

Capítulo

3

Gêmeos Digitais: Uma Ponte entre os Mundos Físico e Virtual

Everton Cavalcante^{id} (UFRN), Thais Batista^{id} (UFRN), Flavia C. Delicato^{id} (UFF), André Almeida^{id} (IFRN)

Resumo

Gêmeos digitais consistem em representações virtuais dinâmicas de entidades físicas, processos e sistemas do mundo real, permitindo integrar dados, modelos computacionais e mecanismos de análise para apoiar atividades de monitoramento, simulação, previsão, otimização e tomada de decisão. Este capítulo fornece uma visão abrangente sobre gêmeos digitais, apresentando seus conceitos fundamentais, os principais paradigmas habilitadores, padrões e plataformas voltados ao seu desenvolvimento e operação. Além disso, discute o papel das tecnologias multimídia e Web, focando na integração de dados multimodais, na interoperabilidade de sistemas distribuídos e no desenvolvimento de interfaces visuais interativas. O capítulo explora ainda domínios nos quais gêmeos digitais têm sido empregados em diversas aplicações e discute desafios de pesquisa relacionados à construção de ecossistemas de gêmeos digitais interoperáveis, confiáveis e seguros. Como contribuição, este capítulo busca oferecer a pesquisadores, estudantes e profissionais em Computação uma base conceitual sólida e estruturada sobre gêmeos digitais, estimulando o desenvolvimento de novas pesquisas e aplicações na interseção entre esse paradigma e as tecnologias multimídia e da Web.

Abstract

Digital twins consist of dynamic virtual representations of real-world physical entities, processes, and systems, enabling the integration of data, computational models, and analysis mechanisms to support monitoring, simulation, prediction, optimization, and decision-making. This chapter provides a comprehensive overview of digital twins, presenting their fundamental concepts, the main enabling paradigms, standards, and platforms supporting their development and operation. Furthermore, it discusses the role of multimedia and Web technologies in this context, with emphasis on multimodal data integration, communication and interoperability among distributed systems, and interactive

visualization interfaces. The chapter further explores domains where digital twins have been used across diverse applications and discusses research challenges in building interoperable, trustworthy, and secure digital twin ecosystems. As a contribution, this chapter aims to provide researchers, students, and practitioners in computing with a solid, structured conceptual foundation on digital twins, fostering the development of new research and applications at the intersection of this paradigm with multimedia and Web technologies.

3.1. Introdução

A crescente capacidade de observar, conectar, modelar e analisar sistemas do mundo real tem transformado a forma como os sistemas computacionais são utilizados para compreender e intervir em fenômenos físicos. Sensores conectados, redes de comunicação, computação em nuvem e na borda, técnicas de simulação, Inteligência Artificial (IA) e mecanismos de visualização interativa permitem construir representações digitais cada vez mais detalhadas de equipamentos, ambientes, processos e sistemas complexos. Nesse contexto, os **gêmeos digitais** (*digital twins*, em inglês) surgem como um paradigma para integrar representações computacionais a entidades ou processos do mundo real, estabelecendo uma relação dinâmica entre os mundos físico e virtual.

Embora o interesse por gêmeos digitais tenha crescido significativamente nos últimos anos, o uso de representações computacionais para monitorar e analisar sistemas físicos não é recente. O termo “gêmeo digital” foi introduzido em 2002, no contexto do gerenciamento do ciclo de vida de produtos, para designar a criação de uma contraparte digital de um sistema físico voltada ao seu monitoramento em tempo real e à sua otimização [Grieves and Vickers 2017]. Conceitos como modelagem, simulação, monitoramento remoto, sistemas ciberfísicos e engenharia baseada em modelos constituem antecedentes importantes desse paradigma. Contudo, os gêmeos digitais alcançaram maior maturidade técnica e escala de adoção apenas com a convergência de avanços em sensoriamento de baixo custo, infraestruturas de conectividade e processamento e métodos avançados de modelagem e de análise de grandes volumes de dados, o que permitiu que modelos antes relativamente independentes do sistema físico passassem a ser continuamente alimentados por dados de sua contraparte no mundo real.

Apesar desses avanços, a própria definição de gêmeo digital permanece objeto de discussão. Diferentes comunidades científicas e da indústria enfatizam propriedades distintas, como representação virtual, conexão com entidades físicas, atualização contínua, sincronização, simulação, previsão e suporte à tomada de decisão, diversidade essa também refletida em trabalhos que buscam caracterizar o conceito e mapear o estado da arte [Barricelli et al. 2019, Tao et al. 2019, Fuller et al. 2020, Jones et al. 2020, Eramo et al. 2022, Bokhtiar Al Zami et al. 2025]. Em uma tentativa de padronização, a norma internacional ISO/IEC 30173:2023 define um gêmeo digital como a “representação digital de uma entidade-alvo com conexões de dados que permitem a convergência entre estados físicos e digitais a uma taxa de sincronização apropriada” [ISO 2023]. Já o Digital Twin Consortium (DTC), consórcio internacional voltado à proposição de definições, taxonomias e capacidades de referência para gêmeos digitais em múltiplos domínios, define o conceito como uma representação virtual integrada e orientada a dados de entidades e processos do mundo real, com interação sincronizada em determinada frequência e fide-

lidade [Digital Twin Consortium 2022]. Apesar das diferenças entre essas definições, todas convergem para uma característica fundamental: um gêmeo digital não deve ser reduzido a uma representação estática ou a uma visualização de um sistema físico, mas deve estabelecer uma relação estruturada e dinâmica entre a representação digital e o que ela representa.

De maneira geral, um gêmeo digital consiste em uma réplica digital dinâmica, baseada em *software*, de uma entidade do mundo real, continuamente atualizada com dados provenientes de sensores e dispositivos computacionais ao longo de seu ciclo de vida. Essa integração permite que o modelo virtual reflita, em tempo quase real, o estado e o comportamento de seu correspondente físico, oferecendo funcionalidades de monitoramento, análise, visualização, controle e otimização da estrutura e do comportamento de sistemas complexos [Fitzgerald et al. 2024]. O que distingue o modelo de gêmeo digital dos modelos tradicionais de simulação e dos modelos digitais construídos apenas a partir de dados coletados de entidades físicas é a sincronização bidirecional automatizada entre os mundos real e digital: mudanças na entidade física são refletidas na representação virtual e vice-versa, possibilitando não apenas o monitoramento, mas também o controle e a otimização diretos da entidade-alvo.

Um gêmeo digital pode receber e produzir não apenas dados e eventos estruturados, mas também imagens, vídeos, áudio, dados espaciais, mapas, modelos tridimensionais e outras formas de informação multimodal. Por exemplo, câmeras podem fornecer fluxos de vídeo para identificar ocupação de ambientes, movimentação ou situações anômalas; microfones podem fornecer informações acústicas; modelos 3D podem representar a geometria de ambientes e equipamentos; mapas podem associar eventos a localizações; e interfaces gráficas interativas podem permitir que pessoas explorem o estado atual e possíveis estados futuros do sistema. Dessa forma, dados multimodais constituem parte fundamental da representação de um gêmeo digital e de seus mecanismos de observação e análise, característica ilustrada a seguir por meio do exemplo de um estádio inteligente, que servirá de referência ao longo deste capítulo.

Grandes estádios, que acomodam dezenas de milhares de espectadores, enfrentam desafios complexos de logística e segurança, como aglomerações que comprometem a experiência e a segurança durante os eventos, a dificuldade de rastrear a movimentação das pessoas e a tomada de decisão em tempo real [Adolphsen 2025]. Esses cenários têm sido cada vez mais instrumentados com sensores ambientais (temperatura, umidade, qualidade do ar e ruído), câmeras distribuídas nas áreas internas e externas e sensores de ocupação e de fluxo instalados em catracas, arquibancadas e corredores. Um gêmeo digital voltado ao gerenciamento e à segurança de multidões, como o ilustrado na Figura 3.1, poderia manter uma representação dos principais espaços, equipamentos, sistemas e relações do ambiente físico, contribuindo para a segurança e a experiência dos espectadores. Um setor de arquibancada, por exemplo, poderia ser representado digitalmente com informações sobre capacidade, ocupação estimada, condições ambientais e equipamentos associados, enquanto câmeras forneceriam fluxos de vídeo para estimar o número de pessoas em cada área. A análise desses fluxos permitiria identificar, de forma preditiva, pontos de congestão antes que ocorressem, além de gerar comandos automatizados, por meio de sinalizações digitais dinâmicas, para orientar o deslocamento das pessoas, da chegada à saída do local. Exemplos reais de estádios inteligentes nos quais gêmeos digitais têm sido utili-

zados incluem o SoFi Stadium¹ e o Gillette Stadium², nos Estados Unidos, o Deutsche Bank Park³, na Alemanha, e o Allianz Stadium⁴, na Austrália.



Figura 3.1. Visão conceitual do gêmeo digital de um estádio inteligente

Esse cenário de um estádio inteligente demonstra que o desenvolvimento de gêmeos digitais envolve desafios que vão além da mera integração de sensores. Do ponto de vista dos sistemas multimídia e da Web, os gêmeos digitais constituem um campo de aplicação particularmente rico, pois sua construção e operação dependem da captura, do transporte, do armazenamento, da integração e da apresentação desses dados multimodais. Cabe ressaltar que grande parte desses dados é coletada, processada e disponibilizada por meio de arquiteturas e protocolos do ecossistema da Web, como APIs REST, *streaming* de eventos e WebSockets. Portanto, tecnologias de sistemas multimídia e Web não são meramente periféricas à construção de gêmeos digitais, mas sim frequentemente constituem a própria infraestrutura de integração, visualização e interação que os torna operacionalmente viáveis e acessíveis aos usuários finais e às aplicações.

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma visão abrangente sobre gêmeos digitais, discutindo seus fundamentos conceituais, os principais paradigmas e as tecnologias que viabilizam sua construção, incluindo tecnologias multimídia e da Web, bem como algumas plataformas que possibilitam a conexão entre representações digitais e sistemas do mundo real. O capítulo também apresenta domínios reais de aplicação em que se observa a utilização consolidada de gêmeos digitais e discute os principais desafios científicos e tecnológicos relacionados ao seu desenvolvimento e sua implantação.

¹ *SoFi Stadium Builds Out Digital Twin for Operations and Maintenance*: <https://www.enr.com/articles/50568-sofi-stadium-builds-out-digital-twin-for-operations-and-maintenance>

² *Making Kraft Group architectural data more actionable*: <https://www.sportsbusinessjournal.com/Articles/2024/06/26/Tech/gillette-stadium-digital-twin/>

³ *Arena of IoT: Eintracht's IoT center*: <https://club.eintracht.de/eintrachttech/digital-center-arena-of-iot/>

⁴ *Optimizing Public Asset Lifecycle Using AWS IoT TwinMaker with John Holland*: <https://aws.amazon.com/solutions/case-studies/john-holland-case-study/>

O restante do capítulo está organizado da seguinte forma. A Seção 3.2 apresenta os conceitos fundamentais de gêmeos digitais e discute os principais paradigmas habilitadores, bem como o papel de tecnologias multimídia e da Web, linguagens, padrões e plataformas de *middleware* para sua construção e operação. A Seção 3.3 apresenta diferentes domínios em que gêmeos digitais têm sido empregados. A Seção 3.4 discute desafios de pesquisa relacionados à construção, operação e evolução de gêmeos digitais. Por fim, a Seção 3.5 sintetiza as principais discussões e contribuições do capítulo e aponta perspectivas futuras.

3.2. Conceitos, Paradigmas e Tecnologias para Gêmeos Digitais

3.2.1. Modelos, Sombras e Gêmeos Digitais

Um dos passos fundamentais para compreender os gêmeos digitais é distinguir três conceitos associados a diferentes níveis de integração entre os mundos físico e digital: **modelo digital**, **sombra digital** e **gêmeo digital**. Esses conceitos são frequentemente confundidos principalmente em decorrência da falta de uniformidade nas definições de gêmeos digitais na literatura [Kritzinger et al. 2018, Jones et al. 2020], levando diversos trabalhos a caracterizar como gêmeo digital algo que, na verdade, não se caracteriza como tal. A Figura 3.2 ilustra a distinção entre esses conceitos, explicados a seguir.

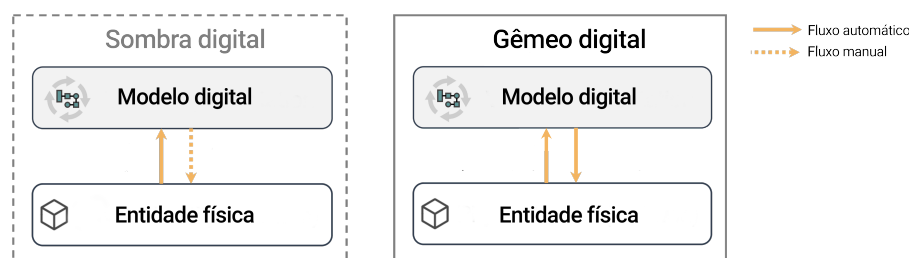


Figura 3.2. Diferença entre os conceitos de modelo, sombra e gêmeo digital

Um modelo digital é uma representação virtual de uma entidade, sistema ou processo físico, sem troca automática de dados entre as duas instâncias e, portanto, essencialmente estático. Um modelo tridimensional de um estádio, por exemplo, pode descrever sua geometria, seus setores e suas instalações sem depender de informações sobre o estado atual do edifício. Da mesma forma, um modelo matemático do comportamento térmico de uma arena pode simular diferentes condições sem estar conectado aos sensores nela instalados. Assim, alterações no estado da entidade física não se refletem automaticamente no modelo digital e vice-versa.

