acesso em: 1 mai. 2025.

MENEGON, Julia; ISATTO, Eduardo Luís. **Digital twins as enablers of structure inspection and maintenance**. Sci Elo. 2023. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1590/1806-9649-2022v30e4922>. Acesso em: 23 abr. 2025.

MICROSOFT. **O que são Gêmeos Digitais do Azure?** 2025. Disponível em:  
<https://learn.microsoft.com/pt-br/azure/digital-twins/overview>. Acesso em: 5 mai. 2025.

MIEHE, Robert *et al.* Sustainable production and the role of digital twins—Basic reflections and perspectives. **Journal of Advanced Manufacturing and Processing**, Aiche, v. 7, Fev 2021. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1002/amp2.10078>. Acesso em: 20 jun. 2024.

MINERVA, Roberto; LEE, Gyu; CRESPI, Noel. Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 108, p. 1785 - 1824, Out 2020. Disponível em:  
[10.1109/JPROC.2020.2998530](https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.2998530). Acesso em: 3 mai. 2025.

MYLONAS, Georgios *et al.* Digital Twins From Smart Manufacturing to Smart Cities: A Survey. **IEEE Access**, IEEE, v. 9, p. 143222 - 143249, 15 Out 2021. Disponível em: DOI: [10.1109/ACCESS.2021.3120843](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120843). Acesso em: 19 jun. 2024.

NIELSEN, Christian; SILVA, Elias; YU, Fei. Digital Twins and Blockchain – Proof of Concept: Elsevier B.V. **Procedia CIRP**, v. 93. 251–255 p, 2020. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.104>. Acesso em: 5 mai. 2025.

NVIDIA. **Digital Twins Overview**. 2024. Disponível em:  
<https://docs.omniverse.nvidia.com/digital-twins/latest/overview.html>. Acesso em: 5 mai. 2025.

PARROTT, Aaron; WARSHAW, Lane. **Industry 4.0 and the digital twin Manufacturing meets its match**. Deloitte Insights. 2017. Disponível em:  
<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>. Acesso em: 1 mai. 2025.

PELADARINOS, Nikolaos *et al.* Enhancing Smart Agriculture by Implementing Digital Twins: A Comprehensive Review. **Sensors**, MDPI, v. 23, Aqs 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23167128>. Acesso em: 10 abr. 2025.

POPA, Eugen *et al.* **The use of digital twins in healthcare: socio-ethical benefits and socio-ethical risks**. biomedcentral (BMC). 2021. Disponível em: <https://lssjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40504-021-00113-x>. Acesso em: 20 mai. 2024.

PURCELL, Warren; NEUBAUER, Thomas. Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review. **Smart Agricultural Technology**, Elsevier B.V, v. 3, Fev 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100094>. Acesso em: 10 abr. 2025.

PUTZ, Benedikt *et al.* EtherTwin: Blockchain-based Secure Digital Twin Information Management. **Information Processing & Management**, Elsevier Ltd., v. 58, Jan 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2020.102425>. Acesso em: 5 mai. 2025.

PYLIANIDIS, Christos; OSINGA, Sjoukje; ATHANASIADIS, Ioannis. Introducing digital twins to agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier B.V, v. 184, Mai 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105942>. Acesso em: 10 abr. 2025.

QUINALHA, Eduardo. **GÊMEOS DIGITAIS, O FUTURO DA INDÚSTRIA 4.0: ESTUDO DE CASO**. Curitiba Monografia (CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM REDES DE COMPUTADORES E TELEINFORMÁTICA) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/19971>. Acesso em: 1 mai. 2025.

REINPOLD, Lasse *et al.* Systematic comparison of software agents and Digital Twins: differences, similarities, and synergies in industrial production. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Springer, v. 36. 765–800 p, Jan 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10845-023-02278-y>. Acesso em: 13 mai. 2023.

RIBEIRO, Anderson *et al.* APLICAÇÃO DE GÊMEOS DIGITAIS NA ADMINISTRAÇÃO FINANCEIRA PÚBLICA: UM MODELO PARA O CONTROLE INTERNO NA GESTÃO DO PROGRAMA DE VACINAÇÃO BRASILEIRO. **Revista Valore**, Volta Redonda, v. 7, 16 Set 2022. Disponível em: <https://revistavalore.emnuvens.com.br/valore/article/view/892>. Acesso em: 20 mai. 2024.

