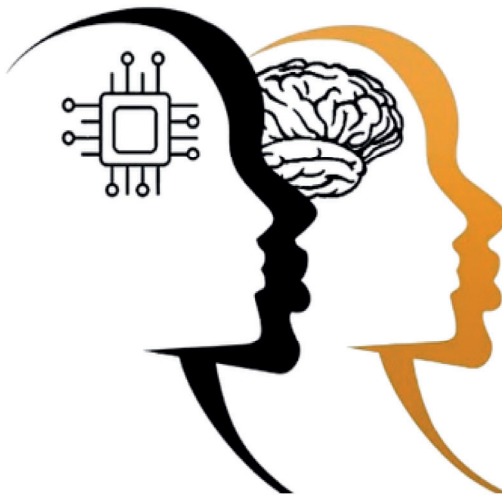


Cristiane Agra Pimentel
Luciane Oliveira Lima
Andressa Clara Barbosa de Araujo
(Organizadoras)

DESMISTIFICANDO O GÊMEO DIGITAL



DESMISTIFICANDO O GÊMEO DIGITAL



Universidade Federal do
Recôncavo da Bahia

REITORA

Georgina Gonçalves dos Santos

VICE-REITOR

Fábio Josué Souza dos Santos

EDUFRB

Superintendência da Editora

SUPERINTENDENTE

Rosineide Pereira Mubarak Garcia

CONSELHO EDITORIAL

Débora Alves Feitosa

Luciene Gomes

Manuela Oliveira de Souza

Maurício Ferreira da Silva

Rosilda Arruda Ferreira

Rosineide Pereira Mubarak Garcia (Presidente)

Sarah Roberta de Oliveira Carneiro

Simone Alves Silva

Urbanir Santana Rodrigues

Marcílio Delan Baliza Fernandes

Susana Couto Pimentel

Tatiana Polliana Pinto de Lima



**EDITORA
ASSOCIADA
À ABEU**
abeu.org.br



ASOCIACIÓN DE EDITORIALES
UNIVERSITARIAS DE AMÉRICA
LATINA Y EL CARIBE

Cristiane Agra Pimentel
Luciane Oliveira Lima
Andressa Clara Barbosa de Araujo
(Organizadoras)

DESMISTIFICANDO O GÊMEO DIGITAL



Cruz das Almas – Bahia
2026

Copyright©2026 by Cristiane Agra Pimentel,
Luciane Oliveira Lima e Andressa Clara Barbosa de Araujo

Direitos para esta edição cedidos à EDUFRB

Projeto gráfico e editoração eletrônica

Antonio Vagno Santana Cardoso

Capa

Ana Beatriz Batista Ribeiro e Luciane Oliveira Lima

Revisão e normatização técnica

Lélia Maria Sampaio Santana

A reprodução não-autorizada desta publicação, por qualquer meio
seja total ou parcial, constitui violação da Lei nº 9.610/98

D463

Desmistificando o gêmeo digital / Organizadoras: Cristiane Agra Pimentel, Luciane Oliveira Lima e Andressa Clara Barbosa de Araújo._ Cruz das Almas, BA: Editora da UFRB, 2026.
133p.; il.

A cada dia, a era de tecnologia e inovação se transforma, desenvolve e acrescenta novas funcionalidades, exigindo de nós constantes atualizações para acompanharmos a velocidade das mudanças. Uma dessas tecnologias emergentes, parte essencial da Indústria 4.0, é o Digital Twin ou Gêmeo Digital.

ISBN: 978-65-84508-77-4.

I.Inovações tecnológicas – Gêmeo digital. 2.Inovações tecnológicas – Indústria 4.0 – Análise. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. II.Pimentel, Cristiane Agra. III.Lima, Luciane Oliveira. IV.Araujo, Andressa Clara Barbosa de. V.Título.

CDD: 350.8550981

Ficha elaborada pela Biblioteca Central da UFRB. Responsável pela
Elaboração Antonio Marcos Sarmento das Chagas (Bibliotecário - CRB5 / 1615).
(os dados para catalogação foram enviados pelo usuário via formulário eletrônico)

Livro publicado em 02 de setembro de 2026



Rua Rui Barbosa, 710 – Centro
44380-000 Cruz das Almas – Bahia/Brasil
Tel.: (75) 3621-7672
editora@reitoria.ufrb.edu.br
www.ufrb.edu.br/editora

Sumário

Prefácio

Allan de Carvalho Vieira ----- 9

Apresentação

Luciane Oliveira Lima ----- 11

Gêmeos digitais: definições, mercados e sustentabilidade

Luciane Oliveira Lima, Andressa Clara Barbosa de Araujo,
Cristiane Agra Pimentel----- 13

Conceitos e arquitetura de Gêmeo Digital

João Pedro Silva Nascimento, Andressa Clara Barbosa
de Araujo, Cristiane Agra Pimentel ----- 27

Confiabilidade de dados

João Vítor Siqueira Fonseca, Andressa Clara Barbosa
de Araujo, Cristiane Agra Pimentel ----- 39

Análises estatísticas na construção do Gêmeo Digital

Daniel Marques Santana Oliveira, Andressa Clara Barbosa
de Araujo, Cristiane Agra Pimentel ----- 55

Construindo um Gêmeo Digital

Emilli Cássia Souza Lopes, Andressa Clara Barbosa
de Araujo, Cristiane Agra Pimentel ----- 71

Gamificação no Ensino do Gêmeo Digital

Marcus Vinícius Oliveira Ribeiro Brandão, Andressa
Clara Barbosa de Araujo, Cristiane Agra Pimentel ----- 83

Desenvolvimento e aplicação: casos do Gêmeo Digital

Andressa Clara Barbosa de Araujo,
Cristiane Agra Pimentel ----- 97

Tendências futuras: indústria 4.0 e o Gêmeo Digital

Andressa Clara Barbosa de Araujo, Jhonatas Novais Silva,
Cristiane Agra Pimentel ----- 117

Sobre os autores e as autoras ----- 133



Prefácio

Allan de Carvalho Vieira¹

Você já quis voar nos seus sonhos?

Não é novidade o flerte da humanidade com a virtualização do mundo real.

Qual ser humano nunca teve a vontade de controlar seus sonhos enquanto dorme? A relação intrínseca entre a manipulação da realidade e sua mistura com o ideário da mente atravessa fronteiras culturais e evolui por meio das narrativas que contamos. Pense em referências como Mundo da Grade (Tron, 1982), Holodeck (Star Trek, 1987), Matrix (1997), The Peripheral (2014) e Black Mirror (2016).

Parafraseando Carl Sagan (1934 - 1996), “a ficção científica é a âncora que mantém nossa mente conectada ao universo das possibilidades”, e ela atua como um preâmbulo visionário, moldando questionamentos e inspirando desenvolvimentos tecnológicos que muitas vezes se tornam realidade. Em termos de possibilidades, virtualizar e integrar o real à sua contraparte eletrônica/digital parece se tornar um dos grandes passos — e uma grande corrida — das conhecidas Big Techs que hoje dominam e influenciam o mundo digital.

Integrar o virtual com o real pode significar muitas coisas: desde produtos de mídia entrando em nossas vidas até a geração de valor para a facilitação da vida humana ou a construção de meios de trabalho mais eficazes e de aprendizado mais eficiente. A chave da questão é sua viabilidade: fazer uma ideia — que pode parecer originada de um conto ficcional — tornar-se um produto ou um processo.

¹ Engenheiro de Produção e Sistemas – Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC).

A virtualização de ambientes parametrizáveis expande a possibilidade de interação não disruptiva do usuário com seus sistemas, assim como uma projeção holográfica (Star Wars) ou os incontáveis futuros vistos numa fração de segundo (Vingadores), conforme as histórias de ficção científica nos mostram.

Sua jornada neste livro será uma visão de mundo novo que se desdobra lado a lado com alguns desbravadores dessa ciência que se materializa em nossa realidade e fascina a todos com suas possibilidades, descobertas e resultados incríveis. Eles se intitulam pesquisadores, mas é necessária uma grande dose de coragem imaginativa, perseverança teimosa e resiliência frente aos obstáculos, virtudes que os aproximam dos grandes aventureiros que se arriscavam em ideias ousadas. Tive o privilégio de acompanhá-los nessa empreitada que rendeu frutos e traçou uma incrível trilha rumo à materialização do que, até então, era apenas “ficção”.

Boa leitura e boa viagem!



Apresentação

Luciane Oliveira Lima

Caro(a) leitor(a),

Estamos vivendo na era da tecnologia. Um mundo em que é quase impossível passar um dia sem utilizar ao menos uma inovação tecnológica, seja para ver as horas em um relógio, seja para enviar uma mensagem pelo celular. A cada dia, a era de tecnologia e inovação se transforma, desenvolve e acrescenta novas funcionalidades, exigindo de nós constantes atualizações para acompanharmos a velocidade das mudanças.

Uma dessas tecnologias emergentes, parte essencial da Indústria 4.0, é o *Digital Twin*, ou, em tradução literal, Gêmeo Digital. Basicamente, trata-se da representação virtual de algo real, como um processo, um fluxo ou um sistema. Essa tecnologia vem revolucionando os sistemas produtivos, embora ainda não haja muitos estudos aplicados.

Já imaginou poder prever erros e falhas antes que aconteçam? Otimizar processos, reduzir custos e melhorar a qualidade de produtos ou serviços? Isso está mais próximo do que parece.

Por isso, nós, do Projeto de Pesquisa "Gêmeo Digital de Produção Parametrizável", desenvolvemos este livro com o objetivo de desmistificar essa tecnologia e orientar o leitor a mergulhar no universo dessa temática. Aqui, você compreenderá o que é essa tecnologia, os passos para seu desenvolvimento e implementação, além de conhecer cases de sucesso onde demos os primeiros passos para criar um *Digital Twin*.

Espero que você se torne nosso "gêmeo" nessa jornada de conhecimento. Boa leitura!



Gêmeos digitais: definições, mercados e sustentabilidade

*Luciane Oliveira Lima
Andressa Clara Barbosa de Araujo
Cristiane Agra Pimentel*

O advento da Indústria 4.0 tem promovido profundas transformações nos sistemas produtivos, integrando tecnologias digitais avançadas aos processos físicos e operacionais. Essa nova era industrial é caracterizada pela digitalização em tempo real, pela conectividade ampliada e pela tomada de decisão baseada em dados, com o objetivo de aumentar a eficiência, a flexibilidade e a sustentabilidade das operações industriais (Moshood *et al.*, 2024). Nesse contexto, os Gêmeos Digitais (GD) emergem como uma das tecnologias mais promissoras, sendo destacados como tendência estratégica para a próxima década pelo relatório IEEE *Technology Megatrends 2024*.

Conceitualmente, o Gêmeo Digital é uma réplica virtual de ativos físicos, processos ou sistemas, que se conecta continuamente a seu correspondente físico, permitindo o monitoramento, a simulação e a análise de dados em tempo real (Deng *et al.*, 2025). Essa interação bidirecional possibilita a antecipação de falhas, a otimização de processos e a melhoria da produtividade, promovendo vantagens competitivas para empresas e organizações públicas. Devido a essas capacidades, o mercado de Gêmeos Digitais vem se expandindo rapidamente, com projeções indicando um crescimento superior a 33% ao ano até 2032, impulsionado por aplicações em setores como manufatura, saúde, construção civil e cidades inteligentes (Attaran; Celik, 2023).

Entretanto, o desenvolvimento e a adoção dos Gêmeos Digitais ainda enfrentam desafios relevantes, como a padronização de indicadores, a integração entre diferentes plataformas digitais, a carência de infraestrutura adequada e a formação de profissionais capacitados para operar e interpretar os sistemas de GD (Santos *et al.*, 2024). Além disso, questões relacionadas à segurança da informação, à governança de dados e aos altos custos de implementação limitam o uso massivo dessa tecnologia, especialmente em países em desenvolvimento e entre pequenas e médias empresas (Araujo *et al.*, 2024).

Para além dos ganhos operacionais, os Gêmeos Digitais possuem alto potencial de contribuição para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela Organização das Nações Unidas. Em particular, destacam-se suas aplicações no ODS 9, que visa desenvolver infraestrutura resiliente e promover a industrialização inclusiva e sustentável, e no ODS 12, que busca assegurar padrões responsáveis de produção e consumo (ONU, 2024). Ao permitir a simulação contínua de operações e o monitoramento do ciclo de vida de produtos e processos, os GDs favorecem a redução de desperdícios, a otimização do uso de recursos naturais e a diminuição das emissões de carbono, promovendo cadeias produtivas mais sustentáveis e circulares (Ali *et al.*, 2025).

Diante desse cenário, este capítulo tem como objetivo discutir as definições, os benefícios e os desafios relacionados à implementação dos Gêmeos Digitais no contexto da Indústria 4.0, além de analisar sua contribuição para o alcance dos ODS 9 e 12. No decorrer desta obra, a partir de uma revisão atualizada da literatura e de estudos de caso recentes, busca-se demonstrar como essa tecnologia pode atuar como ferramenta estratégica para a inovação industrial sustentável, apoiando a transição para modelos produtivos mais eficientes, inteligentes e ambientalmente responsáveis.

Definições e mercado de Gêmeo Digital

A rápida evolução da tecnologia nos últimos anos é simbolizada pelo surgimento da Indústria 4.0 e suas iniciativas em diversos setores, incluindo cidades inteligentes, engenharia, construção civil, mineração, educação, manufatura, entre outros. O conceito de indústria 4.0 baseia-se na integração de ambientes físicos com ecossistemas digitais, onde a tecnologia da informação e a digitalização desempenham papéis essenciais para a eficiência operacional e produtividade (Moshood *et al.*, 2024).

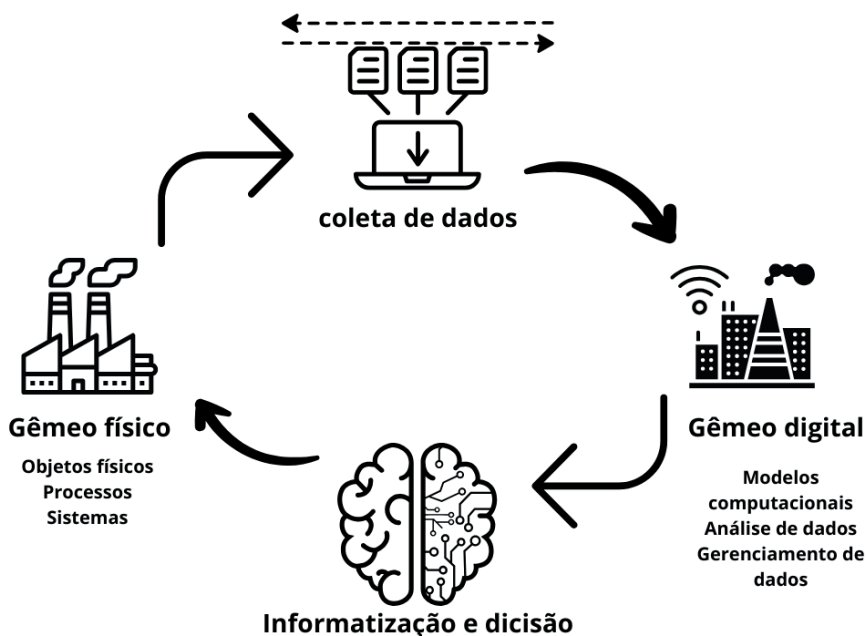
O Gêmeo Digital (GD), tratando-se de uma tecnologia da Indústria 4.0 (I4.0) que auxilia na tomada de decisão e diminuição das chances de erros, vem se expandindo e ganhando muita visibilidade no mercado de trabalho. Em 2022, o mercado do Gêmeo Digital já possuía cerca de 8 bilhões de dólares, com expectativa de crescimento até o ano de 2032 (Attaran; Celik, 2023). Um Gêmeo Digital é geralmente definido como um tipo de representação virtual que serve como uma contraparte digital de um objeto físico ou um processo (Lewis *et al.*, 2023). Apesar de sucinta, a definição dada é precisa sobre o que são Gêmeos Digitais e sua utilidade no mundo real. Eles se relacionam ao futuro da indústria, otimizando processos e possibilitando a criação de cidades e edifícios inteligentes, exemplos que serão demonstrados ao longo deste livro.

Digital Twin ou, em tradução literal, Gêmeo Digital (GD) se trata de uma réplica virtual de um cenário real, podendo ser modelados objetos, processos, colaboradores, tempos, dentre outras funcionalidades que conectem o mundo real e virtual (Oliveira; Haleem; Suman, 2023). O termo “Gêmeo Digital” foi citado pela primeira vez em um artigo científico de 1997, quando foi usado para modelar a obra de um projeto de

Engenharia Civil (Hernández; Hernández, 1997). Através da utilização do Gêmeo Digital é possível modelar e analisar cenários, e realizar mudanças de fluxos antes mesmo de ser aplicado no mundo real, isso faz com que se gere uma otimização de tempo, aumento da confiabilidade e segurança diante as tomadas de decisões, além da redução de custos. No entanto, para que haja resultados satisfatórios, é de extrema importância o contato direto com a empresa que está sendo modelada, já que essa tecnologia depende fielmente dos dados coletados para a criação e atualização dos cenários (Qian *et al.*, 2022).

Atualmente não há um consenso na definição de um método único para criação de um Gêmeo Digital. No entanto, é possível encontrar na literatura alguns exemplos de estruturas para criação de um Gêmeo Digital, embora cada autor defina suas etapas de acordo com o objetivo de cada modelo. Outra forma capaz de descrever os critérios necessários para um modelo se tornar Gêmeo Digital, é o entendimento de como estão sendo utilizados os dados do modelo. Dentre as múltiplas tecnologias utilizadas no processo de desenvolvimento e implementação deste, destaca-se a simulação, que fornece vários esquemas essenciais para a confecção e execução dos GDs, além de apresentar uma versão virtual de uma entidade do mundo real acomodando uma descrição aproximada desta, mas não necessariamente realizando intercâmbio automatizado de informações com ela. Tal ponto é um dos fatores que diferencia o GD da simulação, numa situação que ambos utilizam o espelho do modelo físico para melhorias e tomada de decisões (Manickam *et al.*, 2023).