Uma sombra digital (*digital shadow*, em inglês) estabelece um primeiro nível de integração dinâmica entre a entidade física e sua representação digital: informações provenientes do sistema físico, tipicamente por meio de sensores, atualizam a representação digital, estabelecendo um fluxo automático no qual as alterações no estado físico são refletidas no domínio virtual. No exemplo do estádio inteligente, sensores de temperatura, câmeras, dispositivos de controle de acesso e medidores de consumo de energia poderiam alimentar uma representação que acompanha o estado atual do ambiente. Contudo, esse fluxo é unidirecional, pois a representação digital não tem capacidade de influenciar ou

alterar o estado da entidade correspondente.

Um gêmeo digital, em sua concepção mais completa, estabelece uma relação bidirecional entre os dois domínios. Dados do sistema físico atualizam a representação digital, enquanto análises, simulações, previsões ou decisões produzidas no domínio digital podem apoiar ou executar ações no sistema físico, por meio de atuadores, sistemas de controle ou recomendações operacionais. Portanto, um gêmeo digital é mais do que uma visualização ou ferramenta estática, constituindo-se em um sistema dinâmico que promove a integração efetiva entre os mundos real e virtual.

A distinção entre os conceitos de modelo, sombra e gêmeo digital também ajuda a evitar a interpretação de que qualquer modelo tridimensional conectado a sensores seria necessariamente um gêmeo digital. Uma representação 3D pode ser um componente importante do sistema, especialmente para fins de visualização espacial, mas o gêmeo digital depende de uma estrutura mais ampla, que inclui dados, modelos, relações, mecanismos de sincronização e, conforme o caso, análise e interação. No estádio inteligente, um modelo 3D com a geometria das arquibancadas e dos corredores é apenas uma representação virtual. Se esse modelo passar a receber continuamente informações sobre ocupação e temperatura, ele pode integrar uma sombra digital e, se o sistema utilizar essas informações para executar simulações de evacuação, prever condições ambientais e apoiar decisões operacionais, ele se aproxima das características de um gêmeo digital.

3.2.2. Paradigmas Habilitadores de Gêmeos Digitais

Gêmeos digitais reúnem ideias provenientes de paradigmas relacionados, embora com objetivos distintos. A Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*), a computação em nuvem e na borda, a modelagem e a simulação, a análise de dados e a IA contribuem para a construção de gêmeos digitais, mas nenhuma dessas tecnologias, isoladamente, os caracteriza. Na verdade, os gêmeos digitais resultam da integração complementar dessas capacidades em torno de uma representação digital associada a uma entidade ou a um processo do mundo real.

IoT. A IoT fornece uma das principais bases para conectar entidades do mundo físico ao domínio virtual. Sensores e dispositivos conectados coletam informações sobre temperatura, localização, vibração, consumo de energia, ocupação e outras propriedades, enquanto atuadores permitem materializar decisões em ações no mundo físico. No estádio inteligente, sensores podem monitorar as condições ambientais de cada setor, câmeras podem fornecer informações sobre a ocupação e a movimentação e sistemas de acesso podem registrar eventos de entrada e saída. Enquanto a IoT enfatiza tradicionalmente a conectividade dos dispositivos físicos, um gêmeo digital acrescenta uma camada de contexto, representação e relacionamento entre os elementos. Por exemplo, um sensor de temperatura isolado fornece uma leitura do ambiente, mas um gêmeo digital pode relacionar essa medição a um setor específico, ao histórico de medições, às condições de ocupação e aos modelos utilizados para prever o comportamento desse setor.

Computação em nuvem. A computação em nuvem (*cloud computing*, em inglês) oferece escalabilidade, poder computacional e capacidade de armazenamento para viabilizar o desenvolvimento e a operação de gêmeos digitais complexos e em larga escala. Essas

capacidades permitem concentrar informações históricas, executar análises mais avançadas e disponibilizar serviços a diferentes aplicações e usuários. No cenário do estádio inteligente, a nuvem pode armazenar históricos de ocupação, consumo de energia e condições ambientais, além de hospedar modelos analíticos e serviços Web utilizados por operadores e gestores.

Computação na borda. A computação na borda (*edge computing*, em inglês) desloca parte do processamento para locais próximos às fontes de dados, possibilitando sincronizar os mundos real e virtual com latência reduzida. Essa característica é especialmente relevante para dados multimídia, pois um conjunto de câmeras de alta resolução pode gerar um fluxo excessivo de dados para transmissão contínua a uma infraestrutura central na nuvem. Dessa forma, em vez de transmitir todo o vídeo, dispositivos de borda podem processá-lo localmente para extrair eventos ou características relevantes e enviar ao gêmeo digital apenas informações como ocupação estimada, objeto detectado ou evento anômalo. No estádio inteligente, esse processamento pode reduzir o consumo da largura de banda, a latência e os custos de armazenamento, além de permitir a tomada de decisões mesmo quando a conectividade com a nuvem estiver limitada. Assim, a infraestrutura de borda não deve ser entendida como substituta da infraestrutura de nuvem, mas como parte de uma arquitetura distribuída de processamento.

Modelagem e simulação. Modelos computacionais representam propriedades e comportamentos do sistema físico, enquanto a simulação os utiliza para explorar estados ou cenários que não necessariamente ocorrem no sistema real. Isso torna os gêmeos digitais particularmente úteis para a tomada de decisão, permitindo não apenas descrever o estado atual de uma entidade, mas também explorar o que aconteceria caso determinada condição fosse alterada. No estádio inteligente, seria possível estimar como a temperatura de um setor se comportaria diante de um aumento significativo na ocupação, simular estratégias de evacuação ou avaliar o impacto de alternativas de iluminação no consumo de energia. As simulações também permitem experimentar sem interferir diretamente no sistema físico, o que é particularmente relevante em sistemas críticos, nos quais testar certas condições diretamente poderia ser custoso ou causar prejuízos financeiros ou materiais. De todo modo, é importante destacar que gêmeos digitais podem incorporar capacidades de simulação, mas essa não é uma capacidade obrigatória de todo gêmeo digital [Wooley et al. 2023].

Análise de dados e IA. Técnicas de análise de dados e de IA extraem conhecimento a partir dos dados coletados, geram previsões e apoiam processos automatizados de tomada de decisão [Kreuzer et al. 2024]. Algoritmos de aprendizado de máquina (*machine learning*, em inglês) podem ser utilizados para classificação, detecção de anomalias, previsão de séries temporais e reconhecimento de padrões, enquanto técnicas de visão computacional extraem informações a partir de imagens e vídeos. No cenário de estádio inteligente, um sistema de visão computacional poderia estimar a ocupação de áreas, enquanto modelos de aprendizado de máquina poderiam prever a demanda energética ou detectar comportamentos anômalos. Esses resultados podem ser incorporados ao estado do gêmeo digital ou disponibilizados como serviços de análise.

3.2.3. O Papel de Tecnologias Multimídia e da Web em Gêmeos Digitais

A relação entre gêmeos digitais, tecnologias multimídia e a Web é particularmente relevante em três vertentes: **integração de dados multimodais**, **comunicação e interoperabilidade** e **visualização e interação**. Essas vertentes são discutidas a seguir.

Um gêmeo digital robusto geralmente não se limita à agregação de dados provenientes de sensores e à análise de séries temporais, mas sim frequentemente integra fluxos de vídeo e imagens de câmeras, sinais de áudio de microfones, trajetórias espaciais de dispositivos de localização e dados geoespaciais tridimensionais. Em um estádio inteligente, essas modalidades podem ser combinadas. Uma câmera detecta uma concentração anormal de pessoas em determinada área, sensores ambientais indicam um aumento de temperatura, o sistema de controle de acesso registra a entrada de muitas pessoas e um modelo 3D associa esses eventos à respectiva localização. Essa combinação permite ao gêmeo digital produzir uma representação contextualizada dificilmente obtida a partir de uma única modalidade. Por outro lado, surgem desafios adicionais, já que diferenças nas taxas de amostragem, latências, resoluções e características semânticas entre as modalidades podem causar dessincronização e inconsistências.

As arquiteturas e os protocolos da Web fornecem grande parte da infraestrutura de comunicação e de interoperabilidade entre os componentes de um gêmeo digital, frequentemente distribuídos. APIs baseadas no estilo arquitetural REST e protocolos de *streaming* de eventos, bem como mecanismos de publicação/assinatura, são amplamente empregados para transportar dados entre dispositivos de borda, plataformas de gêmeos digitais na nuvem e aplicações consumidoras. Além disso, padrões da Web Semântica, como ontologias e vocabulários RDF/JSON-LD, têm sido propostos para enriquecer semanticamente os modelos de informação de gêmeos digitais [Rico et al. 2023, Karabulut et al. 2024], favorecendo a interoperabilidade entre diferentes provedores de dados, serviços e sistemas.

Por fim, tecnologias de visualização e interação, em particular gráficos 3D acelerados por *hardware* acessíveis via navegador, padrões de realidade estendida para a Web e *frameworks* de visualização interativa de dados, constituem a principal interface por meio da qual os usuários podem explorar e interagir com um gêmeo digital. No estádio inteligente, um painel de controle acessível via navegador que exibe o modelo 3D do estádio e indicadores de ocupação atualizados em tempo real pode permitir que os operadores de segurança explorem interativamente os diferentes setores.

A Figura 3.3 ilustra uma arquitetura em camadas que reúne diferentes elementos relevantes à estruturação de gêmeos digitais. Nela, observa-se que as tecnologias de sistemas multimídia e Web se inserem mais diretamente em duas camadas: **comunicação**, responsável por transportar dados entre sensores, plataformas de gêmeos digitais e aplicações consumidoras; e **visualização e interação**, na qual *dashboards* Web e tecnologias de renderização 3D tornam o gêmeo digital acessível e explorável pelos usuários.

3.2.4. Linguagens e Padrões para Representação de Gêmeos Digitais

A construção de sistemas de gêmeos digitais requer mecanismos para descrever as entidades representadas, suas propriedades e as relações entre elas. Essa necessidade pode ser atendida por meio de linguagens de modelagem e padrões de representação, que esta-

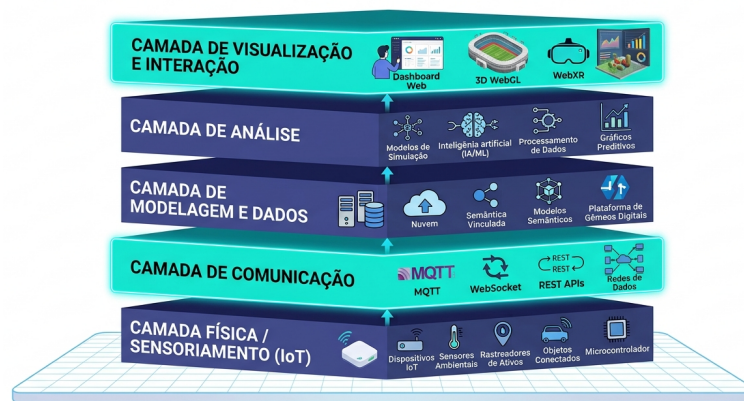


Figura 3.3. Arquitetura em camadas com os diferentes elementos relevantes à estruturação de gêmeos digitais

belecem estruturas e vocabulários comuns para descrever os elementos de um ambiente. Dentre eles, destacam-se a *Digital Twins Definition Language* (DTDL) e o *Asset Administration Shell* (AAS), descritos a seguir.

DTDL. Proposta pela Microsoft, a DTDL⁵ é uma linguagem aberta baseada em JSON-LD para descrever modelos e interfaces de gêmeos digitais em termos de propriedades, telemetria, componentes, comandos e relacionamentos. Na Azure Digital Twins, plataforma da Microsoft para gêmeos digitais que será brevemente introduzida na Seção 3.2.5, os modelos DTDL funcionam como esquemas para descrever os tipos de entidades de um ambiente e podem ser utilizados posteriormente para criar instâncias de gêmeos digitais, bem como relações entre elas.

O Código 3.1 ilustra um modelo simplificado, em DTDL, de um setor do estádio inteligente. As linhas 7 a 16 definem duas propriedades utilizadas para representar informações sobre o estado da entidade: *capacidade* representa a capacidade máxima da seção e *ocupacao* representa sua ocupação atual. As linhas 17 a 21 definem um relacionamento chamado *possuiSensor*, que indica que uma seção do estádio possui um sensor de temperatura instalado. Diferentemente de uma propriedade, que representa uma característica ou estado da entidade, um relacionamento representa uma conexão semântica com outra entidade. Neste exemplo, o atributo *target* (linha 20) restringe o relacionamento a entidades cujo modelo seja *SensorTemperatura*.

O Código 3.2 ilustra o modelo *SensorTemperatura* em DTDL, no qual a propriedade *temperatura*, definida nas linhas 7 a 11, representa a temperatura medida pelo sensor.

⁵ <https://github.com/Azure/opendigitaltwins-dtdl>

```

1 {
2   "@id": "dtmi:Estadio:Secao;1",
3   "@type": "Interface",
4   "@context": "dtmi:dtdl:context;3",
5   "displayName": "Seção do Estádio",
6   "contents": [
7     {
8       "@type": "Property",
9       "name": "capacidade",
10      "schema": "integer"
11    },
12    {
13      "@type": "Property",
14      "name": "ocupacao",
15      "schema": "integer"
16    },
17    {
18      "@type": "Relationship",
19      "name": "possuiSensor",
20      "target": "dtmi:stadium:SensorTemperatura;1"
21    }
22  ]
23 }

```

Código 3.1. Modelo DTDL de um setor do estádio inteligente

```

1 {
2   "@id": "dtmi:Estadio:SensorTemperatura;1",
3   "@type": "Interface",
4   "@context": "dtmi:dtdl:context;3",
5   "displayName": "Sensor de Temperatura",
6   "contents": [
7     {
8       "@type": "Property",
9       "name": "temperatura",
10      "schema": "double"
11    }
12  ]
13 }

```

Código 3.2. Modelo DTDL de um sensor de temperatura existente no estádio inteligente

A descrição de uma entidade em DTDL não representa apenas suas propriedades isoladamente, mas também suas relações com outras entidades. Com isso, obtém-se um grafo em que as entidades aparecem como elementos conectados por relações semanticamente significativas. Essa abordagem é importante porque raramente sistemas complexos podem ser adequadamente representados como coleções de atributos isolados. Por exemplo, o significado de um sensor pode depender de sua relação com determinado equipamento; o equipamento, de sua localização; a localização, de sua associação a um setor, a um edifício ou a uma infraestrutura maior.