SAAD, Ahmed *et al.* On the Implementation of IoT-Based Digital Twin for Networked Microgrids Resiliency Against Cyber Attacks. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 11, p. 5138 - 5150, Nov 2020. Disponível em: [10.1109/TSG.2020.3000958](https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3000958). Acesso em: 3 mai. 2025.

SAAD, Ahmed; FADDEL, Samy; MOHAMMED, Osama. IoT-Based Digital Twin for Energy Cyber-Physical Systems: Design and Implementation. **Energies**, v. 13, n. Ed 10. 4762 p, Set 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13184762>. Acesso em: 3 mai. 2025.

SAHAL, Radhya; ALSAMHI, Saeed; BROWN, Kenneth. **Personal Digital Twin: A Close Look into the Present and a Step towards the Future of Personalised Healthcare Industry**. MDPI. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s22155918>. Acesso em: 20 mai. 2024.

SANTOS, Raquel. **Medicina personalizada e de precisão: o gêmeo digital na oncologia** Trabalho de Conclusão de Curso (Farmácia) - Universidade Federal de São Paulo, Diadema, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unifesp.br/items/4dc78532-4889-4124-bedc-03648e4f1d7e>. Acesso em: 20 mai. 2024.

SILVA, Bruna; PORTO, Gabriel; KALILI, Roberto. GÊMEOS DIGITAIS APLICADOS À INDÚSTRIA AUTOMOTIVA: OTIMIZAÇÃO E MANUTENÇÃO EFICIENTE DE VEÍCULOS. **Revista Contemporânea**, v. 4, Mai 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.56083/RCV4N12-080>. Acesso em: 23 jun. 2025.

SIMULARGE. **Simulation vs. Digital Twin: Key Differences Explained**. Simularge. 2024. Disponível em: <https://www.simularge.com/blog/simulation-vs-digital-twin-key-differences-explained>. Acesso em: 13 mai. 2025.

SOORI, Mohsen; AREZOO, Behrooz; DASTRES, Roza. Digital twin for smart manufacturing, A review. **Sustainable Manufacturing and Service Economics**, Elsevier B.V., v. 2, Abr 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100017>. Acesso em: 28 mai. 2024.

SOUZA, João Vitor. **Simulações e Gêmeos Digitais na Indústria 4.0: Desafios e Benefícios Para o Setor Automobilístico** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024. Disponível em: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/7094>. Acesso em: 1 mai. 2025.

STEINDL, Gernot *et al.* Generic Digital Twin Architecture for Industrial Energy Systems. **Appl. Sci**, MDPI, v. 10, Dez 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10248903>. Acesso em: 9 abr. 2025.

SUHAIL, Sabah *et al.* Trustworthy Digital Twins in the Industrial Internet of Things With Blockchain. **IEEE Internet Computing**, IEEE, v. 26, p. 58 - 67, Jun 2021. Disponível em: 10.1109/MIC.2021.3059320. Acesso em: 5 mai. 2025.

TAGARAKIS, Aristotelis *et al.* Digital Twins in Agriculture and Forestry: A Review. **Sensors**, MDPI, v. 24, Mai 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s24103117>. Acesso em: 10 abr. 2025.

TAO, Fei *et al.* Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, IEEE, v. 15, n. n. 4. 2405–2415, p, 01 Abril 2019. Disponível em: 10.1109/TII.2018.2873186. Acesso em: 1 mai. 2025.

THE FULL Modeling and simulation of a Robotic Arm using MATLAB simscape multibody and Solidworks. MT Engineering. Youtube: MT Engineering, 2022. Vídeo (64min). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=pDiwAA1cnb0&t=1439s>. Acesso em: 25 mai. 2025.

THINGABLE. **Diferenças entre Sistemas Supervisórios e as aplicações desenvolvidas por meio de uma plataforma IoT**. Thingable. 2023. Disponível em: <https://www.thingable.com.br/post/diferen%C3%A7as-entre-sistemas-supervis%C3%B3rios-e-as-aplica%C3%A7%C3%B5es-desenvolvidas-por-meio-de-uma-plataforma-iot>. Acesso em: 13 mai. 2025.