Segundo Moshood *et al.* (2024), um Gêmeo Digital pode ser descrito como a combinação de um objeto físico, sua renderização digital e como ambos estão conectados, havendo assim um link bidirecional entre os dois, dando uma representação precisa e válida do ativo físico, conforme representado na Figura 1.

Figura 1: Ciclo representativo da definição de Gêmeo Digital

Fonte: Adaptado de Moshood *et al.* (2024).

O GD pode ser considerado uma representação virtual de um ambiente físico, utilizando dados coletados para conectar as partes física e digital. Portanto, fornece uma descrição física e funcional de um componente, produto ou sistema sendo necessário, primeiramente, criar modelos virtuais de elevada fiabilidade, com o objetivo de reproduzir realisticamente as geometrias, propriedades físicas, comportamentos e variáveis do mundo físico (Câmara, 2023). Toda essa fama surge em decorrência dos resultados satisfatórios em diversos setores da indústria, que, ao utilizar da tecnologia, atingiu altos níveis de produtividade, eficiência e inovação (De Araujo *et al.*, 2024).

Uma pesquisa realizada pela empresa Gartner revelou que, até 2027, mais de 40% das grandes empresas em nível global utilizarão o Gêmeo Digital nos seus projetos com objetivo

de aumentar suas receitas. Além disso, a *Global Market Insight* estimou um crescimento no tamanho do mercado de GD de 25% da Taxa Composta de Crescimento Anual (CAGR) entre os anos de 2023 e 2032 (Attaran; Celik, 2023). A adoção da tecnologia de Gêmeo Digital oferece benefícios diversos para as organizações. O GD permite uma maneira única de refletir uma entidade física no meio digital apresentando similaridades em relação à forma, posição, gestos e movimentos em tempo real. Por esta razão é aplicado no monitoramento, diagnóstico, prognóstico e otimização, além de ser uma ferramenta-suporte para tomada de decisão e um meio eficaz para melhorar a produtividade e a eficiência das empresas, bem como para reduzir custos e tempo (QInglin *et al.*, 2021).

A expansão do uso do GD está diretamente associada à maturidade da Indústria 4.0, uma vez que sua implementação depende da infraestrutura de tecnologias habilitadoras, como Internet das Coisas (IoT), *Big Data*, computação em nuvem, manufatura aditiva e inteligência artificial (Suleiman *et al.*, 2022). Empresas globais como GE, Siemens e IBM já disponibilizam o GD como serviço, integrando-o a soluções de monitoramento de máquinas, planejamento logístico e manutenção preditiva. No Brasil, companhias como Vale, Petrobras e Gerdau também têm se destacado pelo uso da tecnologia para otimização de processos críticos e melhoria da gestão operacional (Ribeiro, 2023).

O relatório *Technology Megatrends* do IEEE (2024) já aponta os Gêmeos Digitais como uma das tecnologias-chave para a transformação digital da próxima década, acompanhados por recursos como inteligência artificial generativa e ambientes inteligentes. Segundo estudos recentes, o mercado global de Gêmeo Digital, avaliado em aproximadamente 9,9 bilhões de dólares em 2023, projeta uma taxa de crescimento

anual composta (CAGR) superior a 33% até 2032, impulsionado pela sua aplicabilidade em setores como manufatura, saúde, transporte, construção e energia (Attaran; Celik, 2023; Manickam *et al.*, 2023).

No entanto, no cenário brasileiro, a adoção do Gêmeo Digital enfrenta barreiras estruturais e culturais. Embora existam incentivos fiscais para digitalização e parcerias técnico-científicas que favorecem a inovação, a conectividade limitada, os altos custos de implementação, a carência de mão de obra especializada e a ausência de políticas públicas específicas dificultam a expansão da tecnologia. Além disso, boa parte das pequenas e médias empresas ainda não detêm conhecimento ou infraestrutura compatível com os requisitos da Indústria 4.0, o que restringe o uso do GD a grandes corporações e setores mais tecnologicamente desenvolvidos (Araújo *et al.*, 2024).

O uso de Gêmeos Digitais traz diversos benefícios para as empresas, como a melhoria na qualidade dos produtos, aumento da produtividade e redução de custos. Isso é possível porque os modelos de Gêmeos Digitais permitem simular o comportamento de produtos e processos do mundo real, o que ajuda a identificar falhas e otimizar a produção antes mesmo que os produtos sejam fabricados. Ademais, os modelos de Gêmeos Digitais podem ser usados para monitorar o desempenho de equipamentos e prever falhas, ajudando a reduzir o tempo de inatividade e aumentar a vida útil dos equipamentos. Também podem ser usados para treinar funcionários e criar experiências personalizadas para os clientes (Dietzel *et al.*, 2020).

Um exemplo das áreas da indústria que mais pode se beneficiar com a utilização da tecnologia é a área de cadeia de suprimentos. O uso na cadeia de suprimentos oferece uma série de benefícios significativos, incluindo: visibilidade e trans-

parência; otimização de processos; previsão de demanda; redução de custos e gestão de riscos, o que aumenta a visão estratégica dos gestores. Assim, com base em dados precisos e análises avançadas, o Gêmeo Digital capacita os gestores a tomar decisões estratégicas fundamentadas para melhorar o desempenho da cadeia de suprimentos e impulsionar a competitividade (Attaran, 2023).

Segundo o estudo de Codesal (2024), a tecnologia foi utilizada com o objetivo de detectar falhas temporais de robôs colaborativos, que prejudicavam a eficiência do processo. Após a criação do cenário virtual idêntico ao real e utilizando a ferramenta de emulação do *software* Flexsim, este foi integrado ao ambiente real por meio de sensores, que permitiu a troca de sinais digitais em tempo real. Dessa forma, por meio do Gêmeo Digital, foi possível identificar quando um robô apresentava uma falha temporária ou um desempenho inferior e assim que identificado o erro, era ativado automaticamente estratégias de reatribuição de tarefas.

Nesse sentido, a tecnologia de Gêmeo Digital é apresentada como uma ferramenta estratégica para a integração entre o mundo físico e virtual, com forte aplicação na melhoria contínua de processos industriais. Dessa forma, ao permitir a coleta, análise e simulação de dados em tempo real, o Gêmeo Digital possibilita não apenas o monitoramento e diagnóstico de sistemas produtivos, mas também a antecipação de falhas e a otimização do desempenho operacional. Essa capacidade de replicar virtualmente os processos reais favorece intervenções mais rápidas e decisões baseadas em dados, elementos essenciais para a prática da melhoria contínua nas indústrias. Assim, o Gêmeo Digital se destaca como um recurso que fortalece a busca pela eficiência, flexibilidade e sustentabilidade, alinhando-se aos princípios da Indústria 4.0 e da filosofia *lean* (Da Silva, 2024).

Gêmeo Digital e ODS

A tecnologia de Gêmeos Digitais transcende a indústria 4.0, impactando diversos setores de forma inovadora e disruptiva (Piromalis, 2022). Além de fortalecer a infraestrutura industrial e promover inovação, o GD possibilita o desenvolvimento de cadeias produtivas mais circulares e responsáveis, alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da economia verde. Nesse sentido, a tecnologia tem papel estratégico para a construção de indústrias mais inovadoras e sustentáveis (Alnaser; Binabid; Sepasgozar, 2024). Sua capacidade de monitoramento e simulação permite a otimização de processos, redução de emissões, menor desperdício e maior eficiência energética, contribuindo diretamente para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Ao associar sua aplicação ao desenvolvimento sustentável, o GD se mostra uma ferramenta estratégica para a concretização de Objetivos de Desenvolvimento Sustentável estabelecidos pela ONU. Em especial, destaca-se sua relevância para o ODS 9, que busca promover a construção de infraestrutura otimizada e fomentar a industrialização inclusiva e sustentável, e para o ODS 12, voltado à garantia de padrões sustentáveis de produção e consumo (Santos *et al.*, 2024).

A necessidade de alinhar as operações aos ODS vai além do cumprimento de normas, representando uma demanda estratégica por transparência e responsabilidade. Nesse contexto, é crucial que as ações de sustentabilidade sejam genuinamente integradas à estratégia empresarial, superando iniciativas pontuais ou que apenas visam à certificação. O risco de práticas superficiais, por vezes questionadas quanto à sua real efetividade, evidencia a necessidade de ferramentas que possam validar e quantificar o impacto ambiental e social das operações (Pimenta; Sindelar; Périco, 2023). O Gêmeo Digital

surge precisamente como essa ferramenta de validação, permitindo que a sustentabilidade não seja apenas um discurso, mas uma prática mensurável e otimizável.

A contribuição do Gêmeo Digital para o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) se manifesta na intersecção da inovação tecnológica com a sustentabilidade. A Indústria 4.0, frequentemente impulsionada por políticas de fomento governamental, fornece as ferramentas para a criação de uma infraestrutura mais resiliente e uma industrialização mais limpa (Rodrigues *et al.*, 2020).

Nesse ecossistema, o Gêmeo Digital emerge como uma aplicação prática da inovação em prol da sustentabilidade ambiental, permitindo a simulação de processos e o desenvolvimento de produtos mais sustentáveis antes mesmo de sua implementação física (Pimenta; Sindelar; Périco, 2023). A tecnologia possibilita, por exemplo, o monitoramento contínuo e a manutenção preditiva de ativos, práticas que aumentam a eficiência operacional e a longevidade da infraestrutura, alinhando-se diretamente aos princípios da Manufatura Verde que visam otimizar processos e reduzir o impacto ambiental (Schreiber; Haubert, 2023).

No que tange ao ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), o Gêmeo Digital é a ferramenta que operacionaliza os princípios da Manufatura Verde. Essa abordagem produtiva – que se concentra em mitigar o impacto ambiental por meio da gestão do ciclo de vida do produto, da redução do consumo de recursos e da minimização de resíduos – encontra na tecnologia a sua execução prática.

O Gêmeo Digital torna esses objetivos tangíveis ao permitir a aplicação do *ecodesign*, onde as empresas podem simular virtualmente o uso de materiais reciclados ou projetar produtos para facilitar a desmontagem e a reciclagem, práticas de inovação essenciais para a sustentabilidade

(Pimenta; Sindelar; Périco, 2023). Adicionalmente, ao espelhar o processo produtivo, a tecnologia oferece um controle preciso sobre o consumo de água e energia, viabilizando a otimização contínua que está no cerne da produção responsável e da análise do ciclo de vida (Schreiber; Haubert, 2023).

A adoção do Gêmeo Digital e de outras tecnologias da Indústria 4.0 não ocorre de forma isolada, sendo significativamente influenciada por um ecossistema de apoio que inclui políticas e iniciativas governamentais efetivas. Programas de investimento, incentivos fiscais e parcerias público-privadas são fundamentais para alinhar o desenvolvimento industrial às metas globais de sustentabilidade. Conforme aponta a literatura, é por meio de uma "boa governança" que a Quarta Revolução Industrial pode promover o desenvolvimento sustentável. Ao fomentar a digitalização, essas políticas capacitam as indústrias com as ferramentas necessárias para que a transição para uma economia mais verde, eficiente e socialmente responsável se torne uma realidade (Rodrigues *et al.*, 2020).

Fica evidente, portanto, que o Gêmeo Digital transcende sua definição puramente técnica a fim de se tornar uma das principais ferramentas dessa transição para uma economia mais responsável. Ao longo deste capítulo, exploramos as três dimensões que validam sua importância: o seu conceito fundamental como réplica virtual dinâmica; o impulso de um mercado em franca expansão que confirma sua relevância econômica; e, crucialmente, sua profunda sinergia com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Demonstrou-se que a relação entre a tecnologia e a sustentabilidade não é apenas possível, mas estratégica.

Contudo, para transformar esse imenso potencial em realidade prática, é fundamental ir além do "o quê" e do "porquê", e mergulhar no "como". É preciso destrinchar seus componentes e sua lógica operacional. Por isso, os próximos capítulos

se dedicam a essa jornada técnica, detalhando os pilares de sua construção, as fontes de dados que o alimentam e o vasto leque de suas aplicações práticas, oferecendo um guia para a compreensão e implementação desta que é uma das mais promissoras tecnologias da nossa era.

Referências

ALI, A. *et al.* Digital twins: cornerstone to circular economy and sustainability goals. **Environment, Development and Sustainability**, 2025. No prelo.

ALNASER, A. A.; BINABID, J.; SEPASGOZAR, S. M. E. Transforming architectural programs to meet Industry 4.0 demands: SWOT analysis and insights for achieving Saudi Arabia's strategic vision. **Buildings**, Basel, v. 14, n. 12, p. 4005, 2024. DOI: 10.3390/buildings14124005.

ATTARAN, M.; CELIK, B. G. Digital twin: benefits, use cases, challenges, and opportunities. **Decision Analytics Journal**, v. 6, p. 100165, 2023. DOI: 10.1016/j.dajour.2023.100165.

ATTARAN, M.; ATTARAN, S.; CELIK, B. G. The impact of digital twins on the evolution of intelligent manufacturing and Industry 4.0. *Advances in Computational Intelligence*, v. 3, n. 3, p. 11, 2023.

CÂMARA, F. A. A digitalização e a descentralização da produção na Indústria 4.0: digital twin. 2023. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2023.

CEOLLA, S. Indústria 4.0 e o ODS 9: tecnologias auxiliam empresas. **Revista Indústria 4.0**, 18 out. 2021. Disponível em: <https://www.industria40.ind.br/noticias/21755-tecnologias-industria-40-auxiliam-empresas-cumprirem-objetivos-desenvolvimento-sustentavel>. Acesso em: 26 jun. 2025.

DENG, X. *et al.* Sustainable innovations in digital twin technology: a systematic review about energy efficiency and indoor

environment quality in built environment. **Frontiers in Built Environment**, 2025. No prelo.

DITZEL, L. F. S. *et al.* Digital twin na manufatura: uma revisão sistemática da literatura. **Brazilian Journal of Development, Curitiba**, v. 6, n. 9, p. 66183–66197, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n9-158.

FULLER, A. *et al.* Digital Twin: enabling technologies, challenges and open research. **Cornell University**, 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1911.01276>. Acesso em: 25 jun. 2025.

GRIEFER, M. *et al.* A review of digital twin technologies for enhanced sustainability in the construction industry. **Buildings**, Basel, v. 12, n. 8, p. 1248, 2022. DOI: 10.3390/buildings12081248.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura**. Brasília, DF: IPEA, [s. d.]. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods9.html>. Acesso em: 25 jun. 2025.

MOHAN, D.; HEIMANN, V. Mapping the links between Industry 4.0, Circular Economy and Sustainability: a systematic literature review. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 34, n. 5, p. 1399–1423, 2021. DOI: 10.1108/JEIM-09-2020-0373.

MOSHOOD, T. D. *et al.* Infrastructure digital twin technology: a new paradigm for future construction industry. **Technology in Society**, v. 77, p. 102519, 2024. DOI: 10.1016/j.techsoc.2024.102519.

PIMENTA, A. A.; SINDELAR, F. C. W.; PÉRICO, E. Indústria calçadista brasileira: uma análise das práticas sustentáveis de empresas certificadas pelo selo Origem Sustentável. **RGSA-Revista de Gestão Social e Ambiental**, Miami, v. 17, n. 3, p. e03290, 2023. DOI: 10.24857/rgsa.v17n3-021.

QI, Q. *et al.* Enabling technologies and tools for digital twin. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 58, p. 3–21, jan. 2021. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.10.001.

RODRIGUES, T. V. *et al.* Iniciativas governamentais 4.0: um comparativo entre as políticas de inovação industrial para a Indústria 4.0. **Revista Gestão e Desenvolvimento**, Novo Hamburgo, v. 18, n. 1, p. 119–147, jan./abr. 2021. DOI: 10.25112/rgd.v18i1.2411.

SANTOS, D. *et al.* Perspectivas e desafios da sustentabilidade na era da Indústria 4.0. **Revista Sistemática**, v. 14, n. 7, p. 128–142, nov. 2024.

SCHREIBER, D.; HAUBERT, B. A adoção de tecnologias da Indústria 4.0 para fomentar práticas de manufatura verde. **Revista FSA**, Teresina, v. 20, n. 11, p. 3–18, nov. 2023. DOI: 10.12819/2023.20.11.1.

SILVA, A. C. O. Digital twin: um aliado da simulação à melhoria contínua industrial. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade do Minho, Guimarães, 2024.

ZHANG, Y. *et al.* Innovative approaches to green digital twin technologies of sustainable smart cities using a novel hybrid decision-making system. **Journal of Innovation & Knowledge**, v. 10, p. 100529, 2025. No prelo. DOI: 10.1016/j.jik.2024.100529.



Conceitos e arquitetura de Gêmeo Digital

João Pedro Silva Nascimento
Andressa Clara Barbosa de Araujo
Cristiane Agra Pimentel

Uma arquitetura de dados não é somente uma estruturação básica de seu código ou de seu banco de dados. Ela define a coleta, armazenagem, processamento, gerenciamento, integração e utilização dos dados em um sistema ou organização, ela serve como um molde para a infraestrutura de todo o projeto, e orienta uma equipe para que trabalhe em uníssono no que tange ao Gêmeo Digital.

Gêmeos Digitais (GD) podem contribuir para a melhoria de edificações em qualquer estágio no qual se encontrem, porém, um grande desafio em desenvolvê-los, é elaborar um modelo de dados e plataformas que podem hospedá-los e prover acesso para uma variedade de dados e modelos (Bühler *et al.*; 2022). Dessa forma, é evidente que uma arquitetura de dados bem definida é essencial para que um modelo de Gêmeo Digital funcione apropriadamente, sendo imperativa a sua concepção desde o início do projeto, pois em um GD, um fluxo de dados ininterrupto é um aspecto primordial para o seu funcionamento.