AAS. No contexto da manufatura, o AAS (*Asset Administration Shell*) fornece uma representação digital padronizada de um ativo físico ou digital e uma estrutura comum para acessar suas informações e serviços, enfatizando a interoperabilidade entre aplicações e sistemas industriais. A abordagem do AAS, definida pelo padrão internacional IEC 63278-1:2023 [IEC 2023], envolve dois elementos fundamentais: (i) o ativo (*asset*), que corresponde à entidade física ou digital a ser representada; e (ii) o AAS, que constitui a representação digital associada a esse ativo e fornece interfaces de acesso às informações

e aos serviços correspondentes.

O AAS pode ainda conter ou referenciar diferentes submodelos, cada um dedicado a um aspecto específico do ativo [IDTA 2026]. Em vez de concentrar todos os aspectos de um ativo em uma única estrutura, o AAS pode organizar diferentes perspectivas ou conjuntos de informações em submodelos independentes, de modo que cada submodelo represente um aspecto específico do ativo, como identificação, características técnicas, estado operacional, manutenção ou serviços [Zhang et al. 2025]. Os submodelos podem ainda utilizar modelos de submodelo padronizados e referências a dicionários de conceitos e ontologias, contribuindo para a interoperabilidade semântica. Essa organização modular permite ampliar progressivamente a representação à medida que novos requisitos são incorporados.

Considerando novamente o estádio inteligente como ilustração, uma representação baseada em AAS de um sistema de climatização poderia organizar diferentes aspectos do equipamento em submodelos independentes (ver Figura 3.4). Um submodelo de identificação poderia conter informações relativamente estáticas, como fabricante e modelo, enquanto um submodelo de dados operacionais poderia apresentar valores atualizados de temperatura, umidade e estado de funcionamento. Por sua vez, um submodelo de manutenção poderia registrar informações sobre intervenções realizadas e programadas e um submodelo de controle poderia disponibilizar operações para interagir com o equipamento, como o ajuste da temperatura desejada. Assim, por exemplo, uma aplicação de monitoramento poderia utilizar principalmente o submodelo de dados operacionais, enquanto uma aplicação de manutenção utilizaria as informações correspondentes ao ciclo de vida do equipamento e uma aplicação de automação poderia utilizar os serviços disponibilizados pelo submodelo de controle. Dessa forma, os submodelos permitem que diferentes aplicações acessem os aspectos do ativo relevantes aos seus objetivos, sem exigir que todas utilizem a representação completa. Além disso, submodelos padronizados favorecem a interoperabilidade ao estabelecer estruturas e conceitos comuns para a representação de informações e de serviços.

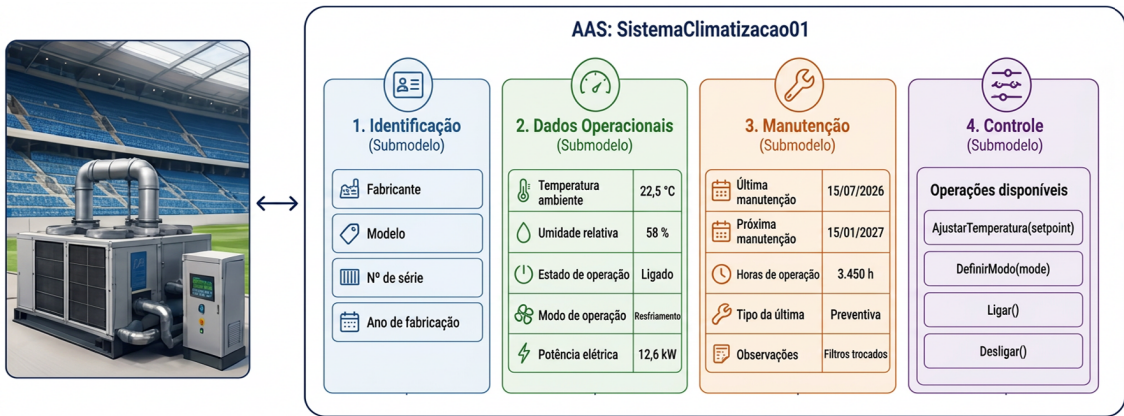


Figura 3.4. Representação conceitual de um AAS para um sistema de climatização de um estádio

O AAS define uma estrutura padronizada para a representação de ativos e seus aspectos, enquanto uma plataforma como o Eclipse BaSyx, que será descrita brevemente na

Seção 3.2.5, fornece mecanismos de infraestrutura para disponibilizar registros de AAS, hospedar e localizar submodelos, integrar dados e conectar as representações digitais aos sistemas físicos. Dessa forma, o AAS não deve ser confundido com uma plataforma de execução: ele define a estrutura e as interfaces da representação, enquanto componentes de infraestrutura, como os fornecidos pelo Eclipse BaSyx, podem implementá-la e conectá-la aos sistemas e aos dados do ambiente físico.

3.2.5. *Middleware* para a Construção e Operação de Gêmeos Digitais

Para concretizar o grande potencial dos gêmeos digitais, o seu desenvolvimento envolve diversos requisitos e desafios, incluindo a modelagem das entidades físicas, a integração de fontes de dados heterogêneas, a atualização contínua das representações digitais e a disponibilização de serviços de consulta, análise e interação.

Para atender a esses requisitos, plataformas de *middleware* têm sido propostas tanto pela academia quanto pela indústria para apoiar o desenvolvimento, a implantação e a operação de gêmeos digitais. Embora plataformas de *middleware* originalmente concebidas para domínios como a IoT [Razzaque et al. 2016, Toutsop et al. 2021] possam oferecer funcionalidades úteis nesse contexto, elas não necessariamente atendem a todos os requisitos de um sistema de gêmeo digital. Enquanto um *middleware* para IoT concentra-se, em geral, na conectividade de dispositivos, no transporte de dados e na abstração da heterogeneidade de *hardware* e de protocolos, um *middleware* para gêmeos digitais também precisa oferecer mecanismos para representar entidades e seus relacionamentos, gerenciar seu estado e integrar continuamente dados provenientes do ambiente físico [Almeida et al. 2026]. Além de apoiar a modelagem, integração e sincronização dos gêmeos digitais, essas plataformas também precisam fornecer mecanismos relacionados às vertentes discutidas na Seção 3.2.3, constituindo uma infraestrutura que articula os componentes do gêmeo digital e as tecnologias utilizadas para representar, comunicar e explorar suas informações.

Esta seção apresenta brevemente quatro plataformas utilizadas na construção de gêmeos digitais: *Azure Digital Twins* e *AWS IoT TwinMaker*, ambas soluções comerciais baseadas na nuvem, e *Eclipse BaSyx* e *Eclipse Ditto*, que são soluções de código aberto. Além dessas soluções, a literatura acadêmica apresenta algumas propostas de *middleware* para gêmeos digitais [Almeida et al. 2023, Almeida et al. 2026]. Todavia, de maneira geral, essas propostas tendem a concentrar-se em aspectos específicos, como comunicação, interoperabilidade industrial ou sincronização, enquanto as plataformas consideradas nesta seção oferecem conjuntos mais integrados de mecanismos para modelagem, integração e operação de gêmeos digitais.

Azure Digital Twins. O *Azure Digital Twins*⁶ é uma plataforma em nuvem integrada ao ecossistema Azure, da Microsoft, que permite a criação de grafos de entidades de gêmeos digitais modeladas em DTDL, apresentada na Seção 3.2.4, e suas instâncias podem ser conectadas por relacionamentos que representam a estrutura do ambiente. A plataforma também oferece APIs para criação e gerenciamento de instâncias, consulta do grafo e integração com outros serviços.

⁶ <https://azure.microsoft.com/en-us/products/digital-twins>

Uma vez materializadas na plataforma, as instâncias de entidades de gêmeos digitais podem ser atualizadas a partir de diferentes fontes de dados. Em arquiteturas baseadas no ecossistema Azure, o *Azure IoT Hub*⁷ pode ser utilizado para conectar dispositivos e receber seus dados, que posteriormente são encaminhados ao Azure Digital Twins por mecanismos de integração apropriados. A plataforma também permite integrar dados provenientes de sistemas corporativos e de outras fontes por meio de APIs e de seu sistema de eventos. Dessa forma, o Azure Digital Twins funciona como uma camada de representação e contextualização dos dados, enquanto os serviços responsáveis pela aquisição e pelo processamento dos dados podem permanecer separados do grafo de gêmeos digitais.

A plataforma também oferece uma API de consulta que permite recuperar informações do ambiente de execução com base em propriedades, relacionamentos, propriedades de relacionamentos e modelos. Para visualização, o *Azure Digital Twins 3D Scenes Studio*⁸ permite associar elementos de um modelo tridimensional às entidades do grafo e criar interfaces para monitorização e investigação de dados operacionais. As informações do grafo também podem ser integradas a outros serviços do Azure para armazenamento de histórico, análise e aplicações baseadas em IA.

A Figura 3.5 ilustra como o Azure Digital Twins poderia ser empregado no cenário do estádio inteligente. Cada setor poderia ser modelado como uma entidade (ver Código 3.1) enquanto sensores de temperatura, sistemas de controle de acesso, equipamentos de climatização e outros elementos seriam representados por tipos específicos definidos em DTDL. Os relacionamentos poderiam, por exemplo, indicar que um setor possui um determinado sensor ou que um equipamento de climatização atende a uma área específica, e os dados provenientes de sensores poderiam chegar por meio do Azure IoT Hub ou de outras fontes, atualizando as propriedades correspondentes das instâncias no grafo. Adicionalmente, o Azure Digital Twins 3D Scenes Studio poderia então associar o modelo tridimensional do estádio às entidades do grafo, permitindo selecionar visualmente um setor e consultar sua ocupação, temperatura ou outros indicadores operacionais.

AWS IoT TwinMaker. O *AWS IoT TwinMaker*⁹ é um serviço da Amazon Web Services (AWS) voltado à construção de gêmeos digitais operacionais de sistemas físicos e digitais. A plataforma permite modelar dispositivos, equipamentos, espaços e processos como entidades, às quais são associados componentes que organizam propriedades e referências a fontes de dados. Os dados podem permanecer em diferentes sistemas e ser acessados por meio de conectores, o que permite integrar informações provenientes de sensores, câmeras e aplicações empresariais sem necessariamente transferi-las para um único repositório. As entidades e seus componentes são organizados em *workspaces*, que constituem o contexto de um sistema de gêmeo digital. Ademais, relacionamentos entre entidades podem ser representados por propriedades específicas e utilizados para construir um grafo de conhecimento no qual consultas podem ser realizadas. A plataforma oferece ainda uma API unificada para acesso aos dados conectados e mecanismos para integrar os resultados às aplicações que consomem o gêmeo digital.

A visualização constitui outro aspecto central da plataforma. O AWS IoT Twin-

⁷ <https://azure.microsoft.com/en-us/products/iot-hub>

⁸ <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/digital-twins/quickstart-3d-scenes-studio>

⁹ <https://aws.amazon.com/iot-twinmaker/>



Figura 3.5. Exemplo de utilização do Azure Digital Twins no cenário do estádio inteligente

Maker permite construir cenas tridimensionais em que modelos 3D são associados às respectivas entidades, possibilitando a apresentação de dados operacionais no contexto espacial do ambiente. Essas cenas podem ser utilizadas em aplicações Web, inclusive com componentes fornecidos pelo *AWS IoT AppKit*¹⁰, e integradas a ferramentas de monitoramento e visualização, como o *Amazon Managed Grafana*¹¹.

A Figura 3.6 ilustra como o AWS IoT TwinMaker poderia ser empregado no cenário do estádio inteligente. Um *workspace* poderia representar todo o ambiente, com entidades correspondentes a setores, portões, sensores, câmeras e sistemas de climatização. Componentes poderiam associar, por exemplo, uma entidade referente a um setor do estádio aos dados de ocupação provenientes de um sistema de monitoramento e aos dados de temperatura armazenados em uma fonte de séries temporais, enquanto as relações entre setores, sensores e equipamentos comporiam o grafo de conhecimento do estádio. Por sua vez, uma cena 3D poderia representar espacialmente os setores e equipamentos, associando cada elemento do modelo tridimensional à entidade correspondente e permitindo que os operadores visualizem os dados operacionais diretamente sobre a representação do estádio.