TWI GLOBAL. **Simulation vs Digital Twin (What is the Difference Between Them?)**. TWI. 2023. Disponível em: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/simulation-vs-digital-twin>. Acesso em: 13 mai. 2023.

VAN DINTER, Raymon; TEKINERDOGAN, Bedir; CATAL, Cagatay. Predictive maintenance using digital twins: A systematic literature review. **Information and Software Technology**, Elsevier B.V, v. 151, Nov 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107008>. Acesso em: 23 abr. 2025.

YAQOOB, Ibrar *et al.* Blockchain for Digital Twins: Recent Advances and Future Research Challenges. **IEEE Network**, IEEE, v. 34, p. 290 - 298, Out 2020. Disponível em: 10.1109/MNET.001.1900661. Acesso em: 5 mai. 2025.

YOU, Yingchao *et al.* Advances of Digital Twins for Predictive Maintenance. **Procedia Computer Science**, Elsevier B.V, v. 200, p. 1471-1480, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.348>. Acesso em: 23 jun. 2025.

ZACHER, Serge. Digital Twins for Education and Study of Engineering Sciences. **International Journal on Engineering, Science and Technology**, IJonest, v. 2,

2020. Disponível em: <https://scispace.com/pdf/digital-twins-for-education-and-study-of-engineering-3cskov87t9.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2025.

## APÊNDICE A — ARQUIVO XML DO MODELO ROBOARM\_V2

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no" ?>

<SimscapeMultibodyImportXML version="2.0" xmlns="urn:mathworks:SimscapeMultibody:import"
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">

  <Created by="" on="06/22/25||23:52:22" using="Simscape Multibody Link Version 7.4" from="SolidWorks
32.1.0"/>

  <ModelUnits mass="kilogram" length="millimeter"/>

  <DataUnits mass="kilogram" length="meter"/>

  <RootAssembly name="RoboARM_V1_2" uid="RoboARM_V1_2" version="151">

    <AssemblyFile name="RoboARM_V1_2.SLDASM" type="SolidWorks Assembly"/>

    <InstanceTree>

      <Instance name="Peça0_1-1" uid="Peça0_1-1" entityUid="Peça0_1*:Valor predeterminado">

        <Transform>

          <Rotation>0.73650246673606734 1.327421228418198e-15 0.6764348575374336 -1.1693516995419407e-15 1
-6.8918804527714214e-16 -0.6764348575374336 -2.834015548991849e-16 0.73650246673606734</Rotation>

          <Translation>-1.4025931461726022 -0.0039337603241793584 0.80542963380812138</Translation>

        </Transform>

      </Instance>

      <Instance name="Peça1-1" uid="Peça1-1" entityUid="Peça1*:Valor predeterminado">

        <Transform>

          <Rotation>-0.68370756913483055 0.27382447556062767 -0.67643485753743371 0.37179030339725244
0.9283167402884529 7.541701197229458e-16 0.62794580196663474 -0.2514919209123192 -
0.73650246673606723</Rotation>

          <Translation>-1.4694743286091225 0.15160217578876711 0.84988401731952712</Translation>

        </Transform>

      </Instance>

      <Instance name="Peça0-1" uid="Peça0-1" grounded="true" entityUid="Peça0*:Valor predeterminado">

        <Transform>

```

```

<Rotation>-0.45070629693644471 8.3221526302556685e-16 0.89267229927999758 1.3173559137131411e-
16 1 -6.7918866375456932e-16 -0.89267229927999747 -1.6071196801577776e-16 -0.45070629693644459</Rotation>

<Translation>-1.403859219401729 7.680480210189946e-16 0.80659244873822256</Translation>

</Transform>

</Instance>

<Instance name="Peça2-1" uid="Peça2-1" entityUid="Peça2*:Valor predeterminado">

<Transform>

<Rotation>-0.67819620997772445 -0.28720338486891545 -0.67643485753743327 -0.38995576775418717
0.92083358930658166 7.4940054162198066e-16 0.62288393779828077 0.26377967420670456 -
0.73650246673606734</Rotation>

<Translation>-1.5953826726967506 0.15005811131842781 0.94515700819850568</Translation>