Conforme Bühler *et al.* (2022), atualmente há uma escassez de aplicações, bibliotecas e Interface de Programação de Aplicações (APIs) que podem trabalhar com Gêmeos Digitais ou processamento de dados *real-time* (tempo real). Consequentemente, a criação de uma plataforma para hospedagem de Gêmeos Digitais pode suprir essa escassez, trazendo uma simplificação ao processo, integrando sensores *IoT* (Internet das Coisas) ao GD e, por fim, automatizando também a análise avançada desses dados.

Fundamentos e componentes essenciais do sistema

Um Gêmeo Digital é um modelo digital de um objeto físico particular ou um processo conectado a um conjunto de dados que converge entre estados físicos e virtuais a uma taxa de sincronização apropriada. Desse modo, um Gêmeo Digital inclui uma infraestrutura, um conjunto de algoritmos, ferramentas de *software*, procedimentos, documentação, com a ajuda através da qual os dados são processados autonomamente desde a observação até a tomada de decisão (Viazilov *et al.*; 2022). Portanto, a arquitetura de dados de um Gêmeo Digital não somente abrange o modelo em si, mas todo o processo, desde a captação dos dados até o processo de tomada de decisões.

Para uma arquitetura de dados, é imprescindível que os objetos da vida real sejam traduzidos em dados de forma que o modelo computacional os compreenda. Essa representação virtual funciona como uma contraparte digital em tempo real de um objeto ou processo físico (Lewis *et al.*, 2023). Um Gêmeo Digital pode ser definido como uma representação realista de algo físico (Yan *et al.*, 2019) e, em um contexto mais técnico, é um modelo digital de um objeto ou processo físico específico, com conjuntos de dados conectados que convergem entre os estados físico e virtual a uma taxa de sincronização apropriada (Viazilov *et al.*, 2023; Lewis *et al.*, 2023).

Dessa forma, entidades físicas, frequentemente chamadas de objetos, possuem parâmetros (Bühler *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2022; Steiner *et al.*, 2023). Em diversos modelos de dados, como o SIMULTAN, os componentes atuam como contêineres para esses parâmetros (Bühler *et al.*, 2022; Steiner *et al.*, 2023). A depender da complexidade e da necessidade do modelo computacional, os objetos a serem referenciados e seus respectivos parâmetros irão mudar (Li *et al.*, 2022; Steiner *et al.*, 2023; Viazilov *et al.*, 2023). O escopo dos parâmetros em um

modelo de dados depende muito de seu cenário de aplicação (Chen *et al.*, 2022).

A unidade básica de gerenciamento de dados deve ser o menor objeto relevante para o contexto do mundo real que está sendo modelado (Viazilov *et al.*, 2023). Em um Gêmeo Digital de uma ferrovia, por exemplo, as características a serem representadas (pessoal, máquina, material, método e ambiente) são determinadas de acordo com as diferentes etapas do ciclo de vida do projeto e seus requisitos práticos (Li *et al.*, 2022). Assim, em um Gêmeo Digital de uma rodovia, os parâmetros das pessoas que a conduzem podem ser irrelevantes, sendo o menor objeto, ou instância, um carro, uma moto ou um caminhão.

Concluindo, um Gêmeo Digital deve possuir:

- Um objeto ou um processo físico;
- Um modelo/representação virtual do objeto ou processo;
- Dados em tempo real;
- Um mecanismo de sincronização entre os estados físico e virtual.

Integração com outras tecnologias

Para uma arquitetura de dados operante, integra-se o Gêmeo Digital a diversas tecnologias, tais como:

- Sensores/Internet das Coisas (*IoT*)
Sensores são essenciais para a coleta de dados relativos ao objeto ou processo físico, suas respectivas entidades e dados relevantes ao modelo computacional.
- BIM/GIS
A modelagem de informações da construção (BIM) é um modelo digital que representa os componentes de um projeto de engenharia, como edifícios ou infraestruturas permitindo a visualização, análise e gerenciamento de

informações durante todas as fases do ciclo de vida da construção. Ele fornece uma representação detalhada e precisa dos elementos construtivos, facilitando o planejamento, a coordenação e a execução de obras (Li *et al.*; 2022);

O sistema de informação geográfico (GIS) é um sistema de informações geográficas que integra, armazena, analisa e apresenta dados espaciais e temporais relacionados a um determinado lugar (Li *et al.*; 2022).

- Inteligência artificial (IA) e *Machine Learning* (ML)
Algoritmos de IA e ML podem ser utilizados para análise preditiva e previsões precisas, detecção de anomalias, suporte avançado a tomadas de decisão e podendo automatizar processos complexos (Li *et al.*; 2022).
- Cloud computing
A computação em nuvem fornece a infraestrutura necessária para criar, operar e escalar Gêmeos Digitais, facilitando a integração entre sensores e um modelo computacional de simulação (Nicolai *et al.*; 2024).

Arquitetura de dados de um Gêmeo Digital

Para que um Gêmeo Digital — uma representação virtual que serve como contraparte em tempo real de um objeto ou processo físico (Lewis *et al.*, 2023) — seja efetivo, é essencial a criação de uma arquitetura de dados robusta e bem definida para lidar com a complexidade dos processos de planejamento (Steiner *et al.*, 2023). O desenvolvimento de um modelo de dados abrangente é um desafio central, pois ele precisa ser capaz de armazenar e fornecer acesso a uma vasta gama de informações, como dados de geometria, engenharia de sistemas, sensores e parâmetros de simulação (Bühler *et al.*, 2022). Uma arquitetura bem-sucedida deve superar o desafio

da interoperabilidade entre dados e sistemas, que frequentemente utilizam formatos e padrões distintos e proprietários (Bühler *et al.*, 2022; Calvetti *et al.*, 2024). A seguir, são apresentados os princípios gerais que norteiam a construção de uma boa arquitetura de dados para um Gêmeo Digital.

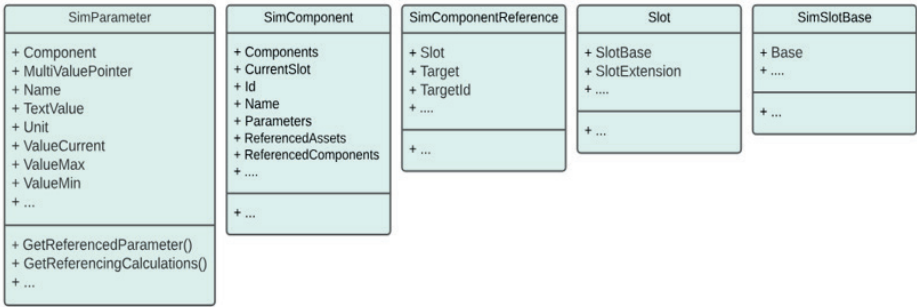
Princípios gerais de uma boa arquitetura de dados em um Gêmeo Digital:

- Uma entidade de coleta de dados (sensores) sobre cada item necessário para o desenvolvimento do Gêmeo Digital.
- A unidade básica de gerenciamento de dados deve ser um objeto mínimo do sistema/objeto, com uma estrutura padronizada em diferentes níveis a depender da necessidade de cada modelagem (Viazilov *et al.*; 2022).
- A criação de um dicionário unificado de parâmetros (UDP) (Viazilov *et al.*; 2022) que inclui atributos de metadados, nomes de atributos, unidades de medida e formatos de armazenamento dos parâmetros, similarmente como uma classe que define um objeto, tal qual linguagens como Java, Python e muitas outras permitem tal implementação.
- Um esquema de armazenamento unificado para todos os itens (Viazilov *et al.*; 2022), ou seja, um banco de dados centralizado que lida com todas as informações, de modo que os dados relacionados não se percam e muito menos tragam uma dificuldade maior ao processamento desses dados.
- Preservar a relação entre instâncias de diferentes objetos (Viazilov *et al.*; 2022), objetos em diferentes cenários devem ser capazes de interagir entre si, de modo que não se perca informações em cada cenário proposto.
- Um programa computacional capaz de simular a situação desejada de modo que não se sobreponha aos itens propostos acima.

- Um programa/sistema computacional de modo que os dados sejam analisados analiticamente para melhoria contínua do processo/objeto físico.

O SIMULTAN é um modelo de dados flexível, no qual uma ampla variedade de modelos complexos pode ser criada usando componentes (*SimComponents*), parâmetros (*SimParameter*), referências a componentes (*SimComponentReference*) ou parâmetros e slots (*Slot* e *SimSlotBase*) (Bühler et al., 2022), a Figura 1 mostra a essência do SIMULTAN.

Figura 1: Classes da SIMULTAN, que permitem a criação de modelos complexos.

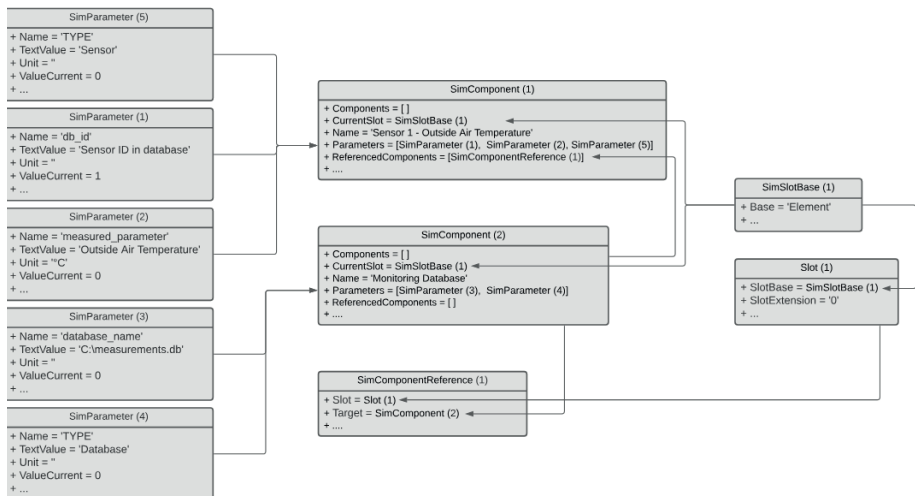


Fonte: Viazilov et al. (2022).

Como o SIMULTAN não possui uma estrutura única, tornando-a extremamente flexível, de modo que inicialmente não é possível identificar os dados sem o criador da arquitetura, na Figura 2 há um exemplo de um modelo de dados SIMULTAN com um sensor e um banco de dados. Onde, para o banco de dados, foi criado um componente (*SimComponent 2*) que possui dois parâmetros: o banco de dados (*SimParameter 4*), e onde está localizado o banco de dados (*SimParameter 3*), e para o sensor também foi criado um componente (*SimComponent 1*), dessa vez com três parâmetros: o sensor (*SimParameter 5*), seu ID no banco de dados (*SimParameter 1*) e a

medição do sensor (*SimParameter* 2). Nota-se que os parâmetros 4 e 5 foram criados somente para serem usados como referência para o banco de dados e para o sensor, conhecidos como parâmetros de tipo.

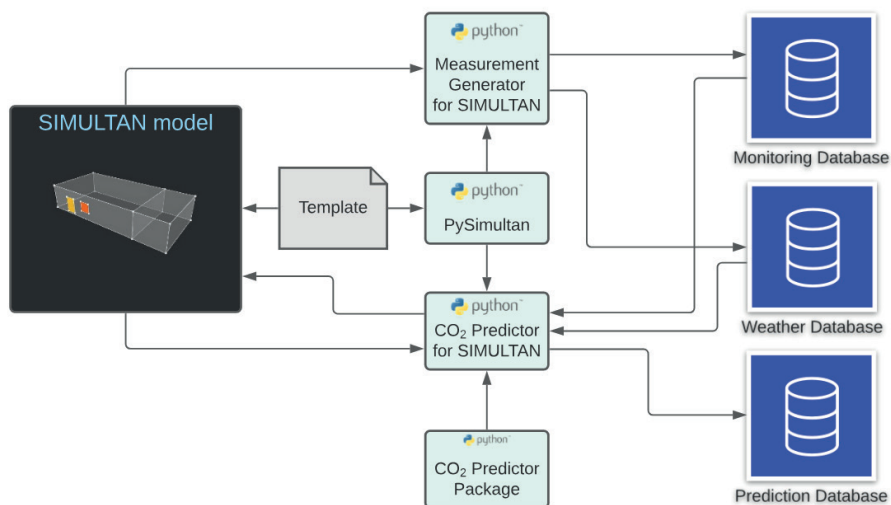
Figura 2: Instâncias de Classe de um modelo SIMULTAN com um sensor e um banco de dados.



Fonte: Bühler *et al.* (2022).

Na Figura 3, Bühler *et al.* (2022) traz uma estrutura para uma aplicação de Gêmeo Digital como prova de conceito, um algoritmo preditivo de CO₂ existente escrito em Python será usado para verificar a concentração de CO₂ em uma sala fechada com dados em tempo real.

Figura 3: Modelo SIMULTAN na prática para análise de concentração de CO₂ em uma sala fechada.



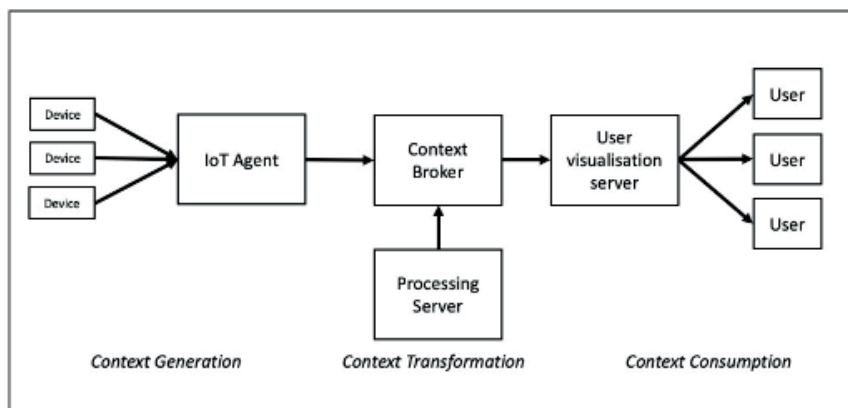
Fonte: Bühler *et al.* (2022).

À esquerda estão localizados os bancos de dados, onde estão localizados, respectivamente, os dados de monitoramento em tempo real, os dados do clima do local e os dados para o algoritmo de predição; na camada intermediária estão os algoritmos em Python, respectivamente, o algoritmo para importação dos dados dos sensores, o SIMULTAN feito em Python para correlacionar e centralizar tudo, o algoritmo preditivo para o SIMULTAN e o algoritmo preditivo base; e, por fim, à esquerda está o modelo computacional.

O FIWARE descreve a si mesmo como uma estrutura organizada de componentes de plataforma de código aberto, baseada em várias especificações NGSI e um conjunto de modelos de dados inteligentes, com um corretor de contexto formando o núcleo de uma arquitetura de Gêmeo Digital (Lewis *et al.*, 2022).

A Figura 4 detalha um sistema de Gêmeo Digital baseado na arquitetura de dados FIWARE e destaca três processos-chave: inicialmente, os contextos são gerados por um agente *IoT* que coleta dados de dispositivos como sensores, e os armazena em um *Context Broker* (Corretor de contexto). O *Context Transformation* (transformação de contexto) descreve processos que usam contextos pré-existentes para criar novos contextos ou modificar os existentes, enquanto o *Context Consumption* (Consumo de contexto) descreve processos que usam os contextos já existentes para exibir as informações aos seus usuários.

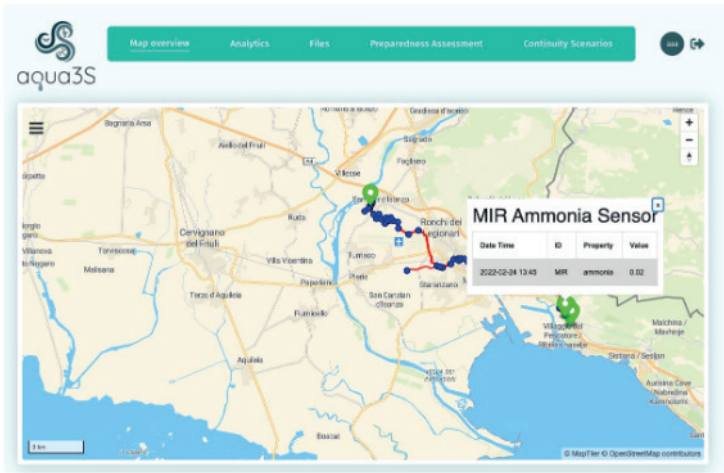
Figura 4: Um exemplo de um Gêmeo Digital no modelo FIWARE.



Fonte: Lewis *et al.* (2022).

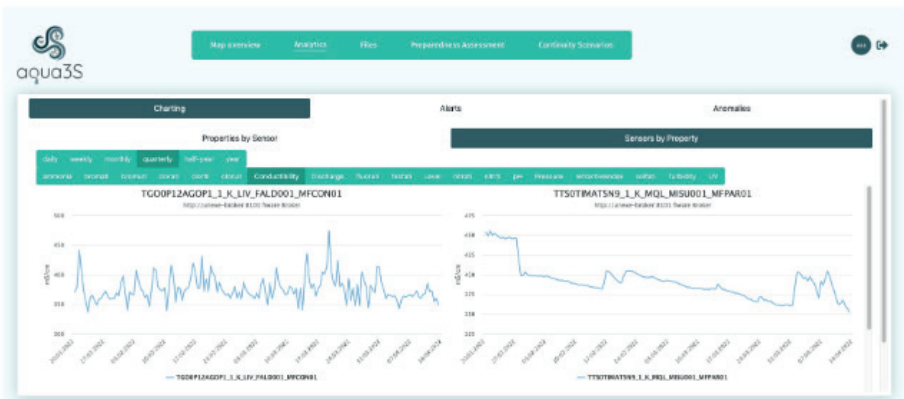
Para o projeto da aqua3s, um Gêmeo Digital foi desenvolvido usando a arquitetura FIWARE, onde sensores posicionados na rede de água na cidade de Trieste, na Itália, conforme Figura 5. Os usuários do Gêmeo Digital foram os funcionários da empresa SCADA que utilizaram os dados processados para acessar o estado da rede de água e auxiliar nas tomadas de decisão da equipe, e na Figura 6 é possível visualizar os dados gerados e processados pelos sensores.