Eclipse BaSyx. Entre as soluções de código aberto, o *Eclipse BaSyx*¹² constitui uma infraestrutura particularmente relevante para ambientes industriais [Kannoth et al. 2021] e para a implementação de gêmeos digitais baseados no AAS, apresentada na Seção 3.2.4. Originalmente desenvolvido no contexto de um projeto liderado pelo Fraunhofer IESE, na Alemanha, e atualmente mantido pela Eclipse Foundation, o Eclipse BaSyx oferece componentes para hospedar AAS e submodelos, realizar seu registro e sua descoberta,

¹⁰ <https://aws.amazon.com/blogs/iot/build-iot-applications-using-aws-iot-application-kit/>

¹¹ <https://aws.amazon.com/grafana/>

¹² <https://basyx.org/>

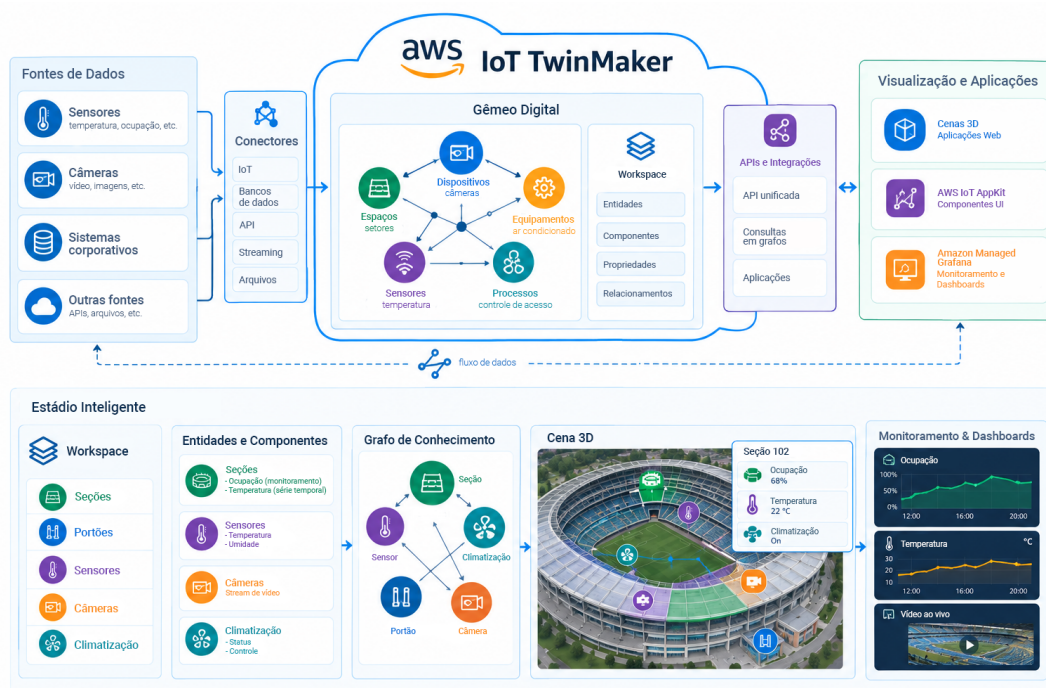


Figura 3.6. Exemplo de utilização do AWS IoT TwinMaker no cenário do estádio inteligente

integrar dados provenientes de ativos físicos e disponibilizar informações e serviços para aplicações. A plataforma também oferece mecanismos de integração com tecnologias industriais e de IoT, incluindo OPC UA, MQTT e HTTP/REST.

A Figura 3.7 apresenta uma visão geral simplificada da arquitetura do Eclipse BaSyx, destacando os componentes responsáveis pela hospedagem de AAS, submodelos, registro, descoberta, integração com ativos físicos e disponibilização de dados às aplicações. Os elementos centrais da arquitetura, agregados no *AAS Environment*, incluem: o *AAS Repository*, que gerencia o ciclo de vida das entidades, armazenando a estrutura do AAS e permitindo operações de criação, leitura, atualização e remoção sobre o cabeçalho e os metadados do gêmeo digital; o *Submodel Repository*, responsável pelo armazenamento efetivo dos dados técnicos e operacionais, gerenciando os submodelos e seus elementos internos e atuando como o banco de dados onde as propriedades estáticas e dinâmicas do ativo residem; e o *ConceptDescription Repository*, que gerencia os dicionários semânticos locais, armazenando as definições que atribuem significado às propriedades e permitindo que sistemas clientes consultem o significado exato de cada dado armazenado. Além desses elementos, a plataforma permite conectar ativos reais ou simulados a submodelos dinâmicos e suporta diferentes protocolos de comunicação e oferece integrações para análise e visualização de dados, permitindo que aplicações externas consumam as informações disponibilizadas pelos AAS.

No cenário do estádio inteligente, cada equipamento ou sistema relevante poderia ser representado por um AAS. A título de exemplo, um sistema de climatização poderia possuir submodelos para identificação, dados operacionais, manutenção e controle, como ilustrado anteriormente na Figura 3.4. Por sua vez, sensores de temperatura e umidade seriam integrados aos submodelos dinâmicos, enquanto os sistemas de controle poderiam

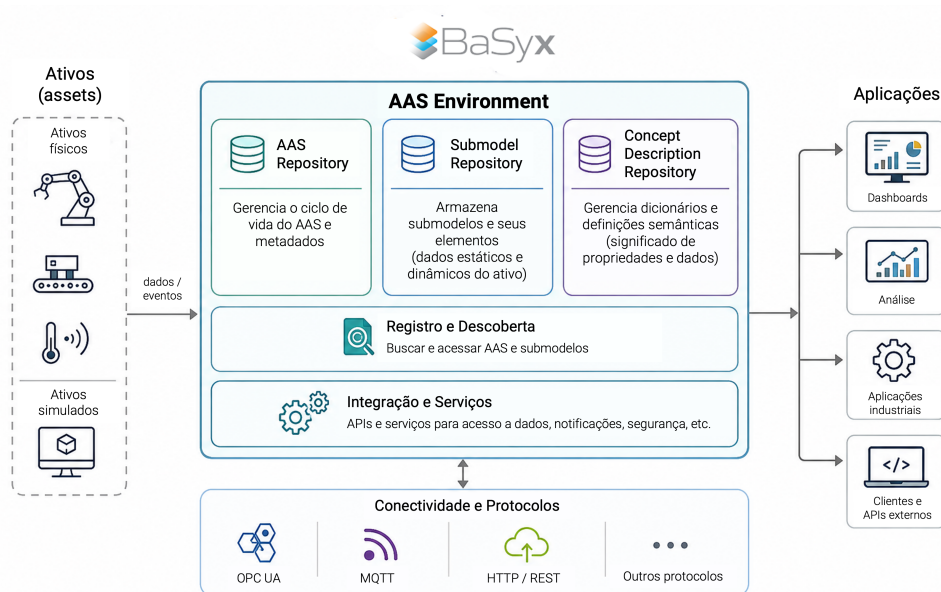


Figura 3.7. Visão geral do Eclipse BaSyx

ser associados a operações disponibilizadas pelos submodelos correspondentes. Setores do estádio também poderiam ser representados por AAS e relacionados aos equipamentos que os atendem, permitindo construir uma estrutura hierárquica na qual as informações de diferentes equipamentos são agregadas para representar o estado de uma área do estádio. Assim, aplicação de monitoramento poderiam consumir esses submodelos, enquanto aplicações de manutenção ou automação utilizariam, respectivamente, informações de ciclo de vida e serviços de controle.

Eclipse Ditto. O *Eclipse Ditto*¹³ é uma plataforma de código aberto voltada à implementação de gêmeos digitais em ambientes IoT [Kherbache et al. 2022]. Seu elemento central é a *Thing*, que representa digitalmente um dispositivo ou um ativo físico e pode conter propriedades e características (*features*) que descrevem diferentes aspectos desse ativo. Como principais funcionalidades, a plataforma fornece mecanismos de persistência e de gerenciamento do estado das *Things*, controle de acesso, busca e integração com sistemas externos.

A arquitetura do Eclipse Ditto, apresentada na Figura 3.8, é composta por cinco microsserviços especializados: *Policies* gerencia as políticas de autorização; *Things* gerencia as representações digitais e suas respectivas características; *Things-Search* mantém índices para busca; *Gateway* disponibiliza interfaces de acesso, incluindo HTTP e WebSocket; e *Connectivity* integra a plataforma a sistemas e brokers externos. Esses serviços operam de forma distribuída e permitem que a plataforma seja implantada em diferentes ambientes de infraestrutura.

A comunicação com as *Things* utiliza o *Ditto Protocol*¹⁴, uma especificação baseada em JSON que define a semântica de comandos, eventos e mensagens independentemente do protocolo de transporte. O Ditto Protocol adota dois canais principais de comu-

¹³ <https://github.com/eclipse-ditto/ditto>

¹⁴ <https://eclipse.dev/ditto/protocol-overview.html>



Figura 3.8. Serviços do Eclipse Ditto

nicação: o canal *Twin* permite consultar e atualizar o estado persistido da representação digital, enquanto o canal *Live* encaminha mensagens diretamente ao dispositivo ou ao gateway conectado, possibilitando a execução de comandos e a recepção de respostas em tempo real. Essa separação permite tratar, de maneira distinta, o estado persistido do gêmeo e a comunicação direta com o ativo físico, ao mesmo tempo em que o protocolo garante que o modelo digital preserve estados históricos e responda de forma imediata a interações, assegurando consistência, rastreabilidade e flexibilidade operacional.

No cenário do estádio inteligente, cada sensor, equipamento ou sistema poderia ser representado no Eclipse Ditto como uma *Thing*. Um sensor de temperatura poderia possuir uma propriedade *temperatura*, enquanto um sistema de climatização poderia apresentar características correspondentes ao estado operacional e às funções de controle. Já o serviço *Connectivity* poderia integrar as *Things* aos sensores e equipamentos por meio do protocolo MQTT ou de outros protocolos suportados, atualizando o estado persistido no canal *Twin*. Quando uma ação precisasse ser executada diretamente no equipamento, como alterar a temperatura de referência de um sistema de climatização, uma aplicação poderia utilizar o canal *Live* para encaminhar o comando ao dispositivo. O serviço *Things-Search* permitiria localizar equipamentos com base em propriedades ou metadados, enquanto o serviço *Gateway* disponibilizaria essas informações às aplicações de monitoramento e de operação.

Comparativo. A Tabela 3.1 apresenta um comparativo entre as quatro plataformas, considerando os principais aspectos relevantes para sua utilização na construção e operação de gêmeos digitais. Embora todas ofereçam mecanismos para representar entidades, integrar dados e disponibilizar o estado dos gêmeos digitais às aplicações, elas adotam abordagens distintas quanto à modelagem, conectividade, gerenciamento de estado, visualização e implantação. Em conjunto, essas capacidades mostram como um *middleware* pode articular os mecanismos de comunicação e interoperabilidade, a integração de dados e os recursos de visualização e interação discutidos na Seção 3.2.3, fornecendo a infraestrutura necessária para incorporar essas tecnologias aos gêmeos digitais.

Tabela 3.1. Comparativo de plataformas de *middleware* para construção e operação de gêmeos digitais

Aspecto	Azure Digital Twins	AWS IoT TwinMaker	Eclipse BaSyx	Eclipse Ditto
Modelo de representação	Modelos DTDL e grafo de gêmeos digitais	Entidades, componentes e grafo de conhecimento	AAS e submodelos	<i>Things</i> , propriedades e características
Principal contexto de uso	Ambientes e sistemas conectados	Gêmeos operacionais de ambientes físicos e digitais	Ambientes industriais e Indústria 4.0	IoT e gerenciamento de gêmeos de dispositivos/ativos
Representação de relações	Relacionamentos explícitos no grafo de gêmeos digitais	Relações entre entidades e componentes	Referências e estrutura de AAS e de submodelos	Relações podem ser modeladas por propriedades/metadados e integradas externamente
Integração de dados	APIs, sistema de eventos e integração com serviços Azure	Conectores e API unificada para fontes de dados	<i>Data Bridge</i> , APIs e protocolos industriais/IoT	Serviço <i>Connectivity</i> e <i>Ditto Protocol</i>
Protocolos e tecnologias de integração	APIs REST, eventos, <i>Azure IoT Hub</i> e serviços Azure	Conectores AWS e conectores personalizados	HTTP/REST, MQTT, OPC UA, entre outros	MQTT, AMQP, HTTP, Apache Kafka, entre outros
Gerenciamento de estado	Estado das instâncias no grafo de gêmeos digitais	Dados associados às entidades e componentes	Submodelos estáticos e dinâmicos	Estado persistido (canal <i>Twin</i>) e comunicação direta (canal <i>Live</i>)
Consultas e descoberta	API de consulta do grafo de gêmeos digitais	Grafo de conhecimento e consultas sobre entidades e relações	Registro e descoberta de AAS/submodelos	Serviço <i>Things-Search</i>
Visualização	Azure 3D Scenes Studio e aplicações personalizadas	Cenas 3D, <i>AWS IoT AppKit</i> e integrações de visualização	Integrações para dashboards e aplicações externas	Interfaces Web e aplicações externas
Controle/ações	Integração com serviços e sistemas externos	Integração com fontes e serviços AWS	Operações em submodelos e componentes de controle	Canal <i>Live</i> e comandos ao dispositivo
Implantação	Serviço gerenciado em nuvem (Azure)	Serviço gerenciado em nuvem (AWS)	Código aberto, implantável em infraestrutura própria	Código aberto, implantável em infraestrutura própria ou na nuvem
Padrão/tecnologia central	DTDL	Modelo proprietário de entidades e componentes	AAS	<i>Ditto Protocol</i>
Principal diferencial	Grafo semântico do ambiente integrado ao ecossistema Azure e visualização 3D	Integração de fontes heterogêneas e visualização operacional	Adoção do padrão AAS e arquitetura modular para ambientes industriais	Gerenciamento de estado, conectividade e interação com dispositivos

3.3. Aplicações de Gêmeos Digitais

Nos últimos anos, o conceito de gêmeos digitais tem sido explorado em uma ampla variedade de domínios de aplicação, o que se reflete no crescimento significativo da produção científica sobre o tema [Tao et al. 2019, Fuller et al. 2020, Sharma et al. 2022]. Embora os princípios fundamentais permaneçam semelhantes (representação digital, conexão com uma contraparte do mundo real, aquisição e integração de dados e utilização de modelos e serviços para análise ou tomada de decisão), os requisitos variam consideravelmente entre os domínios. Em alguns casos, o principal objetivo é monitorar o estado de um ativo; em outros, prever falhas, otimizar operações, testar cenários ou apoiar decisões humanas.

Essa diversidade também demonstra que não há um único tipo de gêmeo digital. Um gêmeo digital de uma máquina industrial pode operar com dados de sensores de alta frequência e modelos físicos específicos, enquanto um gêmeo digital em um ambiente urbano pode integrar informações geoespaciais, meteorológicas, ambientais, de mobilidade e de infraestrutura provenientes de milhares de fontes. Da mesma forma, um gêmeo digital aplicado à saúde pode combinar dados clínicos, sinais fisiológicos e imagens médicas, introduzindo requisitos de segurança, privacidade e governança significativamente diferentes dos observados em aplicações industriais.