</Transform>

</Instance>

</InstanceTree>

<Constraints>

<Concentric name="Concêntrico1">

<ConstraintGeometry geomType="cylinder">

<InstancePath>

<Uid>Peça0-1</Uid>

</InstancePath>

<Position>0 0.070000000000000007 0</Position>

<Axis>0 -1 -1.3614074456413092e-16</Axis>

</ConstraintGeometry>

<ConstraintGeometry geomType="cylinder">

<InstancePath>

<Uid>Peça0_1-1</Uid>

</InstancePath>

<Position>-0.0017190346079054564 0.0900000000000000011 -2.2204460492503131e-16</Position>

<Axis>0 -1 0</Axis>

</ConstraintGeometry>

```

```

</Concentric>
<Coincident name="Coincidente2">
<ConstraintGeometry geomType="plane">
<InstancePath>
<Uid>Peça0-1</Uid>
</InstancePath>
<Position>0 0 0</Position>
<Axis>0 1 1.3614074456413092e-16</Axis>
</ConstraintGeometry>
<ConstraintGeometry geomType="plane">
<InstancePath>
<Uid>RoboARM_V1_2</Uid>
</InstancePath>
<Position>0 0 0</Position>
<Axis>0 1 0</Axis>
</ConstraintGeometry>
</Coincident>
<Coincident name="Coincidente4">
<ConstraintGeometry geomType="plane">
<InstancePath>
<Uid>Peça0_1-1</Uid>
</InstancePath>
<Position>0.05767694307611082 0.06149683024754133 -0.0049999999999998934</Position>
<Axis>0 0 -1</Axis>
</ConstraintGeometry>
<ConstraintGeometry geomType="plane">
<InstancePath>
<Uid>Peça1-1</Uid>
</InstancePath>
<Position>0 0 -0.0074999999999999512</Position>

```

```

<Axis>0 0 -1</Axis>

</ConstraintGeometry>

</Coincident>

<Concentric name="Concêntrico4">

<ConstraintGeometry geomType="cylinder">

<InstancePath>

<Uid>Peça0_1-1</Uid>

</InstancePath>

<Position>-0.00042172749565461132 0.12393376032418002 0.00500000000000000044</Position>

<Axis>0 0 -1</Axis>

</ConstraintGeometry>

<ConstraintGeometry geomType="cylinder">

<InstancePath>

<Uid>Peça1-1</Uid>

</InstancePath>

<Position>-0.084999999999999964 0 -0.017499999999999849</Position>

<Axis>0 0 1</Axis>

</ConstraintGeometry>

</Concentric>

<Coincident name="Coincidente5">

<ConstraintGeometry geomType="plane">

<InstancePath>

<Uid>Peça1-1</Uid>

</InstancePath>

<Position>0 0 0.0074999999999999512</Position>

<Axis>0 0 1</Axis>

</ConstraintGeometry>

<ConstraintGeometry geomType="plane">

<InstancePath>

<Uid>Peça2-1</Uid>

```

```

</InstancePath>

<Position>0 -1.1102230246251565e-16 -0.0075000000000000622</Position>

<Axis>0 0 -0.99999999999999978</Axis>

</ConstraintGeometry>

</Coincident>

<Concentric name="Concêntrico5">

<ConstraintGeometry geomType="cylinder">

<InstancePath>

<Uid>Peça1-1</Uid>

</InstancePath>

<Position>0.084999999999999964 0 -0.0024999999999999467</Position>

<Axis>0 0 1</Axis>

</ConstraintGeometry>

<ConstraintGeometry geomType="cylinder">

<InstancePath>

<Uid>Peça2-1</Uid>

</InstancePath>

<Position>-0.084999999999999964 -1.1102230246251565e-16 -0.017500000000000071</Position>

<Axis>0 0 0.99999999999999978</Axis>

</ConstraintGeometry>

</Concentric>

<Coincident name="Coincidente6">

<ConstraintGeometry geomType="circle">

<InstancePath>

<Uid>Peça0-1</Uid>

</InstancePath>

<Position>0 0.070000000000000007 0</Position>

<Axis>0 1 1.3614074456413092e-16</Axis>

</ConstraintGeometry>

<ConstraintGeometry geomType="cylinder">

```

```

<InstancePath>
<Uid>Peça0_1-1</Uid>
</InstancePath>

<Position>-0.0017190346079054564 0.0900000000000000011 -2.2204460492503131e-16</Position>