Figura 5: Dados dos sensores visualizados via maplibre.



Fonte: Lewis et al. (2022).

Figura 6: Dados históricos dos sensores para visualização da equipe de funcionários.



Fonte: Lewis et al. (2022).

No geral o FIWARE é um modelo de arquitetura simples, feito para Gêmeos Digitais simples que não querem complicar o seu processo. Em comparação com o SIMULTAN, é notório que este possui maior flexibilidade e escalabilidade comparado ao FIWARE, que também possui o seu valor.

Referências

LEWIS, G. *et al.* Developing water monitoring solutions with FIWARE defining, creating, populating, and extending digital twins. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROINFORMATICS, 14., 2022, Cidade do México. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. Bristol: IOP Publishing, 2023. v. 1136, n. 1, art. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/1136/1/012003.

BÜHLER, M.; STEINER, B.; BEDNAR, T. Digital Twin applications using the SIMULTAN data model and Python. In: WORLD BUILDING CONGRESS, 2022, Melbourne. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. Bristol: IOP Publishing, 2022. v. 1101, n. 8, art. 082015. DOI: 10.1088/1755-1315/1101/8/082015.

VIAZILOV, E. D. *et al.* Choosing a Data Model for the Digital Twin of Environment. **Lobachevskii Journal of Mathematics**, Moscow, v. 44, n. 1, p. 237-248, jan. 2023. DOI: 10.1134/S1995080223010444.

CHEN, S. *et al.* Implementation and Test of an IEC 61850-Based Automation Framework for the Automated Data Model Integration of DES (ADMID) into DSO SCADA. **Energies**, v. 15, n. 4, p. 1552, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15041552>.

LI, H. *et al.* Integrated representation of geospatial data, model, and knowledge for digital twin railway. **International Journal of Digital Earth**, v. 15, n. 1, p. 1657-1675, out. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2127949>.

YAN, J. *et al.* The LADM-based 3D underground utility mapping: case study in Singapore. In: 3D GEOINFO CONFERENCE, 14., 2019, Singapore. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-4/W15, p. 117-122, 2019. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W15-117-2019.

CALVETTI, D. *et al.* Linked data to streaming data sensors sources for direct access. **Brazilian Journal of Operations and**

Production Management, v. 21, n. 1, p. e20241993, 2024. DOI: 10.14488/BJOPM.1993.2024.

NICOLAÏ, N.; VILLEZ, K.; PLANA, Q. Structuring and storing signals with their metadata: practical considerations. In: MARTÍNEZ, L. M. *et al.* (Ed.). *Big Data in Waste Management: A Digital Transformation of the Industry*. **London: IWA Publishing**, 2021. p. 69–95. DOI: 10.2166/9781789061154_0069



Confiabilidade de dados

*João Vítor Siqueira Fonseca
Andressa Clara Barbosa de Araujo
Cristiane Agra Pimentel*

Nos tempos atuais, inúmeras organizações têm movimentado uma enorme quantidade de dados em todo o mundo, o que representa grande valor para cada setor com seus objetivos específicos. Situações como dados de transações financeiras, desejos e compras recorrentes de consumidores, reações adversas a medicamentos, formam banco de dados valiosos para os fabricantes e prestadores de serviços, levando a análises e previsões fundamentais para o crescimento da sociedade, no entanto, tornar esses dados públicos, gera um risco de privacidade e exposição dos indivíduos. Com isso, esses dados podem levar a análises e previsões fundamentais para o crescimento da sociedade, porém a liberação gera um risco de privacidade e exposição dos indivíduos (Brito e Machado, 2017).

Neste contexto Fernandes e Nuzzi (2022), falam sobre o crescimento exponencial do volume de dados que exigiu a criação de controles para garantir o respeito aos direitos e à privacidade. Por isso, assim como aconteceu na União Europeia, em 2018 o Brasil criou a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD), um marco que regula e determina os direitos dos cidadãos sobre seus dados. De todo modo, a proteção de dados é resumida na proteção do ser humano, resguardando informações pessoais. A LGPD foi baseada em um dos modelos mais completos mundialmente, a *General Data Protection Regulation* (GDPR), criada na Europa.

O cenário contemporâneo de proteção de dados é caracterizado por avanços tecnológicos que ampliam exponencial-

mente o volume e a complexidade das informações trafegadas e armazenadas em ambientes digitais. Esse contexto impõe desafios inéditos à privacidade, exigindo das organizações não apenas a conformidade com legislações como a LGPD e a GDPR, mas também a implementação de práticas robustas de segurança da informação e governança de dados.

Conforme destacam Araújo Neto e Aguiar (2024), a conformidade regulatória reforça a confiança dos usuários e preserva os dados dos colaboradores, configurando-se como elemento central para a sustentabilidade das operações em um ambiente cada vez mais orientado por dados. Ademais, a literatura enfatiza que a privacidade de dados deve ser compreendida como um direito fundamental, cuja efetividade depende tanto de políticas institucionais quanto de controles técnicos, como anonimização e criptografia, para garantir que os dados pessoais não sejam expostos ou utilizados indevidamente. A expansão de tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas e a inteligência artificial, amplia ainda mais o espectro de riscos, demandando a atualização constante das estratégias de proteção. Dessa forma, a confiabilidade dos dados torna-se um dos pilares essenciais para a inovação responsável e para a manutenção da confiança social nas relações digitais.

Santos e Vanz (2023) falam sobre os aspectos relacionados à autenticidade, proveniência e integridade, essenciais para assegurar que os dados não foram adulterados ou corrompidos ao longo de seu ciclo de vida. Essa dimensão implica a implementação de mecanismos que garantam a rastreabilidade das fontes e a autenticidade dos registros, promovendo transparência e segurança na sua utilização. A dimensão da confiabilidade envolve, ainda, a aderência às boas práticas de gestão, metadados bem estruturados e a proteção contra ameaças de segurança, de modo a manter a integridade e

acessibilidade dos dados ao longo do tempo. Assim, a confiabilidade não só assegura a qualidade técnica dos dados, mas também sustenta sua credibilidade como base fundamentada para a pesquisa, a tomada de decisão e o desenvolvimento de políticas, promovendo uma cultura de confiança e uso responsável das informações.

Com isso, é necessário explorar a confiabilidade dos dados em um cenário onde a movimentação massiva de informações gera tanto valor quanto desafios significativos de privacidade e segurança. Compreender como assegurar a precisão e a integridade desses dados é fundamental para que as análises e previsões geradas contribuam efetivamente para o crescimento social e setorial, sem comprometer os direitos individuais.

Sendo assim, os objetivos deste capítulo são entender os conceitos e as dimensões da confiabilidade de dados, analisar a importância da confiabilidade dos dados diante do volume crescente e dos riscos associados à privacidade, bem como discutir cases de sucesso e a relevância de regulamentações como a LGPD e a GDPR para a gestão responsável e segura das informações.

Fundamentos da Confiabilidade dos Dados

No Seminário do *Nordic Council for Scientific Information and Research Libraries* – NORDINFO, em 1989, o conceito de qualidade da informação foi debatido pela primeira vez, em Copenhagem, Dinamarca. O debate aconteceu entre Donald Marchand, Miriam Ginman e Johan Olaisen que conversaram e propuseram dimensões sobre o conceito. Calazans (2008) cita que Donald Marchand propôs cinco pontos sobre a qualidade dos dados:

- Transcendente: refere-se à excelência, pautando o valor da informação como absoluta e totalmente conhecida,

intrínseca à informação (ex: poemas, fórmulas matemáticas);

- Baseada no usuário: a qualidade depende da utilidade e julgamento do usuário, de acordo com sua necessidade, sendo subjetiva e difícil de padronizar;
- Baseada no produto: foca em atributos mensuráveis e objetivos da informação em termos precisos, considerando a informação enquanto coisa;
- Baseada na produção: relaciona qualidade ao grau de adequação aos padrões dos usuários;
- Qualidade como aspecto do valor: a qualidade é vista como um dos componentes do valor da informação, que é pautado como a parte mais abrangente.

Além disso, Marchand identificou oito dimensões da qualidade da informação, fundamentais para o gerenciamento estratégico: Valor atual para o usuário, Características suplementares (como precisão e abrangência), Confiabilidade, Significado, Relevância, Validade, Estética e Percepção de valor. Esses conceitos ajudam a entender como a informação pode ser avaliada e gerida de forma eficaz em contextos organizacionais.

Com isso, a confiabilidade dos dados refere-se à qualidade que garante que as informações sejam consistentes, precisas e estáveis ao longo do tempo, refletindo adequadamente a realidade observada e permitindo decisões confiáveis. Essa dimensão envolve a estabilidade, a precisão e a correspondência entre os dados registrados e as condições observadas no campo, sendo fundamental para fundamentar projetos e tomar as decisões baseadas em dados confiáveis. Ademais, a confiança nos dados indica o grau em que os dados podem ser considerados fiéis, livres de erros ou distorções (Rocha *et al.*, 2018).

Embora a proteção, a movimentação e a confiança dos dados já tenham sido abordadas, é importante destacar o conceito fundamental de dado, conforme apresentado por Moreira, Beira e Oliveira (2020). Dados são observações sobre o estado do mundo, compostos por fatos em estado bruto a partir dos quais podem ser extraídas conclusões. Eles englobam desde textos, números, imagens, sons e animações até objetos físicos como cartas, livros e documentos, sendo considerados elementos sem significado intrínseco e desvinculados da realidade, funcionando como matéria-prima da informação. Os dados podem ser representações simbólicas, quantificadas ou quantificáveis, e classificados em estrutura — organizados em linhas e colunas — ou não estruturados, que fogem desse padrão e são mais difíceis de processar por sistemas computacionais.

Fatores que afetam os dados

Com o aumento do volume de dados e a crescente dependência para a tomada de diversas decisões é imprescindível entender os fatores que influenciam e afetam a qualidade dos dados. Segundo a norma NBR ISO 8402, o conceito de qualidade está pautado como a totalidade das características de algo que o torna capaz de atender às necessidades claras e não ditas. Nesse sentido, Lima *et al.* (2009), afirma que a qualidade de uma informação é garantia e uma necessidade para que ocorra uma boa análise e que as tomadas de decisões sejam pautadas em evidências.

Por outro lado, Paim (1996) fala que o conceito de qualidade atribuído à propriedade ou a expectativas do cliente, além do dogma pautado na ISO, apresentam superficialidade e inconsistência no conceito de qualidade, tais características ainda perpassam para o tema da qualidade da informação,

sendo utilizado apenas para fins gerenciais, no qual acredita ser um tema de categoria multidimensional, porém aponta uma falta de unidade quanto ao conceito de qualidade, por fim uma demonstração da ambiguidade é a utilização de valor muitas vezes como sinônimo de qualidade.

Com isso, Calazans (2008) afirma que o impacto na falta de qualidade dos dados para uma organização acarretará impactos negativos, que devem ser identificados e as medidas com soluções devem ser tomadas. Ainda sobre isso, o autor cita fatores que afetam a qualidade dos dados, como:

- Múltiplas origens de informação, o que pode gerar inconsistências;
- Utilização de julgamentos subjetivos na produção da informação, levando a possíveis vieses;
- Erros sistemáticos na produção da informação, que comprometem sua confiabilidade;
- Armazenamento em grande quantidade, que pode dificultar o gerenciamento e a manutenção da qualidade dos dados.

Esses fatores contribuem para a diminuição da qualidade da informação, impactando sua confiabilidade e utilidade no contexto organizacional. Oletto (2006) fala sobre aspectos relacionados à qualidade da informação como: relevância, utilidade, eficiência na recuperação, confiabilidade e abrangência, que caso sejam deficientes impactam na qualidade dos dados. Ademais, ainda afirma que o entendimento sobre a qualidade da informação afeta na percepção da qualidade dos dados, caso o conceito esteja baseado no senso comum ou de forma rasa, afeta nas avaliações e escolha dos dados. Com isso, é necessário identificar a relevância e necessidade do usuário, a compreensão dos atributos relacionados à qualidade e uma melhor definição, visando ter conceitos claros.

Dentre os modelos consolidados, destacam-se as categorias e dimensões conforme sintetizado na Tabela 1. Calazans (2008) fala sobre a compreensão da qualidade da informação pode ser aprimorada a partir da identificação de fatores que influenciam diretamente sua percepção e uso nas organizações.

Tabela 1: Fatores que afetam a qualidade da informação.

Categoria	Dimensões associadas
Intrínseca	<i>Accuracy</i> , objetividade, credibilidade, fidedignidade
Contextual	Relevância, valor agregado, atualidade, completude, valor apropriado
Representacional	Interpretabilidade, facilidade de entendimento, representação concisa e consistente
Acessibilidade	Acessibilidade, segurança

Fonte: Adaptado de Calazans (2008).

Em relação aos atributos das operações que influenciam na qualidade dos dados, Calazans (2008) ainda cita sobre alguns pontos importantes, relacionados a fatores internos e externos, sendo relacionados a processos e percepções que interferem na qualidade dos dados. Os pontos citados foram:

- Propósito das operações, onde o uso dos dados precisa está diretamente relacionado ao objetivo de cada processo, o que influencia na qualidade;
- Percepções diferentes, em cada indivíduo pode avaliar a qualidade de uma forma diferente de acordo com sua necessidade;
- Expectativas e preferências do consumidor, caso o indivíduo já analise os dados com parcialidade.

Esses elementos comprovam a complexidade do gerenciamento da qualidade de dados nas organizações, deman-

dando abordagens específicas para cada área. Com isso, é de suma importância compreender os fatores que influenciam os dados, como multiplicidade na origem dos dados, erros sistemáticos, imparcialidade e dificuldade no gerenciamento da quantidade de informações são pontos que podem impactar diretamente na análise e tomada de decisão, sendo essencial considerar atributos individuais sobre a qualidade de dados, sempre alinhado com o objetivo da organização.

Avaliação da confiabilidade dos dados

A confiabilidade dos dados e repositórios de pesquisa são essenciais para garantir a integridade, acessibilidade e reutilização das informações científicas. Para isso, são adotadas práticas como autoavaliação interna, revisões por pares e certificações com base em critérios internacionais, como o *Core Trust Seal*, que define 16 requisitos voltados à boa gestão dos dados, segurança, transparência e conformidade com princípios como o FAIR, que orientam que os dados de pesquisa sejam *Findable* (localizáveis), *Accessible* (acessíveis), *Interoperable* (interoperáveis) e *Reusable* (reutilizáveis) para promover sua gestão eficiente e uso confiável. A qualidade dos dados é reforçada por meio de metadados ricos, indexação eficiente e referência adequada, facilitando a descoberta e a interoperabilidade. Avaliações periódicas de risco também são fundamentais para identificar e mitigar vulnerabilidades técnicas e de segurança (Santos e Vanz, 2023).

Com isso, os tópicos de avaliação e o seu respectivo resumo estão dispostos abaixo Tabela 2.

Tabela 2: Tópicos de avaliação e o resumo.

Tópico	Resumo
1. Autoavaliação Interna	Verificação feita pela equipe do repositório para conferir boas práticas e identificar melhorias.
2. Revisão por Pares	Avaliação por especialistas externos, que reforça a credibilidade, transparência e qualidade.
3. Certificação e Requisitos Internacionais	Uso de padrões como o <i>CoreTrustSeal</i> , que define critérios sobre gestão, risco e acessibilidade.
4. Qualidade dos Dados	Garante dados acessíveis e reutilizáveis com metadados padronizados e bem indexados.
5. Avaliação de Riscos	Identificação de ameaças técnicas e de segurança, com ações preventivas e capacitação contínua.
6. Ferramentas Tecnológicas	Sistemas de auditoria, plataformas de metadados e softwares de conformidade e segurança.
7. Análise de Padrões Internacionais	Comparação entre modelos como <i>CoreTrustSeal</i> , <i>FAIR</i> , <i>TRUST</i> e <i>ACTDR</i> para adaptação local.

Fonte: Adaptado de Santos e Vanz (2023).

Santoz e Vanz (2023) ainda falam sobre o uso de ferramentas tecnológicas especializadas na auditoria, gestão e monitoramento dos repositórios. Por fim, a comparação entre padrões internacionais como:

- *CoreTrustSeal*: um programa de certificação que estabelece requisitos específicos para repositórios de dados confiáveis, alinhados às boas práticas de preservação e gestão de informações digitais;

- ACTDR: *Audit and Certification of Trustworthy Digital Repositories*, que se traduz como Auditoria e Certificação de Repositórios Digitais Confiáveis, responsável por fornecer requisitos e métricas para avaliar a confiabilidade dos repositórios digitais, incluindo aspectos de infraestrutura, segurança e gerenciamento;
- FAIR: promovem a acessibilidade e reutilização de dados;
- TRUST: *Transparency, Responsibility, User Focus, Sustainability, Technology*, que corresponde a Transparência, Responsabilidade, Foco no Usuário, Sustentabilidade e Tecnologia, neste caso, estabelece uma estrutura de boas práticas que garantem transparência, responsabilidade, foco no usuário, sustentabilidade e tecnologia nos repositórios.

Tais ferramentas permitem a identificação de práticas comuns que podem ser adaptadas e aplicadas para fortalecer a gestão de dados em contextos nacionais.

Baseado nos princípios da qualidade de Deming, Ishikawa, Juran e Crosby, é recomendado que os conceitos desses autores sejam aplicados na qualidade da informação e assim são analisados alguns tópicos, segundo Calazans (2008):

Completeza, que está relacionado a integridade total do produto;

- *Accuracy*, referindo-se à correção e precisão dos dados armazenados ou apresentados;
- Atualização, como por exemplo, um banco de dados de produtos precisa ser atualizado com novos preços;
- Por fim seus respectivos benefícios com relação ao atendimento das expectativas e necessidades do cliente, tais como confiabilidade, efetividade, eficiência.