Esta seção apresenta seis domínios em que os gêmeos digitais têm sido empregados (ver Figura 3.9), destacando como diferentes combinações de sensoriamento, dados, modelos, simulação, IA, tecnologias Web e recursos multimídia podem responder a problemas específicos. Embora as tecnologias habilitadoras variem conforme o contexto, observa-se uma estrutura conceitual recorrente, baseada na aquisição e integração de dados, na modelagem do sistema, na análise e simulação e na disponibilização de resultados para monitoramento, visualização, interação ou tomada de decisão. Todavia, a forma como esses elementos são combinados depende da finalidade e das características do sistema representado.



Figura 3.9. Alguns domínios de aplicação que utilizam gêmeos digitais

3.3.1. Manufatura

A manufatura é um dos domínios mais associados aos gêmeos digitais e permanece entre os principais ambientes de pesquisa e aplicação do paradigma [Kritzinger et al. 2018],

inclusive com esforços específicos de padronização, como a série ISO 23247 [ISO 2021]. Nesse contexto, o conceito de gêmeos digitais está estreitamente relacionado à transformação digital promovida pela Indústria 4.0 [Lu et al. 2020], na qual máquinas, produtos, processos e sistemas produtivos passam a ser conectados e representados digitalmente. Dessa forma, um gêmeo digital pode representar uma máquina individual, uma linha de produção, um produto ou uma fábrica inteira. Adicionalmente, sensores instalados nos equipamentos fornecem informações sobre temperatura, vibração, pressão, velocidade, consumo de energia e outras variáveis operacionais, que podem alimentar modelos capazes de monitorar o estado dos equipamentos e identificar alterações indicativas de degradação ou falha.

Um dos usos mais conhecidos de gêmeos digitais na manufatura é a manutenção preditiva. Em vez de realizar intervenções exclusivamente em intervalos predeterminados, o sistema pode estimar a condição do equipamento e apoiar a previsão de falhas. Para isso, o gêmeo digital pode combinar dados históricos e em tempo real com modelos de degradação e técnicas de análise, auxiliando na determinação do momento mais apropriado para a intervenção [Errandonea et al. 2020].

Outra aplicação envolve a otimização de processos produtivos, na qual um modelo digital da linha de produção pode ser utilizado para simular diferentes configurações antes de sua implementação física. É possível, por exemplo, investigar o efeito da alteração da velocidade de uma máquina, da reorganização de uma linha ou da introdução de um novo equipamento. A simulação permite experimentar virtualmente diferentes alternativas, o que é particularmente relevante quando as alterações físicas são caras, arriscadas ou provocam interrupções na produção [Lu et al. 2020].

O conceito também pode ser aplicado ao próprio produto. Um produto fabricado pode possuir uma representação digital associada ao seu ciclo de vida, contendo informações sobre projeto, fabricação, utilização e manutenção. Essa representação permite preservar a continuidade das informações entre diferentes etapas, aproximando engenharia, produção e operação. Nesse contexto, mecanismos de identificação, interoperabilidade e troca de informações tornam-se importantes para manter a correspondência entre o produto físico e sua representação digital ao longo de todo o ciclo de vida.

3.3.2. Saúde

A área de saúde apresenta possibilidades particularmente promissoras para a utilização de gêmeos digitais, mas também desafios significativamente maiores em razão da complexidade dos sistemas biológicos e da sensibilidade dos dados envolvidos. Recentes revisões da literatura identificam aplicações relacionadas tanto ao acompanhamento e à personalização do cuidado quanto à gestão de operações em instituições de saúde [Sun et al. 2023, Katsoulakis et al. 2024].

Um dos cenários discutidos na literatura é o desenvolvimento de representações digitais de pacientes. A ideia consiste em integrar informações dos indivíduos, como dados clínicos, exames, sinais fisiológicos, histórico de tratamentos e dados provenientes de dispositivos de monitoramento, a modelos capazes de representar ou prever determinados aspectos da condição do paciente. Por exemplo, dados coletados por dispositivos vestíveis poderiam ser combinados com informações clínicas e modelos preditivos para identificar

alterações relevantes e apoiar o acompanhamento do paciente.

Outro caso de aplicação de gêmeos digitais envolve o planejamento e a personalização de tratamentos. Modelos computacionais podem ser utilizados para simular diferentes alternativas terapêuticas e comparar possíveis respostas antes da aplicação de determinada intervenção. Ademais, dados provenientes de exames de imagem também podem contribuir para a construção de representações individualizadas de estruturas anatômicas e apoiar análises específicas. Nesse contexto, o gêmeo digital não tem necessariamente o propósito de reproduzir integralmente o paciente, mas de fornecer uma representação adequada à finalidade clínica ou operacional considerada, sendo, assim, uma questão diretamente relacionada ao nível de fidelidade necessário ao gêmeo digital. Em sistemas de saúde, reproduzir integralmente um organismo seria impraticável e, em muitos casos, desnecessário. Por essa razão, o nível de detalhe deve ser determinado pela finalidade do gêmeo digital e pelas características a serem observadas, modeladas ou previstas. Assim, diferentes aplicações podem demandar diferentes níveis de abstração, de acordo com as variáveis relevantes para diagnóstico, tratamento, monitoramento ou gestão.

Finalmente, privacidade, segurança, governança, viés e aspectos éticos tornam-se centrais nesse domínio. Dados de saúde podem ser altamente sensíveis, e erros de modelagem ou previsões incorretas podem ter consequências significativamente diferentes das observadas em aplicações como a manutenção de equipamentos. Esses requisitos condicionam não apenas os dados utilizados, mas também a forma de construção, validação e utilização dos gêmeos digitais na saúde.

3.3.3. Transporte

Sistemas de transporte constituem outro domínio no qual gêmeos digitais podem representar simultaneamente ativos físicos, infraestrutura, fluxos e processos. Um gêmeo digital pode representar um veículo individual, uma ferrovia, uma rodovia, um aeroporto, um porto ou uma rede de transporte. Sensores instalados em veículos e na infraestrutura podem fornecer informações sobre localização, velocidade, condições mecânicas, tráfego e condições ambientais, e dados históricos e em tempo real podem ser utilizados para identificar anomalias, prever necessidades de manutenção e avaliar diferentes estratégias de operação [Gao et al. 2021, Wu et al. 2025].

Em rodovias urbanas, por exemplo, um gêmeo digital pode representar não apenas a infraestrutura física, mas também o fluxo de veículos. Dados provenientes de câmeras, sensores, veículos conectados e sistemas de posicionamento podem ser combinados para estimar as condições de tráfego, enquanto modelos de simulação podem avaliar o impacto de alterações na sinalização ou nas condições de circulação [Kušić et al. 2023]. Nesse cenário, as tecnologias multimídia discutidas na Seção 3.2.3 assumem particular relevância: câmeras de trânsito fornecem informações visuais sobre congestionamentos, acidentes e comportamento dos veículos; sistemas de informação geográfica fornecem representações espaciais; e modelos tridimensionais podem representar pontes, túneis, estações e outros elementos da infraestrutura.

Uma característica importante do domínio de transporte é que o sistema representado não é necessariamente um objeto isolado, mas um sistema dinâmico no qual múltiplas entidades interagem. Dessa forma, o gêmeo digital pode integrar dados espaciais,

temporais e multimodais para apoiar o monitoramento e a operação do sistema. Essa característica aproxima os gêmeos digitais de sistemas de transporte inteligentes, nos quais comunicação, computação de borda, fusão de dados, IA e tecnologias de visualização podem atuar de forma conjunta.

3.3.4. Cidades Inteligentes

A aplicação de gêmeos digitais em cidades inteligentes amplia ainda mais a escala e a heterogeneidade dos desafios relacionados ao seu desenvolvimento, implantação e operação. Em vez de representar uma máquina, um edifício ou uma linha de produção, um gêmeo digital pode representar bairros, sistemas de transporte, redes de energia, edifícios, espaços públicos, infraestrutura e serviços, dando origem ao conceito de “gêmeos digitais urbanos” [Ferré-Bigorra et al. 2022, Weil et al. 2023]. Nesse contexto, diferentes fontes podem fornecer dados sobre mobilidade, consumo de energia, iluminação pública, gerenciamento de resíduos, redes de água, condições meteorológicas e qualidade ambiental.

Um exemplo de aplicação de gêmeos digitais urbanos refere-se ao planejamento urbano [Deng et al. 2021]. Modelos digitais podem representar edifícios e infraestrutura existentes e permitir a simulação de diferentes intervenções. Por exemplo, pode-se investigar o impacto da construção de um novo edifício na circulação, na iluminação natural, no consumo de energia ou em determinadas condições ambientais. Outra possibilidade envolve o monitoramento ambiental, no qual sensores distribuídos pela cidade fornecem dados sobre temperatura, umidade, qualidade do ar, ruído e outros indicadores. Esses dados podem ser associados espacialmente às representações digitais dos bairros e utilizados para identificar padrões ou áreas críticas.

No contexto de cidades inteligentes, tecnologias Web e multimídia podem desempenhar um papel relevante na integração e na exploração dessas informações. Dados geoespaciais, imagens, modelos tridimensionais, mapas interativos e diferentes fontes de sensoramento podem ser combinados para produzir representações contextualizadas dos ambientes urbanos. Por sua vez, as interfaces Web e os recursos de visualização interativa podem permitir que diferentes usuários explorem o estado da cidade e os resultados das simulações. Essa combinação reforça a relação entre gêmeos digitais urbanos e as tecnologias de visualização e interação discutidas na Seção 3.2.3.

A escala e a complexidade do cenário urbano, contudo, introduzem um desafio fundamental para a construção de gêmeos digitais: determinar quais aspectos da cidade devem ser representados e com que nível de detalhe. Uma representação digital não precisa reproduzir todos os elementos e características do ambiente urbano, mas deve contemplar aqueles que são relevantes para a finalidade a que se destina. Por exemplo, um gêmeo digital voltado ao planejamento energético pode priorizar informações sobre edificações, consumo e geração de energia, enquanto um gêmeo destinado à análise de mobilidade pode enfatizar vias, veículos, transporte público e padrões de deslocamento. Assim, diferentes aplicações podem demandar diferentes níveis de abstração e conjuntos de informações, mesmo quando o objeto representado é o mesmo. Essa característica reforça a ideia de que um gêmeo digital é construído de acordo com uma finalidade específica, e que sua utilidade depende não da reprodução integral do sistema real, mas da representação dos aspectos relevantes para o contexto de uso, mesmo quando representa um sistema

de grande escala, como é o caso de uma cidade.

3.3.5. Energia

O setor de energia apresenta aplicações de gêmeos digitais na geração, transmissão, distribuição, armazenamento e consumo [Ghenai et al. 2022, do Amaral et al. 2023]. Usinas de geração de energia podem possuir representações digitais de turbinas, geradores e demais equipamentos, enquanto sensores fornecem informações sobre temperatura, pressão, vibração, velocidade e eficiência. Por sua vez, modelos físicos e estatísticos podem ser utilizados para monitorar a condição dos equipamentos, detectar anomalias e prever falhas. Em parques eólicos, por exemplo, um gêmeo digital pode integrar informações sobre turbinas, condições meteorológicas e produção de energia, permitindo estimar o desempenho esperado e identificar desvios em relação ao comportamento normal.

Na transmissão e na distribuição de energia, a escala do problema aumenta, uma vez que as redes elétricas são compostas por múltiplos equipamentos interdependentes. Como alterações em uma parte da rede podem afetar outras regiões, é importante utilizar modelos que representem não apenas ativos individuais, mas também suas interações. Um gêmeo digital pode, assim, integrar dados operacionais e modelos de rede para avaliar diferentes condições, identificar anomalias e apoiar decisões relacionadas à operação e ao planejamento [Heluany and Gkioulos 2023].

Gêmeos digitais também podem ser utilizados no gerenciamento de edificações e do consumo de energia [Cespedes-Cubides and Jradi 2024]. Um edifício pode possuir uma representação digital dos sistemas de iluminação, climatização, geração distribuída e armazenamento, enquanto dados de ocupação e condições ambientais são combinados com modelos energéticos para avaliar e otimizar o consumo de energia. Nesse contexto, recursos de visualização podem permitir o acompanhamento do desempenho energético e a exploração de diferentes cenários de operação, aproximando os gêmeos digitais das tecnologias de visualização interativa discutidas anteriormente.

3.3.6. Agricultura

Na agricultura, os gêmeos digitais podem representar propriedades agrícolas, áreas cultivadas, culturas, equipamentos e condições ambientais [Pylianidis et al. 2021, Wang 2024]. Sensores instalados no solo podem medir umidade, temperatura e características físico-químicas, como também estações meteorológicas fornecem informações sobre precipitação, radiação e temperatura. Por sua vez, drones e satélites produzem imagens que podem ser analisadas para identificar estresse hídrico, doenças ou diferenças no desenvolvimento das plantas. Dessa forma, a natureza multimodal dos dados é evidente: informações numéricas produzidas por sensores podem ser combinadas com imagens aéreas e dados geoespaciais, enquanto algoritmos de visão computacional e modelos agrônômicos podem apoiar o monitoramento e a previsão de variáveis de interesse.

A título de exemplo, um gêmeo digital de uma área cultivada poderia manter uma representação espacial das diferentes regiões da propriedade e associar a cada uma delas informações sobre o solo, a umidade, a cultura e o histórico de produção. Com isso, modelos poderiam simular diferentes estratégias de irrigação ou de fertilização, permitindo avaliar alternativas antes de sua implementação física. Observam-se, nesse contexto, apli-

cações principalmente relacionadas ao monitoramento de culturas, manejo do solo, irrigação e máquinas agrícolas [Purcell and Neubauer 2023].