<Axis>0 -1 0</Axis>

</ConstraintGeometry>

</Coincident>

<Coincident name="Coincidente7">

<ConstraintGeometry geomType="plane">

<InstancePath>

<Uid>Peça0-1</Uid>

</InstancePath>

<Position>0 0.02 0</Position>

<Axis>0 1 1.3614074456413092e-16</Axis>

</ConstraintGeometry>

<ConstraintGeometry geomType="plane">

<InstancePath>

<Uid>Peça0_1-1</Uid>

</InstancePath>

<Position>-0.03499999999999992 0.023933760324180098 0.0049999999999998934</Position>

<Axis>0 -1 0</Axis>

</ConstraintGeometry>

</Coincident>

</Constraints>

</RootAssembly>

<Assemblies>

</Assemblies>

<Parts>

<Part name="Peça0" uid="Peça0*:*Valor predeterminado" version="111">

<ModelUnits mass="kilogram" length="millimeter"/>

```

```

<PartFile name="Peça0.SLDPRT" type="SolidWorks Part"/>

<MassProperties>

<Mass>0.35235232009245632</Mass>

<CenterOfMass>0 0.010077687529371767 0</CenterOfMass>

<Inertia>0.00050381877384792319 0.00098042404473067308 0.00050381877384792298 0 0 0</Inertia>

</MassProperties>

<GeometryFile name="Peça0_Valor predeterminado_sldprt.STEP" type="STEP"/>

<VisualProperties>

<Ambient r="0.89803921568627454" g="0.89803921568627454" b="0.89803921568627454" a="1"/>

<Diffuse r="0.89803921568627454" g="0.89803921568627454" b="0.89803921568627454" a="1"/>

<Specular r="0.62862745098039219" g="0.62862745098039219" b="0.62862745098039219" a="1"/>

<Emissive r="0" g="0" b="0" a="1"/>

<Shininess>0.3125</Shininess>

</VisualProperties>

</Part>

<Part name="Peça0_1" uid="Peça0_1*:Valor predeterminado" version="165">

<ModelUnits mass="kilogram" length="millimeter"/>

<PartFile name="Peça0_1.SLDPRT" type="SolidWorks Part"/>

<MassProperties>

<Mass>0.056557254391128721</Mass>

<CenterOfMass>-0.0093868621471159246                                0.074457406428200965

0.00017919006689958868</CenterOfMass>

<Inertia>5.6046053859209158e-05          1.5734475035412148e-05          7.0704945099598821e-05          -

5.014181221663908e-07 -9.513144890050446e-08 -1.4729914918613705e-06</Inertia>

</MassProperties>

<GeometryFile name="Peça0_1_Valor predeterminado_sldprt.STEP" type="STEP"/>

<VisualProperties>

<Ambient r="0.89803921568627454" g="0.89803921568627454" b="0.89803921568627454" a="1"/>

<Diffuse r="0.89803921568627454" g="0.89803921568627454" b="0.89803921568627454" a="1"/>

<Specular r="0.62862745098039219" g="0.62862745098039219" b="0.62862745098039219" a="1"/>

```

```

<Emissive r="0" g="0" b="0" a="1"/>
<Shininess>0.3125</Shininess>
</VisualProperties>
</Part>
<Part name="Peça1" uid="Peça1*:Valor predeterminado" version="229">
<ModelUnits mass="kilogram" length="millimeter"/>
<PartFile name="Peça1.SLDPRT" type="SolidWorks Part"/>
<MassProperties>
<Mass>0.11453141832651495</Mass>
<CenterOfMass>-0.011132161169748002                                -0.0034322052337036188
0.00030288963872498044</CenterOfMass>
<Inertia>1.6162911027425464e-05      0.00036671453405368374      0.00037773992037304929      -
1.1906451459701439e-07 2.8962975865786908e-06 3.6382320184234632e-06</Inertia>
</MassProperties>
<GeometryFile name="Peça1_Valor predeterminado_sldprt.STEP" type="STEP"/>
<VisualProperties>
<Ambient r="0.96862745098039216" g="0.25882352941176467" b="0.25882352941176467" a="1"/>
<Diffuse r="0.77490196078431373" g="0.20705882352941174" b="0.20705882352941174" a="1"/>
<Specular r="0.29058823529411765" g="0.077647058823529402" b="0.077647058823529402" a="1"/>
<Emissive r="0" g="0" b="0" a="1"/>
<Shininess>0.3125</Shininess>
</VisualProperties>
</Part>
<Part name="Peça2" uid="Peça2*:Valor predeterminado" version="262">
<ModelUnits mass="kilogram" length="millimeter"/>
<PartFile name="Peça2.SLDPRT" type="SolidWorks Part"/>
<MassProperties>
<Mass>0.096907840914692442</Mass>
<CenterOfMass>-0.016843466893737995                                -0.0031984999675405148
0.0003782333285194366</CenterOfMass>

```