Com isso, há três funções dentro do processo de manufatura da informação que segundo Calazans (2008) na maioria

dos trabalhos conduzidos sobre qualidade, a análise é focada na qualidade dos dados para a organização, na visão do produtor dos dados e na perspectiva do cliente, mas para além disso, as funções dentro do sistema estão pautadas em quem produz a informação que cria e distribui o dado, os controladores dos recursos em relação ao armazenamento e aqueles que consomem os dados para executar seus objetivos.

Além disso Liu e Chi (2002), complementa outras 3 diferentes abordagens sobre os aspectos para identificar qualidade em relação à informação, intuitiva – seleção de características apoiada no conhecimento prático de especialistas e na percepção natural sobre o que realmente importa, empírica – definição das características a partir das necessidades reais de quem usa os dados e teórica – foco nas características que vêm de fundamentos já consolidados, seja por abordagens comparativas ou estudos operacionais.

Por fim, segundo Santos (2022), a avaliação da qualidade dos dados depende de práticas estruturadas e já validadas, como: *CoreTrustSeal*, ACTDR, FAIR e TRUST, que já foram citadas são ferramentas que garantem a integridade e aspectos fundamentais para a definição da qualidade do conjunto de dados. A utilização de conceitos clássicos na análise da qualidade dos dados que abrange a parte técnica e visão do usuário, garante dados confiáveis e úteis para a organização.

Efeitos da confiabilidade na decisão

No contexto da avaliação da confiabilidade de dados, Spezia (2024) fala sobre várias iniciativas que comprovam que a implementação de processos rigorosos e a validação cruzada de informações resultam em melhorias significativas na qualidade dos registros. Exemplos de sucesso ressaltam a necessidade de estratégias específicas, como a comparação

de banco de dados provenientes de diferentes fontes, além do uso de auditorias e revisões sistemáticas, para ampliar a precisão das informações.

Entre os exemplos, é destacado um caso em Ribeirão Preto, que tratou sobre a confiabilidade dos dados de mortalidade e morbidade por doenças crônicas não-transmissíveis, em que a análise comparativa entre os registros originais e os corrigidos de óbitos revelou uma alta consistência dos dados, evidenciando a eficácia de procedimentos de validação na melhora da qualidade das informações epidemiológicas. Casos como este, demonstram que optar por boas práticas metodológicas, não apenas eleva o padrão de confiabilidade, mas também torna possível uma análise mais robusta, com uma base sólida para tomada de decisões (Laurenti *et al.*, 2004).

Veras e Martins (1994), avaliou a qualidade das informações presentes nos formulários de Autorização de Internação Hospitalar (AIH) no contexto do Sistema Único de Saúde (SUS). O estudo que, embora variáveis administrativas e demográficas mostraram alta confiabilidade, variáveis clínicas, como o diagnóstico principal, apresentaram maior inconsistência, mostrando a necessidade de melhorias nos processos de registro e controle das informações hospitalares. Outros pontos observados foram que a adoção de medidas específicas, como melhorar a qualidade do preenchimento dos prontuários médicos, neste caso, a escrita e a clareza, além da definição clara de responsabilidades pelos registros, podem promover avanços na confiabilidade de dados, podendo ter a formulação de políticas baseadas em informações mais precisas. Dessa forma, o estudo comprova que ações que visem a melhoria na qualidade dos registros podem impactar positivamente na qualidade e consequentemente na confiabilidade de dados.

Gaudio (2023) criou um sistema de sensoriamento remoto integrado a uma plataforma de comunicação na nuvem para a

implementação de um Gêmeo Digital de uma planta didática. Neste caso, a utilização do protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) — que visa facilitar a troca de informações entre dispositivos — e de um servidor em nuvem que permitiu a conexão eficiente de dados em tempo real, conseguindo visualizar e monitorar remotamente o sistema com alta confiabilidade. Graças a esta abordagem, foi possível garantir a integridade e a disponibilidade das informações transmitidas, além de possibilitar uma resposta rápida, a implementação bem robusta ilustra o potencial de soluções baseadas em Internet das Coisas e computação em nuvem.

Por fim, outro estudo evidenciou a importância desta vez da implementação de um Núcleo de Fusão de Dados integrado à plataforma OSDU (*Open Subsurface Data Universe*) para aprimorar a confiabilidade dos dados na indústria de petróleo e gás. Visando eliminar silos de informações, promover a interoperabilidade e garantir a rastreabilidade, essa abordagem consegue decisões mais assertivas e eficazes, contribuindo significativamente para o aumento da confiabilidade e qualidade dos dados utilizados nos processos de decisão. Tal estudo reforça a importância de estratégias no gerenciamento de dados para obter resultados confiáveis e sustentáveis na área de confiabilidade de dados (Correia *et al.*, 2021).

Referências

BRITO, F. T.; MACHADO, J. C. Preservação de privacidade de dados: fundamentos, técnicas e aplicações. In: **Jornadas de atualização em informática**, 2017. Anais [...]. [S. l.]: [s. n.], 2017. p. 91-130.

FERNANDES, M. E.; NUZZI, A. P. E. Fundamentos da Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD): uma revisão narrativa. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 12, p. e310111234247, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/324247>

ARAÚJO NETO, R. J. de; AGUIAR, J. J. B. Os impactos da Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) na segurança da informação: uma revisão da literatura. **GeSec: Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 2, 2024.

CALAZANS, A. T. S. Qualidade da informação: conceitos e aplicações. **Transinformação**, Campinas, v. 20, p. 29-45, jan./abr. 2008.

MOREIRA, C.; BEIRA, J. C.; OLIVEIRA, M. Um olhar dos estudantes do curso de Biblioteconomia acerca do que são dados, informações e conhecimentos. **Informação & Informação**, João Pessoa, v. 25, n. 2, p. 484-508, maio/ago. 2020.

ROCHA, T. A. H. *et al.* Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde: evidências sobre a confiabilidade dos dados. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 23, p. 229-240, 2018.

SANTOS, D. B. dos; VANZ, S. A. de S. Repositórios de dados de pesquisa: confrontação dos princípios, critérios e requisitos internacionais de avaliação da confiabilidade. **Revista Brasileira de Preservação Digital**, Campinas, SP, v. 4, e023003, 2023.

LIMA, C. R. de A. *et al.* Revisão das dimensões de qualidade dos dados e métodos aplicados na avaliação dos sistemas de informação em saúde. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 25, p. 2095-2109, set. 2009.

PAIM, I.; NEHMY, R. M. Q.; GUIMARÃES, C. G. Problematização do conceito "Qualidade" da Informação. **Perspectivas em Ciência da Informação**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 77-84, jan./jun. 1996.

OLETO, R. R. Percepção da qualidade da informação. **Ciência da Informação**, Brasília, v. 35, p. 57-62, jan./abr. 2006.

LIU, L.; CHI, L. N. Evolutional data quality: a theory specific view. In: **International conference on information quality**, 7., 2004,

Cambridge. Proceedings. Cambridge: MIT, 2004. p. 292-304.

SANTOS, D. Barrili dos. **Repositórios de dados de pesquisa: identificação dos critérios/requisitos internacionais de avaliação da confiabilidade**. 2022. Dissertação – [s. n.], [s. l.], 2022.

SPEZIA, A. M. **Estudo de estratégias de validação cruzada baseadas em clusters**. 2024. Dissertação – [s. n.], [s. l.], 2024.

LAURENTI, R.; MELLO JORGE, M. H. P. de; GOTLIEB, S. L. D. A confiabilidade dos dados de mortalidade e morbidade por doenças crônicas não-transmissíveis. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 9, p. 909-920, 2004.

VERAS, C. M. T.; MARTINS, M. S. A confiabilidade dos dados nos formulários de Autorização de Internação Hospitalar (AIH), Rio de Janeiro, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 3, p. 339-355, jul./set. 1994.

GAUDIO, M. R. S. **Sensoriamento, captação de dados e comunicação com servidor em nuvem para implementação de Gêmeo Digital de uma planta didática**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, 2023.

CORREIA, J. B.; ABEL, M.; BECKER, K. Núcleo de fusão de dados de um gêmeo digital da indústria de petróleo e gás. In: **Simpósio Brasileiro de Banco de Dados (SBB)**, 2021, Porto Alegre. Anais [...]. Porto Alegre: SBC, 2021. p. 343-348.



Análises estatísticas na construção do Gêmeo Digital

*Daniel Marques Santana Oliveira
Andressa Clara Barbosa de Araujo
Cristiane Agra Pimentel*

As análises estatísticas, quando aplicadas ao contexto do Gêmeo Digital, são utilizadas para construir modelos substitutos capazes de prever com rapidez e confiabilidade o comportamento do sistema físico. Essas análises são fundamentais para validar o desempenho preditivo do Gêmeo Digital, utilizando métricas como o erro quadrático médio (RMSE) e para adaptar os modelos com base em dados obtidos em tempo real. Assim, a estatística não apenas facilita a modelagem de Gêmeos Digitais complexos, como também viabiliza a atualização contínua de suas representações, contribuindo para decisões mais rápidas e assertivas em ambientes dinâmicos (Zhang; Lin; Wang, 2023).

Tendo isso em vista, as análises estatísticas no contexto de simulação e Gêmeos Digitais são tratadas como componentes essenciais para lidar com a complexidade e a necessidade de respostas em tempo real na engenharia moderna. Porém, mais do que interpretar dados, essas análises são incorporadas diretamente ao processo de modelagem por meio de técnicas como aprendizado de máquina, regressões não lineares e métodos de decomposição, permitindo atualizar modelos em tempo real e corrigir desvios entre previsões e medições experimentais. Essa abordagem dá origem aos chamados "*hybrid twins*", que combinam modelos físicos reduzidos com modelos baseados em dados, formando representações mais completas e adaptáveis dos sistemas físicos (Chinesta *et al.*, 2018).

Além disso, as análises estatísticas são apresentadas como componentes essenciais para o funcionamento eficaz dos Gêmeos Digitais, ao integrar dados provenientes de sensores IoT e sistemas físicos com modelos virtuais de simulação e previsão. No contexto de simulação, essas análises permitem interpretar dados em tempo real, identificar padrões, detectar anomalias e prever falhas, possibilitando testes virtuais de cenários extremos que seriam inviáveis fisicamente. No entanto, ao incorporar técnicas de aprendizado de máquina e big data, os GDs tornam-se sistemas auto evolutivos, capazes de se adaptar continuamente com base em novas informações. Dessa forma, a análise estatística atua como base metodológica para a tomada de decisões inteligentes e personalizadas, reforçando a proposta do GD como uma ferramenta de otimização dinâmica e sensível ao domínio de aplicação (Sharma *et al.*, 2022).

Sendo assim, no contexto da simulação e dos Gêmeos Digitais, as análises estatísticas assumem papel central na representação e aprendizado eficiente de sistemas físicos complexos. Segundo Zhang, Lin e Wang (2023), o Gêmeo Digital é uma representação computacional de um sistema físico real, alimentada por dados em tempo real, com o objetivo de permitir monitoramento, previsão e otimização. No entanto, a complexidade matemática dos modelos utilizados em simulações pode tornar os processos computacionais extremamente onerosos.

Estatística para confiabilidade do modelo

A estatística é apresentada como elemento central para garantir a confiabilidade dos dados utilizados em Gêmeos Digitais, especialmente em simulações dinâmicas. Contudo a validação estatística, por sua vez, permite quantificar incerte-

zas de forma rigorosa, utilizando ferramentas como inferência bayesiana, propagação de incertezas e métricas de validação probabilísticas, possibilitando a avaliação contínua do nível de confiança nos modelos. Dessa forma, é possível ampliar sua capacidade de extrapolação para diferentes cenários e aumentar a área de aplicação dos Gêmeos Digitais, tornando-os mais robustos e confiáveis para apoiar decisões críticas na engenharia automotiva (Danquah *et al.*, 2020).

De modo geral, segundo Ukwuoma *et al.* (2024), a aplicação de análises estatísticas serve como base para assegurar a confiabilidade dos dados que sustentam os Gêmeos Digitais. A partir da comparação entre dados reais e simulados, o uso de testes estatísticos como normalização, análise de dispersão, medidas de tendência central, correlação e erro médio absoluto revela-se essencial para avaliar se o comportamento do modelo digital é coerente com o do sistema físico correspondente. Essa abordagem permite não apenas identificar similaridades estruturais e funcionais entre os dois ambientes, mas também quantificar desvios e incertezas que podem comprometer a eficácia de decisões baseadas nos dados do Gêmeo Digital. Assim, a estatística atua como ferramenta-chave para validar a consistência dos dados, aumentar a robustez dos modelos e ampliar a confiabilidade do GD como representação dinâmica e precisa de sistemas reais.

Sendo assim, no trabalho desenvolvido por De Angelis *et al.* (2023), a estatística é empregada de forma inovadora para garantir a confiabilidade dos dados em Gêmeos Digitais por meio de uma abordagem baseada em probabilidades imprecisas, possibilitando atualizações robustas em tempo real. Inicialmente, os autores propõem um método de inferência não paramétrica que dispensa a necessidade de pressupostos sobre distribuições a priori ou funções de verossimilhança, o que é particularmente vantajoso em contextos com dados

escassos ou altamente incertos. Em seguida, a técnica é aplicada à atualização *on-line* de um Gêmeo Digital de uma estrutura de três andares submetida à excitação por impacto, utilizando dados experimentais e simulados para calibrar parâmetros de rigidez e amortecimento. Por meio da construção de estruturas de crença consonantes e do uso de algoritmos de profundidade de dados, o método permite quantificar incertezas de forma conservadora, assegurando que os resultados da simulação estejam alinhados com o comportamento físico observado.

Portanto, ao integrar teoria da evidência, medidas de possibilidade e atualizações em tempo real, o estudo demonstra que a estatística não apenas assegura a consistência e a validade dos dados utilizados, mas também fortalece a capacidade preditiva e adaptativa dos Gêmeos Digitais em sistemas dinâmicos.

Análise exploratória dos dados Estatísticas descritivas

As estatísticas descritivas representam uma etapa essencial da análise de dados, permitindo sintetizar e compreender padrões por meio de medidas como média, mediana, moda e desvio padrão. A média aritmética fornece uma noção do valor central, enquanto a mediana representa o ponto médio de uma distribuição ordenada, e a moda identifica o valor mais frequente. Para avaliar a dispersão, o desvio padrão é empregado como um indicador da variabilidade dos dados em relação à média. Além disso, ferramentas visuais como histogramas ajudam a observar a forma da distribuição, permitindo identificar assimetrias ou padrões recorrentes. Essas ferramentas tornam-se especialmente úteis para leigos ou iniciantes na análise de dados, pois facilitam a interpretação e subsidiam decisões baseadas em evidências (Escola de Dados, 2025).

De acordo com Guo e Lv (2022), é possível perceber que o uso de estatísticas descritivas, como médias, desvios padrão e distribuições, constitui uma base indispensável para a construção e validação de modelos digitais. Primeiramente, ao tratar da monitoração e simulação de sistemas físicos complexos, o GD depende da coleta contínua de dados reais, os quais são sintetizados por meio de estatísticas descritivas para fornecer um retrato fiel e atualizado do estado do sistema. Em seguida, essas estatísticas são utilizadas na comparação entre os dados reais e os simulados, permitindo ajustes dinâmicos no modelo, o que é essencial para a sua confiabilidade. Portanto, medidas como a média, que representa o comportamento típico de um sistema, o desvio padrão, que revela a variabilidade das condições operacionais, e as distribuições, que indicam a frequência de ocorrência de eventos, tornam-se cruciais para garantir a precisão e a robustez do modelo ao longo de todo o ciclo de vida do sistema físico representado (Guo; Lv, 2022).

Assim, segundo Silva (2024), a utilização de *boxplots* na etapa exploratória dos dados pode ser relevante para a identificação preliminar de padrões e possíveis valores discrepantes. Em seu trabalho, os gráficos permitiram observar a distribuição das variáveis e detectar assimetrias, além de indicar a presença de *outliers* univariados. Esse tipo de representação gráfica oferece uma síntese visual eficaz das principais estatísticas descritivas de um conjunto de dados e pode servir como base para análises mais complexas. Em contextos que envolvem a construção de representações digitais de sistemas físicos — como os Gêmeos Digitais descritivos de nível 1 —, o uso de *boxplots* pode auxiliar na compreensão estrutural dos dados coletados, contribuindo para a identificação de anomalias e a melhoria da modelagem baseada em dados reais (AWS, 2024).

Identificação de anomalias ou *outliers*

O *boxplot* é uma representação gráfica amplamente utilizada na estatística descritiva para sintetizar e visualizar a distribuição de dados numéricos, permitindo identificar medidas de tendência central, dispersão e possíveis *outliers*. A partir de cinco estatísticas principais — valor mínimo, primeiro quartil, mediana, terceiro quartil e valor máximo — o gráfico fornece uma visão clara da assimetria e da variabilidade dos dados, por meio de uma estrutura que inclui uma caixa (representando o intervalo interquartil) e linhas (ou “bigodes”) que se estendem até os extremos. Essa visualização é especialmente útil para detectar valores discrepantes e compreender a estrutura geral de um conjunto de dados, conforme discutido em material de divulgação técnica sobre o tema (Escola EDTI, 2023).

Sendo assim, a representação gráfica por meio de diagramas de caixa (*boxplots*) é uma ferramenta estatística fundamental para a análise exploratória de dados, permitindo a visualização concisa da distribuição, tendência central, dispersão e identificação de valores atípicos em diferentes conjuntos de dados. Sendo assim, alguns estudos tratam da importância da identificação de *outliers* para confiabilidade de uma simulação ou Gêmeo Digital, como por exemplo, o estudo de Bourdeau-Goulet e Hassanzadeh (2021), onde os *boxplots* foram estrategicamente empregados para comparar a distribuição dos valores de seis índices climáticos derivados de múltiplas simulações. Esta abordagem permitiu uma análise visual da variabilidade dentro do conjunto de simulações de forma individualizada, e entre diferentes modelos. Adicionalmente, os diagramas facilitaram a avaliação do desempenho dos modelos, que foram sobrepostos como linhas de referência, abrangendo dez zonas climáticas canadenses, tanto para o período histórico, quanto para projeções futuras de cenários climáticos.