A utilização de tecnologias de borda também pode ser importante nesse domínio, especialmente em áreas rurais com conectividade limitada. Parte do processamento pode ocorrer próxima aos sensores ou equipamentos, reduzindo a necessidade de transmitir continuamente grandes volumes de dados para a nuvem, enquanto informações consolidadas podem ser sincronizadas posteriormente com serviços remotos. Essa combinação entre sensoriamento distribuído, processamento de dados, conectividade e modelos digitais demonstra como diferentes tecnologias habilitadoras podem ser integradas de acordo com as características do domínio e os requisitos da aplicação.

3.4. Desafios em Gêmeos Digitais

A diversidade de tecnologias, arquiteturas e aplicações discutida nas seções anteriores demonstra que os gêmeos digitais já ultrapassaram a condição de conceito experimental e constituem uma área de investigação e desenvolvimento com aplicações em diferentes domínios. Entretanto, a construção de um gêmeo digital útil, confiável e interoperável permanece um problema científico e tecnológico complexo [Sharma et al. 2022]. A dificuldade não decorre apenas da integração de sensores, redes e modelos, mas também da necessidade de manter, ao longo do tempo, uma relação consistente entre o sistema físico, sua representação digital, os dados, os modelos, as pessoas e os processos organizacionais.

Esses desafios tornam-se particularmente relevantes quando os gêmeos digitais incorporam tecnologias multimídia e da Web. Dados provenientes de vídeo, áudio, imagens, modelos tridimensionais, sensores e fontes geoespaciais apresentam características temporais, espaciais e semânticas distintas. Ao mesmo tempo, a Web amplia a necessidade de identificação, descoberta, interoperabilidade, exposição de serviços e composição de sistemas distribuídos. Assim, o desenvolvimento de gêmeos digitais exige não apenas tecnologias capazes de conectar o mundo físico ao digital, mas também mecanismos para integrar, interpretar, validar, proteger e utilizar essas informações de forma confiável.

Esta seção apresenta um conjunto não exaustivo de desafios atuais relacionados aos gêmeos digitais, resumidos na Figura 3.10. De modo geral, a principal dificuldade não está na indisponibilidade individual dos paradigmas e tecnologias habilitadoras, haja vista que estes já fornecem grande parte dos recursos necessários à construção e à operação desses sistemas. O problema central reside em integrar esses recursos de forma coerente, transformando representações digitais isoladas em gêmeos digitais confiáveis, interoperáveis, seguros e capazes de permanecer adequados à sua finalidade ao longo do tempo.

3.4.1. Padronização, Semântica e Interoperabilidade

Um dos desafios fundamentais relacionados aos gêmeos digitais está na coexistência de diferentes padrões, modelos, *frameworks*, linguagens e plataformas. Embora iniciativas como a ISO/IEC 30173:2023, a ISO 23247-1:2021, o AAS e a DTDL representem avanços importantes, elas possuem objetivos, escopos e comunidades de adoção distintos. A ISO/IEC 30173:2023 estabelece conceitos e terminologia para gêmeos digitais, enquanto



Figura 3.10. Alguns desafios atuais em gêmeos digitais

a ISO 23247-1:2021 define princípios gerais para um *framework* de gêmeos digitais aplicado à manufatura. O AAS e a DTDL, por sua vez, oferecem mecanismos para a representação estruturada de entidades e suas características em diferentes ecossistemas tecnológicos. Essa diversidade não constitui necessariamente um problema, pois diferentes modelos podem ser adequados a diferentes domínios e finalidades. O desafio está em permitir que essas representações coexistam e cooperem entre si.

Essa questão torna-se especialmente importante em sistemas compostos por múltiplos gêmeos digitais, nos quais equipamentos, processos, instalações e sistemas organizacionais podem possuir representações desenvolvidas segundo diferentes especificações. Um equipamento pode possuir uma representação específica do seu respectivo fabricante, enquanto uma fábrica pode utilizar outra representação, um sistema de manutenção pode utilizar um terceiro modelo e uma plataforma de gêmeos digitais pode adotar seu próprio modelo de entidades. Portanto, a integração entre esses elementos exige mais do que conectividade: é necessário estabelecer correspondências semânticas entre conceitos, propriedades, eventos e relações.

No contexto de sistemas multimídia e Web, esse problema também inclui a necessidade de associar diferentes recursos digitais às entidades representadas pelo gêmeo. Por exemplo, uma câmera de vídeo não deve ser compreendida apenas como uma fonte de vídeo, mas como um recurso contextualizado espacial e temporalmente, associado a uma entidade, a uma localização, a um campo de visão e a um conjunto de eventos observáveis. Abordagens baseadas em ontologias e tecnologias da Web Semântica podem contribuir para representar essas relações e favorecer a descoberta, a composição e a interoperabilidade entre gêmeos digitais heterogêneos [Rico et al. 2023, Karabulut et al. 2024].

Assim, o desafio não consiste em eliminar a diversidade de representações, mas em desenvolver mecanismos que permitam mapeá-las, relacioná-las e utilizá-las de forma interoperável [Acharya et al. 2024]. Entre as questões em aberto estão:

- Como estabelecer correspondências semânticas entre modelos de gêmeos digi-

tais definidos segundo diferentes padrões e ontologias?

- Como mecanismos baseados na Web podem favorecer a descoberta e a composição de gêmeos digitais heterogêneos?
- Em que medida ontologias, grafos de conhecimento e tecnologias da Web Semântica podem reduzir o custo de integração entre gêmeos desenvolvidos de forma independente?

3.4.2. Integração de Dados Multimodais e Sincronização

A interoperabilidade torna-se ainda mais complexa quando os dados utilizados pelos gêmeos digitais são heterogêneos e multimodais. Um sistema pode receber valores numéricos, eventos, textos, imagens, vídeos, áudio, modelos tridimensionais e dados geoespaciais, modalidades que apresentam diferentes estruturas, resoluções, frequências de atualização, latências e requisitos computacionais. Integrá-las exige estabelecer relações entre representações que descrevem o mesmo fenômeno sob diferentes perspectivas, preservando seu contexto, origem, qualidade e incerteza.

Em um estádio inteligente, uma estimativa de ocupação obtida por visão computacional precisa ser associada a uma região espacial e a um instante temporal, podendo ainda ser relacionada a informações provenientes de sensores ambientais, sistemas de acesso ou modelos de circulação. O problema, portanto, não consiste simplesmente em combinar diferentes fontes, mas em estabelecer um alinhamento espaço-temporal e semântico entre os dados e preservar as informações necessárias para sua interpretação e uso posterior. Essa questão é particularmente relevante quando dados derivados são utilizados por modelos analíticos ou mecanismos de decisão..

Outra questão nesse cenário consiste em determinar quais informações devem ser efetivamente incorporadas ao gêmeo digital. Em aplicações baseadas em vídeo, armazenar e transmitir continuamente todos os fluxos capturados pode ser desnecessário e computacionalmente dispendioso. Dependendo da finalidade, pode ser mais apropriado extrair eventos, características ou metadados próximos à fonte, mantendo referências aos dados originais. Assim, o processamento na borda pode transformar fluxos multimídia em informações estruturadas, enquanto serviços Web podem disponibilizar essas informações de forma seletiva para aplicações e outros gêmeos digitais.

A sincronização entre os mundos físico e virtual é fundamental para que a representação digital permaneça adequada ao estado, à estrutura e ao comportamento da entidade representada. Por outro lado, diferentes fontes de dados para alimentar gêmeos digitais apresentam frequências e latências distintas. Uma câmera pode produzir dezenas de quadros por segundo, sensores ambientais podem atualizar seus valores a cada segundo ou minuto, dados de consumo podem ser agregados periodicamente e informações de manutenção podem ser registradas somente quando ocorre uma intervenção. Consequentemente, a representação digital precisa lidar com estados que não são necessariamente observados simultaneamente.

De maneira adicional, sincronizações muito frequentes podem impor custos elevados de comunicação, processamento e armazenamento e, dependendo da aplicação, até mesmo ser desnecessárias, enquanto sincronizações pouco frequentes podem fazer com que a representação digital se desvie do sistema físico, comprometendo a precisão de aná-

lises, previsões e decisões. Portanto, a frequência e a estratégia de sincronização devem ser compatíveis com a finalidade do gêmeo digital, sendo necessário também determinar quando e como realizar a sincronização, equilibrando a atualidade e a qualidade da representação com os recursos computacionais e de comunicação necessários para mantê-la [Tan and Matta 2023]

As principais questões em aberto aqui são:

- Como integrar dados multimodais em gêmeos digitais preservando, ao mesmo tempo, seu contexto, origem e eventuais incertezas?
- Quais mecanismos podem assegurar a sincronização de dados produzidos em diferentes escalas temporais e espaciais?
- Como determinar a frequência e as condições de sincronização que equilibrem a atualidade da representação digital e os requisitos de precisão com os custos de comunicação e processamento?
- Como determinar quais dados devem ser processados, transmitidos ou armazenados na borda, na infraestrutura local ou na nuvem, considerando simultaneamente requisitos de desempenho, qualidade e custo?

3.4.3. Fidelidade, Verificação, Validação e Incerteza

Outro desafio relevante está relacionado à adequação da representação digital ao propósito para o qual o gêmeo digital será utilizado. É tentador assumir que, quanto mais detalhado for um modelo, melhor será o gêmeo digital; todavia, essa relação não é necessariamente verdadeira. Um modelo excessivamente complexo pode demandar recursos computacionais elevados, ser difícil de validar ou representar detalhes que não contribuem para a finalidade da aplicação. Dessa forma, a questão mais apropriada é determinar se a representação possui fidelidade suficiente para o propósito em questão.

A avaliação da fidelidade torna-se particularmente importante quando o gêmeo digital é utilizado para previsão, experimentação ou tomada de decisão. Nesses casos, são necessárias atividades de verificação, validação e quantificação de incerteza (VVUQ, abreviação de *verification, validation, and uncertainty quantification*) para estabelecer a credibilidade dos resultados [Shao et al. 2023], o que foi, inclusive, destacado como um aspecto fundamental para gêmeos digitais em um recente relatório do National Institute of Standards and Technology (NIST), dos Estados Unidos [Frechette et al. 2026]. A verificação tem como objetivo determinar se o modelo foi implementado corretamente em relação à sua especificação, enquanto a validação busca avaliar se ele representa adequadamente o fenômeno ou sistema de interesse para determinado propósito. A quantificação de incerteza, por sua vez, procura caracterizar como as incertezas presentes nos dados, parâmetros, modelos e condições de execução afetam os resultados.

Em gêmeos digitais, as atividades de VVUQ estão fortemente relacionadas, pois quanto mais heterogêneo e distribuído o sistema, maior a necessidade de padrões e mecanismos de integração; quanto mais complexos os modelos, maior a necessidade de validação; e quanto mais o gêmeo digital participa de processos decisórios ou atua sobre o sistema físico, maiores são os requisitos de segurança, credibilidade e confiança. Além disso, elas não podem ser tratadas como procedimentos pontuais realizados apenas durante o desenvolvimento do modelo, uma vez que, como os dados são continuamente atu-

alizados e tanto o sistema físico quanto seus modelos podem evoluir ao longo do tempo, é necessário preservar a credibilidade do gêmeo digital durante sua operação. Isso também envolve identificar quando mudanças nos dados, nos parâmetros, nas condições de operação ou no próprio sistema físico podem comprometer a validade dos modelos e demandar novas atividades de VVUQ.

Finalmente, a correspondência entre o modelo digital e o sistema físico correspondente também pode se deteriorar ao longo do tempo. Por exemplo, uma câmera de vídeo pode ser reposicionada, uma máquina pode ser substituída ou algum tipo de infraestrutura pode ser modificado. Nesse caso, mesmo que o modelo digital permaneça internamente consistente, sua relação com o sistema físico pode deixar de ser válida. A manutenção da credibilidade exige, assim, mecanismos capazes de detectar mudanças, recalibrar modelos, atualizar representações e reavaliar a sua validade ao longo do ciclo de vida do gêmeo digital [Shao et al. 2023].

Entre as principais questões relacionadas a fidelidade e incerteza estão:

- Como determinar o nível de fidelidade necessário para que um gêmeo digital seja adequado a uma finalidade específica?
- Como estabelecer procedimentos sistemáticos de VVUQ ao longo do ciclo de vida de um gêmeo digital?
- Como identificar e tratar a perda de validade de modelos à medida que o sistema físico, seus dados e seu contexto de operação se modificam?

3.4.4. Experimentação e Tomada de Decisão

As aplicações apresentadas na Seção 3.3 mostram que um gêmeo digital pode desempenhar funções que vão além da mera representação e do monitoramento do estado atual de um sistema. Quando associado a modelos analíticos ou de simulação, um gêmeo digital também pode ser utilizado para explorar estados possíveis, avaliar alternativas e antecipar as consequências de diferentes condições ou ações antes de sua implementação no sistema físico. Entretanto, essa capacidade não é inerente a toda implementação de gêmeo digital, pois depende dos dados, modelos e mecanismos analíticos incorporados ao sistema, bem como da finalidade para a qual foi concebido [Wooley et al. 2023]. À medida que o gêmeo digital passa de uma função predominantemente descritiva para funções preditivas ou prescritivas, aumentam também as exigências de credibilidade dos resultados [Shao et al. 2023].