```

<Inertia>1.1706905170625114e-05      0.00032866785017893901      0.00033407644603281072      -
1.1723710663151748e-07 2.4982094378107599e-06 3.2673226675767771e-06</Inertia>

</MassProperties>

<GeometryFile name="Peça2_Valor predeterminado_sldprt.STEP" type="STEP"/>

<VisualProperties>

<Ambient r="0.96862745098039216" g="0.25882352941176467" b="0.25882352941176467" a="1"/>

<Diffuse r="0.77490196078431373" g="0.20705882352941174" b="0.20705882352941174" a="1"/>

<Specular r="0.29058823529411765" g="0.077647058823529402" b="0.077647058823529402" a="1"/>

<Emissive r="0" g="0" b="0" a="1"/>

<Shininess>0.3125</Shininess>

</VisualProperties>

</Part>

</Parts>

</SimscapeMultibodyImportXML>

```

## APÊNDICE B — CÓDIGO DO BLOCO: TRAJETORIA\_DESEJADA

```
function Td = Trajetoria_Desejada(t, tipo)

% Td = matriz homogênea 4x4 com posição e orientação desejadas
% t = tempo (do bloco Clock)
% tipo = número da trajetória selecionada (1 a 6)

% Inicializa R (rotação) como identidade e p (posição) como [0;0;0]
R = eye(3);          % Cria uma matriz identidade 3x3
p = [0; 0; 0];

% Seleciona a trajetória de acordo com o número (tipo)
switch tipo
case 1 % Helicoidal (círculo no XY com subida em Z)
    r = 0.03;          % raio da circunferência
    w = 2*pi/6;        % velocidade angular (1 volta a cada 6s)
    h = 0.02;          % altura máxima da subida
    z0 = 0.10;         % altura inicial

    x = 0.15 + r * cos(w * t); % coordenada X
    y = 0.00 + r * sin(w * t); % coordenada Y
    z = z0 + h * sin(w * t / 2); % coordenada Z (oscilando suavemente)

    p = [x; y; z];      % vetor de posição
    R = troztz(w * t);   % rotação em Z acompanhando o movimento

case 2 % Linha reta com rotação crescente
    p0 = [0.12; -0.04; 0.12]; % ponto inicial
    pf = [0.18; 0.04; 0.12]; % ponto final
    T = 5;                % duração da interpolação (s)
```

```

alpha = min(t / T, 1);    % fator de interpolação (0 a 1)

p = (1 - alpha) * po + alpha * pf; % interpolação linear da posição

R = trotz(pi/6 * alpha);   % rotação Z progressiva até 30°

```

case 3 % Curva em 8 (lemniscata) no plano XY

```

a = 0.025;                % amplitude da curva

w = 2*pi/10;              % frequência

z = 0.12;                 % altura constante

x = 0.15 + a * sin(w * t);    % coordenada X

y = 0.00 + a * sin(w * t) * cos(w * t); % coordenada Y

p = [x; y; z];              % posição

R = trotz(0);               % rotação constante (nenhuma)

```

case 4 % Pegar e deixar objeto (movimento funcional)