Outro exemplo é o estudo de Baki *et al.* (2022), nele os pesquisadores utilizaram *boxplots* para entender o impacto de diferentes configurações (parâmetros) do modelo climático *Weather Research and Forecasting* (WRF), um modelo de pesquisa e previsão do tempo, na simulação de ciclones tropicais. Assim, observaram, por exemplo, como os "efeitos elementares" e os "escores GCV" (Validação Cruzada Generalizada) de cada parâmetro, o que ajudou a identificar quais configurações eram mais influentes ao apresentar maior variação ou valores medianos mais destacados. Contudo, os *boxplots* também serviram para avaliar a performance de modelos computacionais simplificados (modelos substitutos), verificando a distribuição de seus escores de acerto dos ciclones, utilizando R^2 para analisar a variação nas previsões da MSW (velocidade máxima sustentada do vento), quando diferentes parâmetros eram testados, comparando essas previsões com as observações reais.

Validação estatística do modelo

A verificação da acurácia dos dados é apresentada como uma etapa essencial para garantir a confiabilidade das informações utilizadas em processos decisórios e operacionais. Além disso, destaca-se que a acurácia está diretamente relacionada à qualidade dos dados, sendo influenciada por fatores como completude, consistência, atualidade e ausência de erros. Entretanto, é importante enfatizar que dados imprecisos podem comprometer a eficiência de sistemas automatizados e causar prejuízos operacionais, reforçando a necessidade de controles e políticas de governança de dados que assegurem a integridade das informações desde sua origem até sua aplicação em análises e modelos computacionais (NGBilling, 2023).

Sendo assim, é possível observar como é feita tal verificação na prática, como o trabalho de Júnior (2023), onde a verificação é conduzida por meio de uma metodologia estruturada em múltiplas etapas, que combina otimização e validação contínua. Através de técnicas como o método dos mínimos quadrados e o algoritmo de Otimização por Enxame de Partículas (PSO), o Gêmeo Digital é ajustado para minimizar a discrepância entre suas previsões e os dados reais do sistema físico. Essa verificação é realizada ciclicamente, por meio de “janelas de aquisição”, onde as saídas do modelo digital são comparadas com os dados obtidos do sistema real. Se detectadas discrepâncias, o modelo é atualizado com novos parâmetros estimados, ou mesmo com a incorporação de componentes antes desconhecidos. O desempenho do Gêmeo Digital é então avaliado com base no erro percentual, que se manteve, em diversos casos de simulação, abaixo de 1%, atestando a alta fidelidade do modelo à realidade operacional observada.

Outro exemplo é o artigo de Simões *et al.* (2024), onde a verificação da acurácia dos dados modelados no contexto de um Gêmeo Digital aplicado à linha de produção de televisões foi realizada por meio de um processo rigoroso de treinamento, teste e validação de diferentes modelos de redes neurais convolucionais (CNN). O estudo comparou três arquiteturas — um modelo simples, um modelo VGG-Like e o modelo VGG16 —, avaliando seu desempenho com base em métricas como acurácia, sensibilidade e especificidade. Os dados utilizados passaram por etapas de preparação, aumento e particionamento em conjuntos de treino, teste e retenção, garantindo robustez na avaliação dos modelos. A acurácia alcançada foi de 0,899 no modelo simples, 0,929 no VGG16 e 0,989 no modelo VGG-Like, sendo este último o mais eficaz. Essa abordagem validou a capacidade do Gêmeo Digital de simular de forma confiável o processo real de inspeção industrial, demonstran-

do sua aplicabilidade prática e precisão em contextos da Indústria 4.0.

Comparação entre resultados simulados e reais

Dentre as múltiplas tecnologias utilizadas no processo de desenvolvimento e implementação do Gêmeo Digital, destaca-se a simulação, que fornece vários esquemas essenciais para a confecção e execução dos modelos, além de apresentar uma versão virtual de uma entidade do mundo real, acomodando uma descrição aproximada desta, mas não necessariamente realizando intercâmbio automatizado de informações com ela. Tal ponto é um dos fatores que diferencia o Gêmeo Digital da simulação, numa situação em que ambos utilizam o espelho do modelo físico para melhorias e tomada de decisões. No entanto, para que essa representação virtual seja considerada um verdadeiro Gêmeo Digital, é essencial que haja uma comparação sistemática entre o modelo simulado e o sistema real. Essa comparação permite verificar o grau de acurácia do modelo, validar sua capacidade de replicar o comportamento da planta física e, sobretudo, ajustar seus parâmetros com base em dados reais (Manickam *et al.*, 2023).

Entretanto, não há um padrão para realizar tal comparação, pois cada modelo de Gêmeos Digitais serve para atender uma demanda específica. Por exemplo, no trabalho de Souza (2023), a comparação entre o modelo simulado e a planta física foi fundamental para validar a fidelidade do Gêmeo Digital desenvolvido. Essa verificação ocorreu por meio da integração do ambiente virtual tridimensional, construído no motor gráfico Unity3D, com o controlador físico real da célula de manufatura. A sincronização das variáveis de entrada e saída entre os dois ambientes permitiu o espelhamento do comportamento operacional, assegurando que as ações executadas no controlador físico fossem refletidas no modelo virtual e vice-ver-

sa. Essa interação bidirecional possibilitou avaliar, em tempo real, a consistência entre os sistemas, atestando a acurácia do modelo digital. Adicionalmente, os resultados obtidos foram comparados com trabalhos da literatura em uma meta-análise, o que reforçou a validade da metodologia proposta ao destacar ganhos em controle, monitoramento e visualização de estados do processo produtivo que não estariam acessíveis apenas pela observação direta do sistema físico.

Já no trabalho de Scardini (2023), a comparação entre o modelo simulado e o sistema real foi conduzida com o objetivo de validar a eficácia do Gêmeo Digital desenvolvido para um separador trifásico em uma unidade *offshore* de produção de petróleo. O modelo digital foi construído com base em redes neurais NARX e LSTM, e treinado utilizando dados históricos de entrada e saída do sistema físico, obtidos via integração com o sistema OSISoft PI. Para a validação, os autores realizaram previsões em diferentes horizontes temporais (1, 3, 5 e 10 passos à frente) e compararam os resultados simulados com novos conjuntos de dados coletados posteriormente em condições reais de operação. Dessa forma, a avaliação da acurácia dos modelos foi feita por meio das métricas Erro Médio Absoluto (MAE) e Erro Quadrático Médio (MSE), aplicadas aos valores preditos em relação aos observados. Essa abordagem permitiu verificar a capacidade dos modelos em generalizar seu desempenho e replicar com fidelidade o comportamento do sistema físico, assegurando a confiabilidade do Gêmeo Digital como ferramenta de suporte ao controle de processos e à tomada de decisão operacional.

Testes de hipóteses e intervalos de confiança

Os testes de hipóteses são métodos estatísticos fundamentais para a análise inferencial de dados, permitindo avaliar se diferenças observadas entre grupos podem ser atribuídas

ao acaso ou se são estatisticamente significativas. Ou seja, ao formular uma hipótese nula (H_0), assume-se inicialmente a ausência de efeito ou diferença, enquanto a hipótese alternativa (H_1) representa a existência de uma diferença relevante. A decisão entre aceitar ou rejeitar H_0 baseia-se no valor de uma estatística de teste (como F ou t) e na comparação com um valor crítico determinado pelo nível de significância (α), estabelecido previamente — nesse caso, fixado em 1% (Silva *et al.*, 2022).

Sendo assim, o teste de hipótese é amplamente utilizado em simulações computacionais e em modelos de Gêmeo Digital, um dos exemplos é o estudo de Siqueira Junior e Pinho (2020), no qual os testes de hipótese foram fundamentais para validar o modelo de simulação computacional aplicado a uma agência bancária. A partir da comparação entre dados reais e dados simulados, os autores utilizaram testes estatísticos não paramétricos para verificar se as medianas e variáveis das amostras simuladas representavam fielmente o comportamento do sistema real. Dessa forma, essa etapa foi essencial para garantir que os cenários simulados espelhassem adequadamente a operação da agência, possibilitando análises confiáveis sobre o impacto de diferentes configurações de atendimento. Em resumo, no contexto de modelos de simulação — e, por extensão, de Gêmeos Digitais — os testes de hipótese asseguram que o modelo reproduza com validade estatística os processos reais, reforçando sua utilidade como ferramenta de apoio à tomada de decisão.

Já no estudo de Kappes (2021), os testes de hipótese desempenham papel relevante no processo de validação dos modelos de regressão utilizados na construção do Gêmeo Digital aplicado à detecção de anomalias no consumo de gás. A autora utiliza o teste F , no contexto da análise de variância (ANOVA), para avaliar a significância global dos modelos ajustados, verificando se os coeficientes das variáveis explica-

tivas são estatisticamente diferentes de zero. Além disso, são empregados testes como o de Shapiro-Wilk e Durbin-Watson para examinar suposições dos resíduos, como normalidade e ausência de autocorrelação, respectivamente. Esses procedimentos são fundamentais para garantir a adequação estatística dos modelos e, conseqüentemente, a confiabilidade do Gêmeo Digital como ferramenta de detecção de falhas. Assim, o trabalho demonstra como os testes de hipótese podem reforçar a robustez e a precisão de modelos baseados em dados reais, especialmente em sistemas voltados à tomada de decisão automatizada, podendo auxiliar para tomadas de decisões, principalmente relacionadas à melhoria de processos.

Referências

AWS. Gêmeos digitais na AWS: gerando valor com Gêmeos Digitais descritivos de nível 1 (L1). **Amazon**, [2025]. Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/blogs/aws-brasil/gemeos-digitais-na-aws-gerando-valor-com-gemeos-digitais-descriptivos-de-nivel-1-l1/>. Acesso em: 29 maio 2025.

BAKI, H. *et al.* Determining the sensitive parameters of the Weather Research and Forecasting (WRF) model for the simulation of tropical cyclones in the Bay of Bengal using global sensitivity analysis and machine learning. **Geoscientific Model Development**, v. 15, n. 5, p. 2133–2155, 2022.

BOURDEAU-GOULET, S. HASSANZADEH, E. Comparisons between CMIP5 and CMIP6 models: Simulations of climate indices influencing food security, infrastructure resilience, and human health in Canada. **Earth's Future**, v. 9, n. 5, p. e2021EF001995, 2021.

CHINESTA, F. *et al.* Virtual, Digital and Hybrid Twins: A New Paradigm in Data-Based Engineering and Engineered Data. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 27, p. 105–134, 2020.

DANQUAH, B. *et al.* Potential of statistical model verification, validation and uncertainty quantification in automotive vehicle dynamics simulations: a review. **Vehicle System Dynamics**, 2020.

DE ANGELIS, M. *et al.* Robust online updating of a digital twin with imprecise probability. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 186, p. 109877, 2023.

ESCOLA DE DADOS. **Análise com estatística descritiva para leigos**. [S.l.: s.n.], [2025]. Disponível em: <https://escoladedados.org/tutoriais/analise-com-estatistica-descritiva-para-leigos/>. Acesso em: 26 jun. 2025.

Fatoretto, M. O que é um box plot?. **ESCOLA EDTI**. Disponível em: <https://www.escolaedti.com.br/o-que-e-um-box-plot/>. Acesso em: 29 maio 2025.

GUO, J.; LV, Z. Application of Digital Twins in multiple fields. **Multimedia Tools and Applications**, v. 81, p. 26941–26967, 2022.

JÚNIOR, A. **Gêmeos digitais interpretáveis e adaptáveis para máquinas industriais**. 2023. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação) – Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Recife, 2023.

KAPPES, D. **Aplicação digital twin para auxílio de detecção de anomalias no consumo de gás [manuscrito]**. 2021. 48 f. Monografia (Especialização em Estatística) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Estatística, Belo Horizonte, 2021.

MANICKAM, S; *et al.* Unlocking the potential of digital twins: a comprehensive review of concepts, frameworks, and industrial applications. **IEEE Access**, v. 11, p. 135147–135158, 2023.

NGBILLING. **Acuracidade de dados: entenda o que é e qual sua importância**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://ngbilling.com.br/insights/acuracidade-de-dados/>. Acesso em: 29 maio 2025.

SCARDINI, D; **Digital Twin de um separador trifásico em unidade offshore utilizando redes neurais NARX e LSTM [manuscrito]**. 2023. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto Federal do Espírito Santo, Serra, 2023.

SHARMA, A; *et al.* Digital Twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 30, p. 100383, 2022.

SILVA, A. **Um aliado da simulação à melhoria contínua industrial [manuscrito]**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas) – Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Braga, 2024.

SILVA, A. **Uma aplicação de técnicas de detecção de outliers multivariados para identificação de fraude monetária [manuscrito]**. 2024. 26 f. Monografia (Bacharelado em Estatística) – Universidade Federal de Ouro Preto, Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Ouro Preto, 2024.

SILVA, J. *et al.* Aplicação da ANOVA e dos testes de Fisher e Tukey em dados de recalque de edifícios de múltiplos pavimentos. **Revista Principia**, v. 59, n. 3, p. 829–845, 2022.

SIMÕES, W. *et al.* Aplicação de Digital Twins na simulação de processos industriais na manufatura de produtos eletroeletrônicos. **Studies in Engineering and Exact Sciences**, Curitiba, v. 5, n. 3, p. 01–24, 2024.

SIQUEIRA J. *et al.* Uso de simulação em agência bancária para redução do tempo de fila em atendimento ao cliente. In: **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 40., 2020, Foz do Iguaçu. Anais [...]. Foz do Iguaçu: ABEPRO, 2020. Disponível em: https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_372_1525_40920.pdf. Acesso em: 29 maio 2025.

SOUZA, V. d. S. **Digital Twin**: Uma proposta de geração de ambientes virtuais baseado em comissionamento virtual

utilizando motor gráfico Unity3D. 116 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Amazonas, Amazônia, 2021.

UKWUOMA, H. C. *et al.* Analysis of digital twin and its physical object: exploring the efficiency and accuracy of datasets for real-world application. **Data Science and Management**, v. 7, p. 361–375, 2024.

ZHANG, X. *et al.* Digital Triplet: A Sequential Methodology for Digital Twin Learning. **Mathematics**, v. 11, n. 2661, p. 1–16, 2023.



Construindo um Gêmeo Digital

*Emilli Cássia Souza Lopes
Andressa Clara Barbosa de Araujo
Cristiane Agra Pimentel*

Com um grande potencial de inovação, o Gêmeo Digital vem se destacando quando se trata de análise preditiva, trazendo vantagens para as empresas como a previsão de falhas, manutenção preditiva, e melhorias no desempenho do sistema, se tornando uma ferramenta competitiva para o mercado. A partir da utilização de *softwares* de simulação, é possível criar cenários virtuais, idêntico ao real, capaz de prever e otimizar seu comportamento em tempo real, trazendo uma maior segurança para a empresa que busca realizar mudanças em seu processo com o menor risco, e ao mesmo tempo aumentar sua produtividade e eficiência (De Lima Nascimento *et al.*, 2024).

O processo de criação de um Gêmeo Digital se dá a partir da utilização de *softwares* de simulação capazes de fazer uma réplica fiel ao sistema real estudado. O levantamento preliminar do sistema real por meio de fluxogramas simples ou até mapeamentos de fluxo de valor (MFV) mais complexos, é de suma importância, uma vez que estes serão utilizados como base para a criação do cenário virtual. Além disso, a utilização de plantas baixas do local simulado, a coleta de dados reais, detalhamento dos fluxos que ocorrem, fazem com que o modelo seja o mais fidedigno possível (Attaran, Attaran e Celik, 2023).

Porém, um desafio ainda persistente quanto ao uso da tecnologia está atrelado ao alto custo que é necessário investir. Além dos custos envolvidos com o licenciamento dos *softwa-*

res, que costumam ser altos, são necessárias uma infraestrutura robusta e soluções de alto desempenho, que suportem lidar com grandes volumes de dados. Outro ponto importante essencial para o desenvolvimento de projetos de Gêmeo Digital, é a mão de obra qualificada e a capacitação dos colaboradores, que também costumam ter um custo elevado. Com isso, essa tecnologia ainda se encontra distante de pequenas e médias empresas, já que estas, não possuem condições de fazer grandes investimentos em inovação tecnológica (De Araujo *et al.*, 2024).

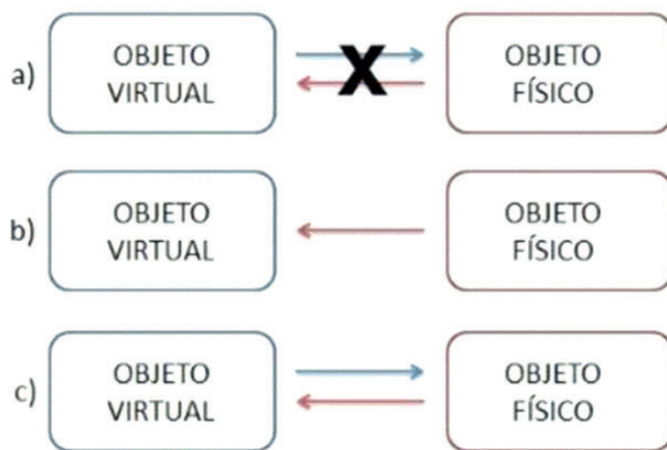
Fases do Gêmeo Digital

Para se obter um Gêmeo Digital, é necessário que seu processo de criação passe por algumas fases e, mesmo ainda não existindo um consenso de um passo a passo para atingir a fase final, alguns autores defendem que a etapa de “simulação” é a primeira fase do processo. Segundo Manickam *et al.* (2023) a simulação se trata de uma representação geral que está presente durante a criação do Gêmeo Digital. Mesmo tendo conceitos parecidos, “simulação” e “Gêmeo Digital” se diferenciam, uma vez que, para ser de fato um Gêmeo Digital, o modelo precisa ter uma troca bidirecional que reflete alterações em tempo real entre os ambientes real e digital, geralmente por meio de sensores; enquanto a simulação pode ser um modelo baseado em dados coletados anteriormente, mas não atualizados em tempo real.