A diferença entre monitoramento, previsão e experimentação pode ser expressa pela natureza das perguntas às quais o sistema é capaz de responder. Um mecanismo convencional de monitoramento pode responder a uma pergunta do tipo: *o que está acontecendo agora?* Um gêmeo digital associado a modelos preditivos pode contribuir para responder: *o que provavelmente acontecerá?* Quando modelos de simulação e mecanismos de análise de cenários são incorporados, pode-se ainda investigar: *o que poderá acontecer se determinada ação for realizada?*

No contexto de um estádio inteligente, por exemplo, diferentes níveis de ocupação podem ser simulados para avaliar seus efeitos sobre o consumo de energia, a temperatura ambiente e a circulação de pessoas. Na manufatura, pode-se investigar o impacto da introdução de uma nova máquina; no transporte, os efeitos de alterações na infraestrut-

tura ou nas condições de circulação; na agricultura, diferentes estratégias de irrigação. A experimentação virtual permite, assim, comparar alternativas e antecipar possíveis consequências antes da implementação efetiva [dos Santos et al. 2020, Wooley et al. 2023]. Contudo, uma previsão ou simulação somente será útil se o modelo for adequado ao propósito considerado e se as incertezas associadas aos dados e aos parâmetros forem suficientemente compreendidas [Shao et al. 2023]. Com isso, a experimentação virtual não elimina a necessidade de validação; pelo contrário, ela torna a credibilidade dos modelos ainda mais importante.

As tecnologias multimídia e da Web também participam desse processo. Representações tridimensionais, mapas, vídeos, *dashboards* e interfaces interativas podem permitir que os usuários explorem diferentes estados e cenários e compreendam suas possíveis consequências. A visualização, nesse contexto, não se limita a uma representação do estado atual do sistema, mas faz parte da cadeia pela qual os resultados computacionais são transformados em informações compreensíveis para apoiar a interpretação e a tomada de decisão. Uma visualização inadequada pode ocultar incertezas, dificultar a comparação entre alternativas ou transmitir uma falsa impressão de precisão.

Dessa forma, a ampliação do papel de um gêmeo digital não representa apenas uma expansão de suas capacidades tecnológicas, mas também modifica o tipo de evidência necessário para confiar em seus resultados. Entre as questões em aberto estão:

- Como avaliar a credibilidade de previsões e experimentos realizados sobre um gêmeo digital antes que seus resultados sejam utilizados para apoiar decisões?
- Quais evidências são necessárias para considerar um resultado suficientemente confiável para fundamentar uma decisão?
- Como interfaces multimídia e tecnologias da Web podem comunicar cenários, resultados e incertezas de forma compreensível a diferentes perfis de usuários?

3.4.5. Modelos de IA

A incorporação crescente de modelos de aprendizado de máquina em gêmeos digitais representa tanto uma oportunidade quanto um desafio [Kreuzer et al. 2024]. Esses modelos podem identificar padrões complexos, detectar anomalias, transformar dados multimídia em informações estruturadas e produzir previsões sobre estados futuros do sistema [Nele et al. 2024]. Em sistemas multimídia, técnicas de visão computacional podem transformar fluxos de vídeo em eventos associados a pessoas, objetos ou condições ambientais. Esses modelos também podem combinar dados visuais, temporais, espaciais e sensoriais para produzir estimativas complexas que seriam obtidas por meio de regras explícitas.

Entretanto, modelos de inteligência introduzem problemas adicionais de explicabilidade, generalização, atualização e validação. Um modelo treinado com dados históricos pode apresentar desempenho inadequado quando o sistema físico ou o contexto de operação se modifica. Da mesma forma, a qualidade das previsões depende das características dos dados utilizados no treinamento e na inferência, aspecto particularmente relevante em domínios críticos, como saúde e segurança. Uma possibilidade para lidar com essas limitações consiste no uso de modelos híbridos, que combinam conhecimento físico ou baseado em modelos com aprendizado orientado a dados. Em muitos sistemas,

dados históricos, isoladamente, não são suficientes para representar corretamente comportamentos em condições novas. Dessa forma, modelos físicos podem fornecer restrições e conhecimento estrutural que complementam os padrões aprendidos. No estágio inteligente, por exemplo, um modelo térmico baseado em princípios físicos pode ser combinado com aprendizado de máquina para estimar parâmetros ou corrigir erros sistemáticos, ampliando a capacidade preditiva sem eliminar o conhecimento sobre o comportamento físico do sistema.

Mais recentemente, modelos de IA generativa vêm sendo investigados em conjunto com gêmeos digitais, como para apoiar a geração de dados sintéticos, a exploração de cenários e novas formas de interação [Chiaro et al. 2025, Li et al. 2025]. Modelos de linguagem podem atuar como interfaces para consultar informações, explicar resultados ou auxiliar os usuários na exploração de cenários, enquanto sistemas baseados em agentes podem coordenar diferentes serviços analíticos e modelos especializados. Essas possibilidades, contudo, devem ser tratadas como uma direção emergente, não como uma evolução necessária dos gêmeos digitais. Quando sistemas baseados em IA recebem capacidade de executar ações ou acionar sistemas externos, surgem ainda requisitos adicionais de autorização, supervisão, verificação e segurança.

Uma direção recente que amplia essa discussão é a chamada IA física (*physical AI*, em inglês), conceito associado a sistemas de inteligência capazes de perceber, raciocinar e atuar diretamente no mundo físico [Li et al. 2023, Wu et al. 2026]. Diferentemente de aplicações convencionais de IA, nas quais as entradas e saídas permanecem predominantemente no domínio digital, os sistemas de IA física operam em ciclos fechados que envolvem sensores, modelos computacionais e atuadores e estão sujeitos às restrições temporais, físicas e operacionais do ambiente. Essa característica estabelece uma relação interessante com os gêmeos digitais, uma vez que estes podem fornecer ambientes virtuais para treinamento, simulação, avaliação e teste de sistemas inteligentes antes de sua execução no mundo físico.

Uma revisão recente da literatura sobre a integração entre gêmeos digitais e IA física destaca o papel dos gêmeos digitais na integração entre o mundo virtual e o real, no controle adaptativo e na avaliação de sistemas físicos inteligentes [Biswas et al. 2026]. Por outro lado, essa relação é, na verdade, de complementaridade: enquanto o gêmeo digital pode representar e simular o comportamento de um sistema físico, a IA física acrescenta mecanismos de percepção, decisão e atuação capazes de modificar esse sistema. A integração dos dois pode, assim, estabelecer um ciclo contínuo entre realidade e simulação, no qual os dados do sistema físico atualizam o gêmeo digital, o gêmeo digital fornece condições para treinamento e experimentação, e os modelos de IA resultantes retornam ao ambiente físico para executar ações. Essa integração também evidencia desafios já discutidos nesta seção, em particular quanto à necessidade de representar incertezas, preservar sincronização temporal e garantir verificação, validação e segurança quando decisões automatizadas passam a produzir efeitos físicos.

Diante do exposto, o desafio consiste em investigar como a IA pode ampliar as capacidades analíticas dos gêmeos digitais sem comprometer sua credibilidade, explicabilidade e controle. Entre as questões em aberto estão:

- Como combinar modelos físicos, modelos orientados por dados e modelos de

IA de modo a preservar a explicabilidade, a generalização e a confiabilidade?

- Como utilizar gêmeos digitais para treinar e avaliar sistemas baseados em IA física e, ao mesmo tempo, garantir que modelos treinados em ambientes virtuais mantenham comportamento seguro e válido quando transferidos para o mundo físico?
- Como realizar VVUQ em sistemas nos quais modelos de IA não apenas produzem previsões, mas também influenciam ou executam ações sobre o sistema físico?

3.4.6. Interação Humano-Gêmeo Digital, Segurança e Privacidade

Os gêmeos digitais são desenvolvidos não apenas para realizar processamento automatizado, mas também para auxiliar as pessoas em suas tarefas. Um operador pode precisar compreender rapidamente a situação atual, identificar anomalias, comparar alternativas e decidir sobre uma ação. Nesse contexto, uma representação excessivamente complexa pode dificultar a interpretação em vez de facilitá-la. Desse modo, a interação humano-gêmeo digital constitui uma dimensão importante para que as informações produzidas pelo sistema sejam efetivamente utilizadas [Barricelli and Fogli 2022]. Essa questão aproxima os gêmeos digitais de áreas como visualização de informação, interação humano-computador e sistemas multimídia. Interfaces tridimensionais podem facilitar a compreensão espacial, enquanto *dashboards* podem apoiar a comparação de indicadores, vídeos podem fornecer evidências associadas a eventos e tecnologias de realidade aumentada podem sobrepor informações digitais ao ambiente físico. A questão central, contudo, não é escolher a interface visualmente mais sofisticada, mas determinar qual representação fornece a informação necessária para cada tarefa ou decisão. Quando o gêmeo digital apresenta previsões ou recomendações, a interface também deve fornecer contexto e, quando apropriado, evidências e informações sobre as incertezas associadas aos resultados.

Segurança e privacidade constituem desafios igualmente importantes e devem ser consideradas desde a concepção do gêmeo digital, e não apenas ao final do desenvolvimento [Voas et al. 2025]. A natureza conectada desses sistemas, que podem manter fluxos contínuos de dados entre o mundo físico e sua representação virtual e, em alguns casos, entre a representação virtual e atuadores físicos, cria riscos de segurança que podem acarretar consequências no mundo físico. Por exemplo, no estádio inteligente, o comprometimento de um gêmeo digital responsável por apoiar ou controlar sistemas de acesso ou sinalização poderia transformar uma vulnerabilidade digital em um risco operacional.

Adicionalmente, muitas aplicações de gêmeos digitais envolvem dados potencialmente sensíveis, como localização, imagens e dados biométricos. Isso levanta questões relacionadas à finalidade da coleta, à resolução, ao período de retenção, ao controle de acesso e ao compartilhamento de dados. O desafio não consiste apenas em proteger os dados armazenados, mas em estabelecer mecanismos de governança que definam quais dados devem ser coletados, quem pode acessá-los, para quais finalidades e sob quais condições [Voas et al. 2025].

As principais questões em aberto aqui estão relacionadas a como projetar a relação entre usuários e gêmeos digitais sem transformar a interação em uma mera camada de

visualização:

- Como representar estados, previsões e incertezas de maneira adequada às necessidades de diferentes usuários?
- Como equilibrar riqueza multimídia, transparência e utilidade com requisitos de privacidade e segurança?
- Como estabelecer mecanismos de confiança e controle quando os resultados produzidos pelo gêmeo digital passam a influenciar ou automatizar decisões?

3.4.7. Escalabilidade e Composição de Gêmeos Digitais

Gêmeos digitais podem crescer significativamente em tamanho e complexidade. Um gêmeo de uma máquina pode envolver centenas de variáveis, enquanto um gêmeo de uma fábrica pode envolver dezenas ou centenas de equipamentos. Já um gêmeo digital urbano pode envolver milhares de entidades, eventos e relações, ou muito mais que isso. Quando dados multimídia são incorporados, a escala aumenta ainda mais, pois fluxos contínuos de vídeo, modelos tridimensionais, dados espaciais e eventos em tempo real podem exigir elevada capacidade de processamento, armazenamento e comunicação.

Esse cenário cria um problema de escalabilidade, pois não basta desenvolver um protótipo funcional para um número limitado de entidades. É necessário avaliar se a arquitetura continua adequada à medida que o número de dispositivos, usuários, modelos, eventos e fontes de dados aumenta. A questão também se manifesta na composição de múltiplos gêmeos digitais, uma vez que sistemas reais são compostos por ativos, processos e organizações interdependentes. Um gêmeo digital de uma máquina pode interagir com o gêmeo digital de uma linha de produção, que, por sua vez, pode fazer parte do gêmeo digital de uma fábrica. Em ambientes urbanos, gêmeos digitais de edifícios, transporte, energia e infraestrutura podem precisar cooperar entre si.

Nesse cenário, torna-se importante desenvolver arquiteturas capazes de descobrir, conectar, sincronizar e utilizar gêmeos digitais especializados sem exigir integrações específicas entre cada par de sistemas. A Web pode contribuir para identificação, descrição, descoberta e acesso a recursos distribuídos, enquanto plataformas de *middleware* podem abstrair aspectos de comunicação, modelagem e integração [Almeida et al. 2026]. Em vez de tratar cada gêmeo digital como um sistema isolado, arquiteturas futuras poderão oferecer serviços comuns para descoberta, sincronização, consulta, composição, segurança e gestão do ciclo de vida.

A ideia de operar múltiplos gêmeos digitais em uma perspectiva de cooperação desloca a pesquisa de instâncias individuais para a construção de ecossistemas e sistemas de sistemas de gêmeos digitais, nos quais diferentes representações podem cooperar entre si preservando, ao mesmo tempo, sua autonomia e especificidades [Rivera et al. 2022, Cavalcante et al. 2025]. A transição para esses ecossistemas levanta, assim, questões relacionadas à escalabilidade da composição:

- Como compor múltiplos gêmeos digitais sem introduzir dependências que comprometam sua autonomia?
- Como distribuir o processamento, o armazenamento e a comunicação entre a borda, a infraestrutura local e a nuvem em ecossistemas de grande escala?
- Como preservar o desempenho, a interoperabilidade e a consistência quando

múltiplos gêmeos precisam operar de forma coordenada?

3.5. Conclusão

Este capítulo teve como objetivo fornecer uma visão abrangente sobre gêmeos digitais, abordando seus conceitos fundamentais, os principais paradigmas habilitadores, padrões e plataformas para seu desenvolvimento e operação, bem como os diferentes domínios de aplicação em que têm sido empregados. A discussão também destacou o papel das tecnologias multimídia e da Web na construção de gêmeos digitais, em particular na integração de dados multimodais, na comunicação e na interoperabilidade entre sistemas distribuídos, e na visualização e na interação com suas representações digitais. Essa relação é relevante, pois gêmeos digitais tipicamente dependem de capacidades que incluem a integração de fluxos de dados heterogêneos, arquiteturas de comunicação distribuída, mecanismos de modelagem semântica e interfaces interativas capazes de representar informações complexas. Nesse sentido, a aproximação entre gêmeos digitais, sistemas multimídia e tecnologias da Web amplia as possibilidades de atuação de estudantes, pesquisadores e profissionais dessas áreas no desenvolvimento de novos sistemas e aplicações.