```

p0 = [0.15; 0.00; 0.12];    % posição inicial

pA = [0.20; 0.05; 0.08];    % ponto de pegada

pB = [0.10; -0.05; 0.08];   % ponto de entrega

t1 = 2; t2 = 3; t3 = 5; t4 = 7; t5 = 9; % tempos de cada fase

```

```

if t < t1                % Fase 1: ir para ponto A

    alpha = t / t1;

    p = (1 - alpha) * p0 + alpha * pA;

elseif t < t2            % Fase 2: parado no ponto A

    p = pA;

elseif t < t3            % Fase 3: ir de A para B

    alpha = (t - t2) / (t3 - t2);

    p = (1 - alpha) * pA + alpha * pB;

elseif t < t4            % Fase 4: parado no ponto B

```

```

    p = pB;

elseif t < t5          % Fase 5: voltar para posição inicial

    alpha = (t - t4) / (t5 - t4);

    p = (1 - alpha) * pB + alpha * p0;

else                  % Fase final: parado em p0

    p = p0;

end

R = troitz(0); % sem rotação

case 5 % Espiral com raio crescente

    r0 = 0.01;      % raio inicial

    k = 0.005;      % taxa de crescimento do raio

    w = 2*pi/6;     % velocidade angular

    z = 0.10;       % altura constante

    r = r0 + k * t;      % raio em função do tempo

    x = 0.15 + r * cos(w * t);      % X em espiral

    y = 0.00 + r * sin(w * t);      % Y em espiral

    p = [x; y; z];

    R = troitz(w * t);      % rotação sincronizada

case 6 % Trajetória linear original (reta inclinada com rotação fixa)

    p0 = [0.15; 0.0; 0.10];      % ponto inicial

    pf = [0.10; 0.15; 0.15];     % ponto final

    alpha = min(t / 5, 1);      % fator de interpolação

    p = p0 + (pf - p0) * alpha;  % interpolação linear

    R = troitz(pi/4);            % rotação fixa de 45°

```

```

otherwise

    % Caso inválido ou não definido → valor padrão

    p = [0.15; 0.00; 0.10];

    R = eye(3);

end

% Garante que R e p estejam nas dimensões corretas

R = R(1:3, 1:3);          % rotação 3x3

p = reshape(p, [3,1]);    % posição 3x1

% Monta a matriz homogênea 4x4

Td = zeros(4,4);

Td(1:3,1:3) = R;

Td(1:3,4) = p;

Td(4,4) = 1;

end

```

## APÊNDICE C — CÓDIGO DO BLOCO: CINEMATICA\_INVERSA

```
% Função que calcula os ângulos articulares (cinemática inversa)

% a partir de uma matriz homogênea Td (4x4) com posição e orientação desejadas.


% Parâmetros físicos do robô (comprimento dos elos)
L1 = 0.12; % altura do primeiro elo (base ao segundo elo)
L2 = 0.12; % comprimento do segundo elo
L3 = 0.08; % comprimento do terceiro elo (efetuador)


% Extrai a posição desejada do efetuador (última coluna de Td)
pd = Td(1:3, 4); % vetor de posição [x; y; z]


% Extrai a orientação desejada do efetuador (matriz de rotação 3x3)
Rd = Td(1:3, 1:3);


% Calcula a posição do "pulso" (ponto antes do efetuador)
% Subtrai a orientação do eixo x escalada por L3
pw = pd - L3 * Rd(:,1);


% Separa as coordenadas do ponto do pulso
x = pw(1);
y = pw(2);
z = pw(3);


% Calcula o ângulo da junta 1 (rotação da base no plano XY)
theta1 = atan2(y, x);


% Calcula a distância radial no plano XY (projeção no chão)
r = sqrt(x^2 + y^2);
```

```
% Calcula a altura relativa entre o pulso e o eixo da junta 2
z_hat = z - L1;

% Aplica a lei dos cossenos para encontrar o ângulo entre os elos 2 e 3
D = (r^2 + z_hat^2 - L2^2 - L3^2) / (2 * L2 * L3);

% Garante que D esteja no intervalo [-1, 1] para evitar erros numéricos
D = max(min(D, 1), -1);

% Calcula o ângulo da junta 3 (cotovelo), solução "cotovelo para cima"
theta3 = atan2(sqrt(1 - D^2), D);

% Calcula o ângulo da junta 2 (elevação do braço)
theta2 = atan2(z_hat, r) - atan2(L3 * sin(theta3), L2 + L3 * cos(theta3));

% Retorna os três ângulos como vetor coluna
thetas = [theta1; theta2; theta3];
```