Outros autores trazem o conceito de Modelo Digital e Sombra Digital para definir as etapas de desenvolvimento para se chegar a um Gêmeo Digital. Segundo Nascimento *et al.* (2022), Modelo Digital se trata da etapa de criação de um modelo preciso dos fluxos, dados e processos do ambiente real, porém sem uma troca contínua de dados, ou seja, para o autor Modelo Digital é uma simulação, que tem como objetivo prever

e analisar diferentes cenários. Já Sombra Digital, é descrito como a etapa de implementação do Modelo Digital, tendo uma conexão unidirecional com o ambiente real. Essa etapa é essencial para o desenvolvimento do Gêmeo Digital, uma vez que, os dados provenientes do sistema físico são capturados em tempo real e utilizados para gerar respostas ou previsões baseadas no modelo, porém, sem existir uma retroalimentação automática ou controle ativo por meio do modelo desenvolvido, sendo utilizada apenas para simular e acompanhar os processos em tempo real. A Figura 1 demonstra os conceitos de Modelo Digital, em que não há interação entre o virtual e real, Sombra Digital que há uma interação unidirecional e Gêmeo Digital, que possui uma interação bidirecional.

Figura 1: Demonstração dos conceitos Modelo Digital, Sombra Digital e Gêmeo Digital.

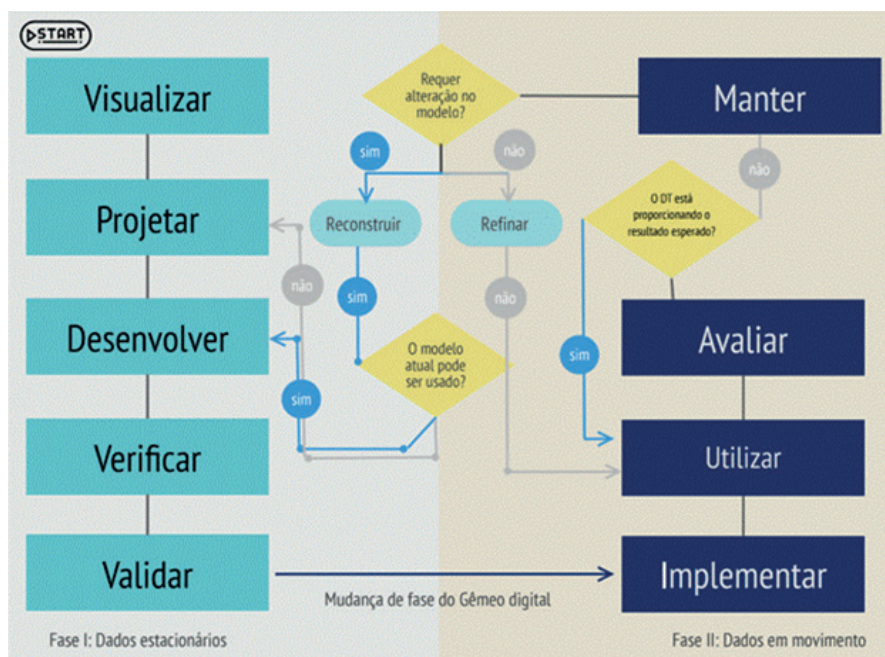


Fonte: Nascimento (2022).

Em contrapartida, Qamsane *et al.* (2021), traz uma abordagem diferente quanto às etapas de criação do Gêmeo Digital. O autor define duas fases essenciais para o desenvolvimento do GD, sendo elas a fase *Off-line* e a fase *On-line*.

A Figura 2 apresenta um fluxograma que detalha as fases de criação do Gêmeo Digital, garantindo uma melhor visualização das etapas envolvidas.

Figura 2: Fluxograma das etapas do Gêmeo Digital.



Fonte: Elaboração própria (2024).

A fase *Off-line*, seria a já conhecida “simulação”, onde é criado um modelo fiel ao ambiente real, utilizando dados históricos e informações do processo. Segundo o autor, essa etapa é essencial para validar o modelo antes que haja a implementação do GD no ambiente operacional, garantindo uma representação precisa e confiável. Já a etapa *On-line*, se trata do momento em que essa simulação inicial é validada e implementada ao ambiente real, se tornando de fato um GD. Este passa a utilizar dados em tempo real para monitorar, prever e realizar análises capazes de auxiliar nas tomadas de decisões.

Mesmo não existindo um consenso sobre a metodologia

correta que deve se seguir para a criação de um GD, esses termos auxiliam no entendimento sobre como se dá o desenvolvimento de um modelo virtual idêntico e integrado ao ambiente físico, que tenha a autonomia suficiente para receber e transmitir informações em tempo real.

Modelo conceitual

A criação de um modelo conceitual é essencial para uma visualização mais clara das informações do sistema que será simulado, uma vez que funciona como um mapa que define elementos do sistema, fluxos dos processos, tempos, eventos que ocorrem com frequência, dentre outros elementos que garantem que todos tenham uma mesma visão do sistema estudado. Segundo Chwid e Medina (2014) o modelo conceitual irá orientar toda a fase de coleta de dados, identificação de variáveis mais relevantes e captação das lógicas do sistema, além de auxiliar na redução de chances de erros e retrabalho, assim, garantindo uma maior credibilidade no estudo e assertividade na criação do modelo digital. Ademais, também é destacado que para a criação de um modelo conceitual, o uso de elementos de fluxogramas e outros recursos que auxilie na melhor visualização, é fundamental para ilustrar e detalhar a estrutura e o funcionamento do sistema estudado, garantindo que a lógica seja mais bem compreendida e validada.

A utilização do Mapa de Fluxo de Valor (MFV), ferramenta da filosofia *Lean*, é comumente utilizada para traçar os fluxos e coleta de dados que ocorrem no sistema, assim, podendo atuar como um modelo conceitual a ser seguido para a criação de simulações. Segundo o estudo de Oliveira *et al.* (2024), foi utilizado um MFV como forma de mapear os processos que estavam ocorrendo no laboratório do hospital estudado. A partir disso, o autor conseguiu traçar um ponto de partida, identificando as

etapas saída das técnicas para realizar coletas até a liberação dos resultados do laboratório, e, assim, identificar gargalos e desperdícios do processo, facilitando, posteriormente, a visualização dos fluxos e criação dos cenários de simulação do sistema estudado.

Em outro estudo de Lopes, Araujo e Pimentel (2024), o MFV também foi utilizado como modelo conceitual para o desenvolvimento de uma simulação na área da saúde. A ferramenta foi aplicada para traçar os fluxos que estavam ocorrendo entre as farmácias e centros de obstetrícia de um hospital, permitindo ao autor, uma melhor visualização dos processos e identificação dos desperdícios que estavam ocorrendo. Dessa forma, posteriormente, essas informações foram utilizadas para criar cenários de simulação, demonstrando assim, como o MFV se torna uma ferramenta fundamental para uma melhor compreensão e visualização dos processos, e auxílio para a modelagem de simulação.

Modelando e inserindo dados

A criação do Modelo Digital é essencial para chegar ao chamado Gêmeo Digital. Nessa fase, é necessário obter todos os dados possíveis do sistema estudado, de forma que o cenário virtual fique o mais idêntico possível do real. Sendo assim, o estudo do sistema é de extrema importância, de forma que se entenda os processos que ocorrem, equipamentos utilizados, colaboradores envolvidos, tipos de atividades realizadas, dentre outras informações necessárias para criar uma réplica virtual do ambiente real. Assim como realizado no estudo de Oliveira *et al.* (2024), que – para a criação do Modelo Digital do hospital, denominado pelo autor como “Cenário atual” – utilizou-se a planta baixa do hospital estudado, foram desenhados os fluxos que estavam ocorrendo, além de alocar os colabora-

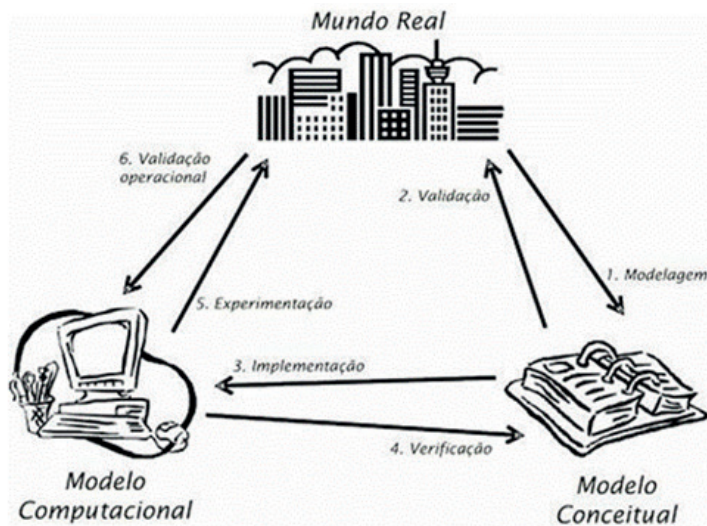
dores envolvidos, de forma que o cenário virtual ficasse o mais fiel possível ao real.

Após a criação dessa réplica do sistema estudado, o próximo passo é realizar a importação dos dados históricos, coletados no sistema estudado, para o cenário virtual. Chwid e Medina (2014) definem três etapas para a modelagem dos dados de entrada: coleta de dados, tratamento dos dados e inferência. A etapa de coleta de dados, também conhecida como “amostragem”, tem como objetivo captar uma amostra de dados representativa do sistema estudado. Essa etapa é essencial para o levantamento ou captação de dados, que podem ser, por exemplo, tempo de chegada de determinado objeto, tempo de processamento, taxa de reparo, quantidade de chegada ou saída de objetos, dentre outros dados quantitativos que podem ser importados para cenário virtual. A segunda etapa definida pelo autor é a de tratamento de dados, que se trata da fase que busca identificar se houve dados com falhas, de forma a aumentar a confiabilidade da amostra de dados. Para a realização desse tratamento de dados, pode-se utilizar ferramentas, como *Excel*, *Power BI*, *minitab*, dentre outras que ajudam a explorar da amostra e encontrar possíveis dados com dispersão muito alta (*outliers*) entre os demais. Por fim, a terceira etapa definida pelo autor é a de inferência, onde são aplicados cálculos de probabilidade para entender o comportamento da população em relação à amostra. Nessa etapa são utilizados gráficos para melhor visualização do comportamento dos dados aferidos. Sendo assim, a partir dessas três etapas, é possível realizar a importação de dados para o modelo virtual, de forma com que chegue cada vez mais à exatidão, quando comparado ao ambiente real.

Validação e verificação do modelo

O processo de validação do modelo criado é de extrema importância para entender se a simulação que está sendo criada está de fato condizente com o real. Segundo Chwid e Medina (2014), o conceito de validação se refere ao modelo conceitual, utilizado como base para entendimento dos processos do sistema estudado, enquanto verificação vai se tratar do modelo digital, ou seja, a simulação que está sendo criada. Assim, existem várias formas de validação e verificação das etapas de criação, até que o modelo chegue de fato ao Gêmeo Digital. A Figura 3 abaixo, demonstra os conceitos de validação e verificação.

Figura 3: Demonstração dos conceitos de validação e verificação.



Fonte: Chwid e Medina (2014).

A Figura 3 apresenta seis etapas que demonstram os conceitos já estudados até o momento. Na etapa um, o autor explica que dado um sistema real estudado, a partir do momento que se cria um modelo conceitual deste, essa ação

passa a ser denominada “modelagem”. Já na etapa dois, quando é feito o processo inverso, confrontando o modelo conceitual com o sistema real, é o que chamamos de “validação” do modelo criado. Na etapa três é criada uma simulação (ou modelo computacional), a partir do modelo conceitual, passando a haver uma “implementação” do modelo conceitual, no ambiente virtual. Na etapa quatro, quando é feita a comparação da simulação com o modelo conceitual, essa ação é chamada de “verificação” do modelo. Na etapa cinco, após a verificação da simulação ser devidamente realizada, é feita a “experimentação” do modelo no ambiente real. Por fim, na etapa seis, quando é feito o processo contrário, comparando os resultados da simulação com o do ambiente real, passa a ser chamado de “validação operacional”.

Dessa forma, segundo Quamsane *et al.* (2021), existem maneiras de verificar se os modelos digitais estão de fato idênticos aos reais, como:

- Experimentações do modelo no ambiente real, identificando possíveis diferenças entre o digital e real;
- Utilização de ferramentas de estatística, como o teste de hipótese, para a melhor avaliação de suposições e análises de dados;
- Validação de acuracidade, comparando os resultados obtidos nos *softwares* com os reais ou a partir de testes realizados em condições controladas;
- Teste de cenários, executando as simulações com diferentes condições operacionais, para verificar se o modelo digital consegue reproduzir o comportamento esperado sob várias situações.

Assim, por meio dos resultados obtidos é possível aprimorar cada vez mais o modelo, além de garantir uma representação precisa e fidedigna do comportamento do sistema estudado.

Após as validações do modelo, passando por todas as fases anteriores do GD, este pode ser implantado de forma com que seja interligado com sensores do ambiente real, fazendo com que exista uma troca de informações bidirecional entre o digital e o real. Porém, este precisa ser continuamente testado e atualizado diante de mudanças de processos do sistema real, garantindo que o modelo nunca se perca e que seja sempre adequado para o reuso.

Referências

ATTARAN, M.; ATTARAN, S.; CELIK, B. G. The impact of digital twins on the evolution of intelligent manufacturing and Industry 4.0. **Advances in Computational Intelligence**, v. 3, n. 3, p. 11, 2023.

DE ARAUJO, A. C. B. *et al.* Mercado do Gêmeo Digital: aplicação da matriz SWOT para análise mercadológica e tendências do setor. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 9, p. e4160-e4160, 2024.

DE LIMA NASCIMENTO, A. T. *et al.* Aplicação do simulador de eventos discretos Flexsim® para virtualização do módulo VGR (robô) do simulador físico Fischertechnik® num contexto de Digital Twin. **Revista Produção Online**, v. 24, n. 2, p. 5234-5234, 2024.

MANICKAM, S. *et al.* Unlocking the potential of digital twins: a comprehensive review of concepts, frameworks, and industrial applications. **Ieee Access**, v. 11, p. 135147-135158, 2023.

NASCIMENTO, C. M. *et al.* Metodologia Aplicada ao Desenvolvimento de Gêmeo Digital de Sistemas de Bombeamento de Água. In: **Congresso Brasileiro de Automática-CBA**. 2022.

QAMSANE, Y. *et al.* A methodology to develop and implement digital twin solutions for manufacturing systems. **Ieee Access**, v. 9, p. 44247-44265, 2021.

CHWIF, L.; MEDINA, A.; TECNOLOGIA SIMULATE. Modelagem e simulação de eventos discretos, 4a edição. [s.l.] **Elsevier Brasil**, 2014.

OLIVEIRA, D. M. *et al.* Simulação para melhorar fluxo de exames em um laboratório hospitalar. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 10, n. 2, p. 452-465, 2024.

LOPES, E. C. S.; ARAÚJO, A. C.; PIMENTEL, C. A. Simulação aplicada à melhoria de fluxo em um hospital público. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 10, n. 3, p. 435-448, 2024.



Gamificação no Ensino do Gêmeo Digital

*Marcus Vinícius Oliveira Ribeiro Brandão
Andressa Clara Barbosa de Araujo
Cristiane Agra Pimentel*

A revolução tecnológica da Indústria 4.0 tem transformado fundamentalmente os paradigmas educacionais, especialmente no que se refere ao ensino de conceitos complexos e abstratos como o Gêmeo Digital (*Digital Twin*). Essa tecnologia emergente, que consiste na criação de réplicas virtuais precisas de sistemas físicos, apresenta desafios únicos para o processo de ensino-aprendizagem devido à sua natureza multidisciplinar e à complexidade dos conceitos envolvidos (Grieves, 2014).

A gamificação, definida como a aplicação de elementos e mecânicas de jogos em contextos não lúdicos, emerge como uma estratégia pedagógica promissora para superar essas barreiras educacionais (Priyaadharshini; Maiti, 2023). Ao incorporar elementos como pontuação, níveis de progressão, desafios e recompensas, a gamificação tem demonstrado eficácia significativa no aumento do engajamento estudantil e na melhoria dos resultados de aprendizagem em diversas áreas do conhecimento (Minzi; Siyu; Yuyang, 2023).

No contexto específico do ensino do Gêmeo Digital, a gamificação oferece oportunidades únicas para abordar a complexidade conceitual e técnica desta tecnologia de forma mais acessível e envolvente. A natureza interativa e visual dos jogos alinha-se naturalmente com as características do Gêmeo Digital, proporcionando um ambiente de aprendizagem que pode simular cenários reais de aplicação dessa tecnologia (Bachmann; Silveira; Martins, 2024).

Este capítulo tem como objetivo explorar as conexões entre gamificação e o ensino do Gêmeo Digital, apresentan-

do fundamentos teóricos, modelos aplicáveis, casos práticos e perspectivas futuras. A relevância deste tema justifica-se pela crescente demanda por profissionais capacitados em tecnologias da Indústria 4.0 e pela necessidade de métodos de ensino inovadores que possam preparar adequadamente os estudantes para os desafios do mercado de trabalho contemporâneo.

Fundamentos da gamificação na Educação

A gamificação educacional baseia-se em princípios psicológicos e pedagógicos que exploram tanto a motivação intrínseca quanto a extrínseca, estimulando a interação direta (Barreto *et al.*, 2021). Segundo a Teoria da Autodeterminação, a motivação humana é influenciada por três necessidades psicológicas básicas: autonomia, competência e relacionamento social (Alnuaim, 2024).