A análise das aplicações descritas neste capítulo mostrou, ainda, que os gêmeos digitais podem assumir diferentes formas e níveis de complexidade, desde a representação e o monitoramento de ativos individuais até a integração de processos, infraestruturas e sistemas interdependentes. Nesse contexto, encontram-se em aberto diversos desafios e questões relacionadas a padronização e interoperabilidade, integração e sincronização de dados multimodais, fidelidade e credibilidade dos modelos, apoio à experimentação e à tomada de decisão, incorporação de modelos de IA, interação humano-gêmeo digital, segurança, privacidade, escalabilidade e composição de gêmeos digitais.

A partir dessa perspectiva, uma questão abrangente para pesquisas futuras consiste em investigar como projetar ecossistemas de gêmeos digitais confiáveis, seguros e interoperáveis, capazes de integrar dados e modelos heterogêneos, incorporar recursos multimídia, operar sobre infraestruturas Web distribuídas e utilizar técnicas de inteligência computacional de maneira controlada e adequada às finalidades de cada aplicação. Essa questão não implica uma trajetória tecnológica única para os gêmeos digitais, mas sim salienta a necessidade de combinar diferentes paradigmas, modelos e tecnologias de acordo com os requisitos do sistema físico e do contexto em que o gêmeo será empregado.

Como principal contribuição, este capítulo buscou articular uma perspectiva integrada sobre gêmeos digitais que conecta fundamentos conceituais, tecnologias habilitadoras, padrões, plataformas, aplicações e desafios de pesquisa. Especialmente, procurou-se explicitar a contribuição de tecnologias multimídia e da Web para além de seu papel como mecanismos de apresentação ou de acesso, destacando sua participação na integração de dados multimodais, na comunicação, na interoperabilidade, na representação semântica e na interação com os gêmeos digitais. Ao reunir essas perspectivas e relacioná-las aos desafios que ainda limitam a adoção e evolução desses sistemas, este capítulo ofereceu uma base conceitual para orientar leituras especializadas e apoiar a identificação de oportunidades de pesquisa e desenvolvimento. Espera-se, assim, que esta discussão contribua para uma compreensão mais integrada dos gêmeos digitais e estimule novas investigações, aplicações e soluções que explorem o potencial das tecnologias multimídia e da

Web na construção de sistemas digitais capazes de representar, analisar, experimentar e apoiar decisões sobre sistemas físicos cada vez mais complexos.

Agradecimentos

Este trabalho possui apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo nº 421339/2023-3, e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Redes de Comunicação e Internet das Coisas Inteligentes (INCT ICoNIoT), financiado pelo CNPq, processo nº 405940/2022-0, e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), processo nº 88887.954253/2024-00.

Declaração sobre o Uso de Inteligência Artificial

Ferramentas de Inteligência Artificial generativa, especificamente Google Gemini (Gemini 3.6 Flash e Nano Banana 2), Claude (Sonnet 5) e ChatGPT (GPT-5.6 Luna), foram utilizadas na elaboração deste capítulo como apoio à produção de algumas figuras e à revisão da organização e do fluxo textual. Todos os elementos produzidos ou modificados com auxílio dessas ferramentas foram cuidadosamente revisados e validados pelos autores, que permanecem integralmente responsáveis pelo conteúdo, pela precisão das informações e pela qualidade final do capítulo, em plena conformidade com o Código de Conduta para Autores em Publicações da Sociedade Brasileira de Computação (SBC).

Referências

- Acharya, S., Khan, A. A., and Päiväranta, T. (2024). Interoperability levels and challenges of digital twins in cyber–physical systems. *Journal of Industrial Information Integration*, 42.
- Adolphsen, M. (2025). *Digital twin technology: Revolutionizing stadium management for the ultimate fan experience*. <https://www.simio.com/blog/digital-twin-technology-revolutionizing-stadium-management>.
- Almeida, A., Batista, T., Cavalcante, E., Delicato, F., Motta, R., and Vieira, M. (2023). Middleware for digital twins: A systematic mapping study. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Middleware for Digital Twin*, pages 19–24, USA. ACM.
- Almeida, A., Pereira, L., Batista, T., Cavalcante, E., Delicato, F. C., and Motta, R. (2026). Construção de sistemas de gêmeos digitais: Uma abordagem baseada em middleware. In Sampaio, L. N., Freitas, A. E. S., Munaretto, A., Moraes, I. M., and Mansilha, R. B., editors, *Minicursos do SBRC 2026*, pages 210–245. SBC, Brasil.
- Barricelli, B. R., Casiraghi, E., and Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access*, 146.
- Barricelli, B. R. and Fogli, D. (2022). Digital twins in human-computer interaction: A systematic review. *International Journal of Human–Computer Interaction*, 40(2):79–97.
- Biswas, P., Kim, T. M., and Kim, W. S. (2026). Integration of digital twins and physical AI in cyber-physical systems. *Intelligent Systems with Applications*, 30.
- Bokhtiar Al Zami, M., Shaon, S., Quy, V. K., and Nguyen, D. C. (2025). Digital twin in industries: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 13:47291–47336.

- Cavalcante, E., Batista, T., and Oquendo, F. (2025). Exploring synergies and challenges of system-of-systems digital twins. In *2025 IEEE 22nd International Conference on Software Architecture Companion*, pages 190–196, USA. IEEE.
- Cespedes-Cubides, A. S. and Jradi, M. (2024). A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage. *Energy Informatics*, 7(1).
- Chiaro, D., Qi, P., Pescapè, A., and Piccialli, F. (2025). Generative AI-empowered digital twin: A comprehensive survey with taxonomy. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 21(6):4287–4295.
- Deng, T., Zhang, K., and Shen, Z.-J. M. (2021). A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities. *Journal of Management Science and Engineering*, 6(2):125–134.
- Digital Twin Consortium (2022). *The DTC Glossary*. <https://www.digitaltwinconsortium.org/glossary/glossary/>.
- do Amaral, J., dos Santos, C., Montevechi, J., and de Queiroz, A. (2023). Energy digital twin applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188.
- dos Santos, C. H., de Queiroz, J. A., Leal, F., and Montevechi, J. A. B. (2020). Use of simulation in the industry 4.0 context: Creation of a digital twin to optimise decision making on non-automated process. *Journal of Simulation*, 16(3):284–297.
- Eramo, R., Bordeleau, F., Combemale, B., van den Brand, M., Wimmer, M., and Wortmann, A. (2022). Conceptualizing digital twins. *IEEE Software*, 39(2):39–46.
- Errandonea, I., Beltrán, S., and Arrizabalaga, S. (2020). Digital twin for maintenance: A literature review. *Computers in Industry*, 123.
- Ferré-Bigorra, J., Casals, M., and Gangolells, M. (2022). The adoption of urban digital twins. *Cities*, 131.
- Fitzgerald, J., Gomes, C., and Larsen, P. G. (2024). *The engineering of digital twins*. Springer Cham, Switzerland.
- Frechette, S., Shao, G., and Pease, M. (2026). Digital Twins Workshops Summary Report. Technical Report NISTIR 8620, National Institute of Standards and Technology, USA.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., and Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8:108952–108971.
- Gao, Y., Qian, S., Li, Z., Wang, P., Wang, F., and He, Q. (2021). Digital twin and its application in transportation infrastructure. In *Proceedings of the IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence*, pages 298–301, USA. IEEE.
- Ghenai, C., Husein, L. A., Nahlawi, M. A., Hamid, A. K., and Bettayeb, M. (2022). Recent trends of digital twin technologies in the energy sector: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 54.
- Grieves, M. and Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S., and Alves, A.,

editors, *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*, pages 85–113. Springer, Cham, Switzerland.

Heluany, J. B. and Gkioulos, V. (2023). A review on digital twins for power generation and distribution. *International Journal of Information Security*, 23(2):1171–1195.

IDTA (2026). *Specification of the Asset Administration Shell – Part 1: Metamodel, Version 3.2*. Industrial Digital Twin Association. <https://industrialdigitaltwin.io/aas-specifications/IDTA-01001/v3.2/index.html>.

IEC (2023). IEC 63278-1:2023: *Asset Administration Shell for industrial applications – Part 1: Asset Administration Shell structure*.

ISO (2021). ISO 23247-1:2021: *Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing*. Part 1: Overview and general principles. <https://www.iso.org/standard/75066.html>.

ISO (2023). ISO/IEC 30173:2023: *Digital twin – Concepts and terminology*. <https://www.iso.org/standard/81442.html>.

Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., and Hicks, B. (2020). Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29:36–52.

Kannoth, S., Hermann, J., Damm, M., Rübel, P., Rusin, D., Jacobi, M., Mittelsdorf, B., Kuhn, T., and Antonino, P. O. (2021). Enabling SMEs to Industry 4.0 using the BaSyx Middleware: A case study. In Biffi, S., Navarro, E., Löwe, W., Sirjani, M., Mirandola, R., and Weyns, D., editors, *Software Architecture*, volume 12857 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 277–294. Springer Cham, Switzerland.

Karabulut, E., Pileggi, S. F., Groth, P., and Degeler, V. (2024). Ontologies in digital twins: A systematic literature review. *Future Generation Computer Systems*, 153:442–456.

Katsoulakis, E., Wang, Q., Wu, H., Shahriyari, L., Fletcher, R., Liu, J., Achenie, L., Liu, H., Jackson, P., Xiao, Y., Syeda-Mahmood, T., Tuli, R., and Deng, J. (2024). Digital twins for health: a scoping review. *npj Digital Medicine*, 7(1).

Kherbache, M., Maimour, M., and Rondeau, E. (2022). Digital twin network for the IIoT using Eclipse Ditto and Hono. *IFAC-PapersOnLine*, 55(8):37–42.

Kreuzer, T., Papapetrou, P., and Zdravkovic, J. (2024). Artificial intelligence in digital twins – a systematic literature review. *Data & Knowledge Engineering*, 151.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., and Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11):1016–1022.

Kušić, K., Schumann, R., and Ivanjko, E. (2023). A digital twin in transportation: Real-time synergy of traffic data streams and simulation for virtualizing motorway dynamics. *Advanced Engineering Informatics*, 55.

Li, T., Long, Q., Chai, H., Zhang, S., Jiang, F., Liu, H., Huang, W., Jin, D., and Li, Y. (2025). Generative AI empowered network digital twins: Architecture, technologies, and applications. *ACM Computing Surveys*, 57(6).

- Li, Y., Li, Z., Duan, Y., and Spulber, A.-B. (2023). Physical Artificial Intelligence (PAI): The next-generation Artificial Intelligence. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 24(8):1231–1238.
- Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I.-K., Huang, H., and Xu, X. (2020). Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61.
- Nele, L., Mattera, G., Yap, E. W., Vozza, M., and Vespoli, S. (2024). Towards the application of machine learning in digital twin technology: a multi-scale review. *Discover Applied Sciences*, 6(10).
- Purcell, W. and Neubauer, T. (2023). Digital twins in agriculture: A state-of-the-art review. *Smart Agricultural Technology*, 3.
- Pylaniadis, C., Osinga, S., and Athanasiadis, I. N. (2021). Introducing digital twins to agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184.
- Razzaque, M. A., Milojevic-Jevric, M., Palade, A., and Clarke, S. (2016). Middleware for Internet of Things: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(1):70–95.
- Rico, M., Taverna, M. L., Galli, M. R., and Caliusco, M. L. (2023). Context-aware representation of digital twins’ data: The ontology network role. *Computers in Industry*, 7:167653–167671.
- Rivera, L. F., Jimenez, M., Villegas, N. M., Tamura, G., and Muller, H. A. (2022). The forging of autonomic and cooperating digital twins. *IEEE Internet Computing*, 26(5):41–49.
- Shao, G., Hightower, J., and Schindel, W. (2023). Credibility consideration for digital twins in manufacturing. *Manufacturing Letters*, 35:24–28.
- Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A., and Calinescu, A. (2022). Digital twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions. *Journal of Industrial Information Integration*, 30.
- Sun, T., He, X., and Li, Z. (2023). Digital twin in healthcare: Recent updates and challenges. *Digital Health*, 9.
- Tan, B. and Matta, A. (2023). The digital twin synchronization problem: Framework, formulations, and analysis. *IIE Transactions*, 56(6):652–665.
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., and Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4):2405–2415.
- Toutsop, O., Kornegay, K., and Smith, E. (2021). A comparative analyses of current IoT middleware platforms. In *Proceedings of the 8th International Conference on Future Internet of Things and Cloud*, pages 413–420, USA. IEEE.
- Voas, J., Mell, P., Laplante, P., and Piroumian, V. (2025). Security and trust considerations for digital twin technology. Technical Report NIST IR 8356, National Institute of Standards and Technology, USA.

- Wang, L. (2024). Digital twins in agriculture: A review of recent progress and open issues. *Electronics*, 13(11).
- Weil, C., Bibri, S. E., Longchamp, R., Golay, F., and Alahi, A. (2023). Urban digital twin challenges: A systematic review and perspectives for sustainable smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 99.
- Wooley, A., Silva, D. F., and Bitencourt, J. (2023). When is a simulation a digital twin? a systematic literature review. *Manufacturing Letters*, 35:940–951.
- Wu, D., Zheng, A., Yu, W., Cao, H., Ling, Q., Liu, J., and Zhou, D. (2025). Digital twin technology in transportation infrastructure: A comprehensive survey of current applications, challenges, and future directions. *Applied Sciences*, 15(4).
- Wu, E.-H., Liu, Y.-Q., Xu, T.-C., Ren, L.-X., Qin, Y.-M., Wei, M.-Y., He, X.-W., Yuan, D.-Y., Hou, W.-C., Ma, Z.-W., and Sheng, B. (2026). Physical AI: Evolution, progress, challenges, and prospects. *Journal of Computer Science and Technology*, 41(1):271–288.
- Zhang, J., Ellwein, C., Heithoff, M., Michael, J., and Wortmann, A. (2025). Digital twin and the Asset Administration Shell: An analysis of the three types of AASs and their feasibility for Digital Twin Engineering. *Software and Systems Modeling*, 24(3):771–793.