A gamificação atende a essas necessidades ao proporcionar escolhas aos estudantes, desafios progressivos com *feedback* imediato e oportunidades de colaboração e competição. A Tabela 1 apresenta uma visão geral dos elementos fundamentais da gamificação.

Tabela 1: Elementos fundamentais da gamificação.

Elementos de Gamificação	Descrição
Pontos	Unidades de medida para o progresso e o desempenho do aluno
Badges	Representações visuais de conquistas específicas ou marcos alcançados
Níveis	Estruturas progressivas que indicam o avanço do aluno através do conteúdo ou de desafios

Elementos de Gamificação	Descrição
Placares de Líderes	Classificações que mostram o desempenho dos alunos em relação aos seus pares
Missões	Tarefas ou problemas específicos que os alunos devem completar
Feedback Imediato	Respostas rápidas sobre o desempenho do aluno em uma atividade
Narrativa / História	Um enredo ou contexto temático que envolve as atividades de aprendizagem
Personalização	Adaptação do conteúdo, desafios ou recompensas às necessidades e preferências individuais do aluno
Colaboração	Elementos que incentivam o trabalho em equipe e a interação entre os alunos

Fonte: Elaboração própria (2025).

Pesquisas em neuroeducação têm revelado os mecanismos cerebrais subjacentes à eficácia da gamificação. O sistema de recompensa do cérebro, mediado pela dopamina, é ativado tanto por recompensas reais quanto por recompensas virtuais obtidas em jogos (Vergara *et al.*, 2024). Essa ativação neurológica resulta em maior motivação, atenção sustentada e formação de memórias mais duradouras.

Gêmeo Digital como objeto de ensino

O Gêmeo Digital representa um dos conceitos mais complexos da Indústria 4.0, integrando conhecimentos de engenharia, ciência da computação, matemática aplicada, física e gestão de dados (Karamian, 2024). Essa complexidade conceitual apresenta desafios significativos para o ensino tradicional, uma vez que requer a compreensão simultânea de múltiplas camadas de abstração: desde a modelagem mate-

mática de sistemas físicos até a implementação de algoritmos de *machine learning* para análise preditiva (Quinalha, 2018).

Segundo Rasheed, San e Kvamsdal (2020), o domínio do Gêmeo Digital exige o desenvolvimento de competências técnicas e transversais específicas. Entre as competências técnicas destacam-se: modelagem e simulação computacional, análise de dados, programação orientada a objetos, conhecimentos de sensoriamento e Internet das Coisas (IoT). As competências transversais incluem pensamento sistêmico, resolução de problemas complexos, trabalho colaborativo interdisciplinar e comunicação técnica eficaz.

A interdisciplinaridade própria do Gêmeo Digital requer que os estudantes desenvolvam habilidades de integração de conhecimentos, sendo capazes de conectar conceitos aparentemente díspares em soluções coerentes e funcionais. Esta capacidade de síntese representa um dos maiores desafios educacionais.

O Gêmeo Digital oferece oportunidades únicas para a aplicação de estratégias gamificadas. A natureza visual e interativa dos Gêmeos Digitais alinha-se naturalmente com elementos de jogos, permitindo a criação de ambientes de aprendizagem imersivos onde os estudantes podem manipular parâmetros virtuais e observar os resultados em tempo real (Wright; Davidson, 2020).

A possibilidade de simular cenários diversos sem riscos físicos ou custos elevados torna o Gêmeo Digital um ambiente ideal para experimentação e aprendizagem por tentativa e erro (Bachmann; Silveira; Martins, 2024). Os estudantes podem explorar diferentes configurações, testar hipóteses e aprender com os resultados, desenvolvendo intuição e compreensão profunda dos sistemas estudados.

A capacidade de gamificar processos de otimização e tomada de decisão, através da criação de desafios e missões

baseados em cenários reais, permite que os estudantes desenvolvam habilidades práticas enquanto se divertem e se engajam com o conteúdo (Gaonkar *et al.*, 2022). Esta abordagem pode transformar conceitos abstratos em experiências concretas e memoráveis.

Gamificação no Gêmeo Digital

O modelo MDA (*Mechanics, Dynamics, Aesthetics*), proposto por Hunicke, LeBlanc e Zubek (2004), fornece uma estrutura fundamental para o *design* de experiências gamificadas aplicadas ao ensino do Gêmeo Digital. As mecânicas (*Mechanics*) referem-se aos componentes básicos do jogo, incluindo regras, ações disponíveis e recursos do sistema (Minzi; Siyu; Yuyang, 2023). No contexto do GD, as mecânicas podem incluir a manipulação de parâmetros de simulação, coleta e análise de dados de sensores e implementação de algoritmos de controle.

As dinâmicas (*Dynamics*) emergem da interação dos jogadores com as mecânicas e entre si, criando padrões de comportamento e estratégias (Minzi; Siyu; Yuyang, 2023). No ensino do Gêmeo Digital, as dinâmicas podem incluir colaboração em projetos de equipe, competição entre grupos para otimizar sistemas e progressão através de níveis crescentes de complexidade. A estética (*Aesthetics*) refere-se às respostas emocionais evocadas pela experiência, como sensação de descoberta, satisfação pela resolução de problemas e orgulho pelas conquistas alcançadas (Minzi; Siyu; Yuyang, 2023).

A Teoria do Estado de Fluxo, conceito estabelecido pelo psicólogo húngaro-americano Csikszentmihalyi, descreve não apenas um alto nível de engajamento, mas também um estado psicológico de profunda absorção e prazer em uma atividade em que o desafio corresponde à habilidade (Zhou, 2025). No

contexto do ensino gamificado do Gêmeo Digital, manter os estudantes na zona de fluxo requer um *design* cuidadoso da progressão de dificuldade e da personalização de desafios.

A integração entre Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP) e gamificação oferece um modelo poderoso para o ensino do Gêmeo Digital. Nesse modelo, os estudantes enfrentam desafios apresentados como missões ou *quests* (Cavalcante *et al.*, 2018). Assim, o aluno pode desenvolver Gêmeos Digitais para resolver problemas reais da indústria.

A gamificação da ABP pode incluir elementos como sistemas de reputação baseados na qualidade das soluções propostas, competições entre equipes para desenvolver os Gêmeos Digitais mais eficazes e premiações por inovação e criatividade (Cavalcante *et al.*, 2018). Esse modelo promove não apenas o aprendizado técnico, mas também o desenvolvimento de habilidades de pesquisa, colaboração e comunicação essenciais.

Desenvolvimento de ambientes virtuais gamificados

O desenvolvimento de ambientes virtuais gamificados para o ensino do Gêmeo Digital requer uma arquitetura robusta e flexível que possa integrar múltiplos componentes tecnológicos. A arquitetura típica inclui interface do usuário, motor de gamificação, sistema de gerenciamento de progresso e *analytics*, além de Interfaces de Programação de Aplicações (APIs) para sistemas externos (González-Fernández *et al.*, 2022).

As tecnologias contemporâneas para desenvolvimento de ambientes gamificados incluem *engines* de jogos como *Unity* e *Unreal Engine*, *frameworks web* como *React* e *Angular* para interfaces responsivas, e plataformas de *cloud computing* como *AWS* e *Azure* para escalabilidade e processamento de dados em tempo real (Balla *et al.*, 2023).

O *design* de UX para ambientes gamificados de ensino do Gêmeo Digital deve equilibrar elementos de jogo com objetivos educacionais, evitando o que Kapp (2012) denomina "*chocolate-covered broccoli*", a simples adição superficial de elementos de jogo a conteúdo educacional. O *design* eficaz requer uma integração orgânica entre mecânicas de jogo e objetivos de aprendizagem.

Segundo Handayani *et al.* (2020), os princípios de *design* importantes incluem *feedback* imediato e claro, progressão visível, escolhas significativas e personalização. O *feedback* deve informar os estudantes não apenas sobre seu progresso no jogo, mas também sobre sua compreensão conceitual e desenvolvimento de habilidades. A progressão deve refletir tanto avanços no jogo quanto no aprendizado real.

Casos de aplicação e estudos empíricos

Os Gêmeos Digitais são concebidos para diversos setores industriais, especialmente na educação Ciência, Tecnologia, Engenharia, Artes e Matemática (no inglês, STEAM). Eles possibilitam simulações de experimentos científicos, simulações de processos e visualização de conceitos abstratos. Na educação em saúde, os Gêmeos Digitais facilitam o treinamento em procedimentos médicos, veterinários, de enfermagem e odontológicos, incluindo treinamento cirúrgico e simulação de anatomia humana e animal (Bachmann; Silveira; Martins, 2024).

Exemplos específicos incluem ambientes de museus virtuais, educação em robótica, *design* de parques de cidades inteligentes e modelos de linhas de produção usando *Unity* e *Game4Automation* (Balla *et al.*, 2023). A ampla aplicabilidade dos Gêmeos Digitais em diversas disciplinas os posiciona como um "objeto de fronteira" na educação. A Tabela 2 apresenta exemplos de aplicações de Gêmeos Digitais gamificados na educação.

Tabela 2: Aplicações de Gêmeos Digitais gamificados.

Disciplina	Tipo de Aplicação	Elementos de Gamificação
Engenharia Mecânica	Laboratório virtual de motores para análise de comportamento de motores de combustão interna	Interação multiusuário, simulação de condições operacionais
Engenharia Industrial	Treinamento em manutenção de equipamentos e operações industriais	Cenários gamificados, <i>feedback</i> de desempenho, simulação de falhas
Engenharia Civil	Design e gestão de projetos de construção, incluindo cidades inteligentes	Desafios de <i>design</i> , competição entre equipes, acompanhamento de progresso
Educação STEAM (Geral)	Simulações de experimentos científicos e visualização de conceitos abstratos	Pontos, distintivos, níveis, questionários
Educação em Saúde	Treinamento em procedimentos médicos e simulação de anatomia	Cenários de simulação com <i>feedback</i> de desempenho, desafios de diagnóstico

Fonte: Elaboração própria (2025).

Um estudo experimental sobre experiências de Realidade Virtual gamificadas versus não gamificadas em um museu virtual revelou que a gamificação impulsionou significativamente a dimensão de recompensa do engajamento e a dimensão de esforço da motivação, embora seu impacto nos resultados de aprendizagem fosse menos acentuado (Chernbumroong *et al.*, 2024). Isso indica que, embora a gamificação seja excelente em tornar a aprendizagem atraente e motivadora, o *design* da experiência gamificada e sua integração com o Gêmeo Digital devem ser cuidadosamente calibrados para garantir que os elementos do jogo realmente apoiem a

aprendizagem profunda e a retenção de conhecimento, em vez de se tornarem uma distração ou um fim em si mesmos (Wulan *et al.*, 2024).

Desafios e perspectivas futuras

A implementação de ambientes gamificados para ensino do Gêmeo Digital enfrenta desafios técnicos significativos relacionados à complexidade computacional dos sistemas de simulação em tempo real. A necessidade de processar grandes volumes de dados, executar simulações complexas e manter responsividade da interface simultaneamente, requer recursos computacionais substanciais e otimização cuidadosa de performance (Kumar *et al.*, 2019).

Um dos principais desafios pedagógicos é evitar que os elementos gamificados se tornem distrações que prejudiquem o aprendizado ao invés de facilitá-lo. O fenômeno conhecido como "*gamification pitfall*" ocorre quando estudantes se focam exclusivamente em obter pontos e *badges* sem desenvolver compreensão conceitual profunda (Hanus; Fox, 2015).

A implementação de ambientes gamificados de alta qualidade requer investimentos substanciais em desenvolvimento de *software*, infraestrutura computacional e treinamento de pessoal. Muitas instituições educacionais enfrentam limitações orçamentárias que tornam difícil justificar esses investimentos, especialmente considerando a incerteza sobre o retorno educacional e a rápida obsolescência tecnológica (Dichev; Dicheva, 2017).

A adoção de métodos gamificados pode enfrentar resistência de educadores tradicionais que questionam a seriedade e eficácia educacional de abordagens baseadas em jogos. Essa resistência pode ser particularmente forte em ambientes acadêmicos conservadores onde métodos tradicionais de

ensino são profundamente enraizados e valorizados (Kiryakova; Angelova; Yordanova, 2014).

Ambientes gamificados podem inadvertidamente criar barreiras para estudantes com diferentes habilidades, preferências de aprendizagem ou contextos socioeconômicos. Elementos visuais intensivos podem excluir estudantes com deficiências visuais, enquanto mecânicas competitivas podem desencorajar estudantes com menor confiança em suas habilidades técnicas (Seaborn; Fels, 2015).

A convergência da gamificação, Inteligência Artificial (IA), Realidade Virtual (RV) e Realidade Aumentada (RA) está transformando drasticamente as práticas pedagógicas tradicionais, criando ambientes de aprendizagem imersivos (Oliveira *et al.*, 2025). Segundo Fauzi (2025), a personalização impulsionada pela IA é uma tendência futura-chave, onde a IA analisa o comportamento do aluno para ajustar dinamicamente os desafios e recomendar recursos específicos. O autor também destaca que a aprendizagem imersiva com RV/RA permitirá que os alunos explorem cenários históricos ou "entrem" em uma célula para experimentos de biologia.

Blockchain para credenciamento de habilidades é uma tendência emergente, permitindo que os alunos ganhem e armazenem com segurança microcredenciais, gamificando a aprendizagem ao longo da vida (Fauzi, 2025).

Os Gêmeos Digitais Humanos (GDHs) são uma tecnologia emergente que representa os seres humanos como a entidade física subjacente, com potencial significativo em campos que vão da saúde aos esportes (Lauer-Schmaltz *et al.*, 2024). Na educação, os "Gêmeos Educacionais" (um tipo de GDH) poderiam permitir que os professores se "dividam" para fornecer ajuda individualizada em qualquer lugar, a qualquer hora, preservando características visuais, mentais e sociais por meio de IA e RA.

Referências

ALNUAIM, A. The impact and acceptance of gamification by learners in a digital literacy course at the undergraduate level: Randomized controlled trial. **JMIR Serious Games**, v. 12, 2024.

BACHMANN, J. E. C.; SILVEIRA, I. F.; MARTINS, V. F. Digital Twins for Education: A Literature Review. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO (CBIE), 13.; **Simpósio Brasileiro de Informática na Educação (SBIE)**, 35., 2024. Anais [...]. Porto Alegre: SBC, 2024.

BALLA, M. *et al.* Educational case studies: Creating a digital twin of the production line in TIA Portal, Unity, and Game4Automation Framework. **Sensors**, v. 23, n. 10, 2023.

BARRETO, M. A. *et al.* Gamification in the teaching of natural sciences: articulating the active methodology in didactic sequences in elementary school through PIBID. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 7, n. 4, 2021.

CAVALCANTE, A. N. *et al.* Análise da produção bibliográfica sobre Problem-Based Learning (PBL) em quatro periódicos selecionados. **Revista Brasileira de Educação Médica**, v. 42, n. 1, p. 13-24, 2018.

CHERBUMROONG, S. *et al.* Comparing the impact of non-gamified and gamified virtual reality in digital twin virtual museum environments: A case study of Wieng Yong House Museum, Thailand. **Heritage**, v. 7, n. 4, p. 1870-1892, 2024.

DICHEV, C.; DICHEVA, D. Gamifying education: what is known, what is believed and what remains uncertain: a critical review. **International Journal of Educational Technology in Higher Education**, v. 14, n. 9, 2017.

FAUZI, A. R. Gamification in education: benefits, challenges, and future trends. **Cebirra**, 29 jan. 2025. Disponível em: <https://www.cebirra.id/gamification-in-education-benefits-challenges-and-future-trends/>. Acesso em: 25 maio 2025.

GAONKAR, S. *et al.* Impact of Gamification on Learning and Development. **Journal of Advances in Education and Philosophy**, Dubai, v. 6, n. 2, p. 63-70, fev. 2022.

GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, A. *et al.* Models of instructional design in gamification: a systematic review. **Education Sciences**, v. 12, n. 1, 2022.

GRIEVES, M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. [S. l.]: [s. n.], 2014.

HANDAYANI, V. *et al.* Gamified learning platform analysis for designing a gamification-based UI / UX of E-learning applications: A systematic literature review. In: **International Conference on Cyber and it Service Management (CITSM)**, 8., 2020, Pangkal, Indonesia. [Anais...]. Pangkal, Indonesia: IEEE, 2020. p. 1-5.

HANUS, M. D.; FOX, J. Assessing the effects of gamification in the classroom: A longitudinal study on intrinsic motivation, social comparison, satisfaction, effort, and academic performance. **Computers & Education**, v. 80, p. 152-161, 2015.

HUNICK, R.; LEBLANC, M.; ZUBEK, R. MDA: A formal approach to game design and game research. In: **Game Developers Conference**, 2004, San Jose. Anais [...]. San Jose: CMP Media, 2004.

KAPP, K. The gamification of learning and instruction: game-based methods and strategies for training and education. San Francisco, CA: **Pfeiffer**, 2012.

KARAMIAN, V. Introduction to Digital Twin Technology. **CSUN News**, 16 out. 2024. Disponível em: <https://news.csun.edu/education/introduction-to-digital-twin-technology/>. Acesso em: 25 maio 2025.

KIRYAKOVA, G.; ANGELOVA, N.; YORDANOVA, L. Gamification in Education. In: **International Balkan Education and Science Conference**, 9., 2014, Edirne, Turkey. [Anais...]. Edirne, Turkey: Trakya University, 2014. p. 679-683.

KUMAR, S.; TIWARI, P.; ZYMBLER, M. Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. **Journal of Big Data**, v. 6, n. 111, p. 1–21, 2019.

LAUER-SCHMALTZ, M. W. *et al.* Towards the Human Digital Twin: Definition and Design–A survey. [S. l.]: [s. n.], 2024.

LI, M.; MA, S.; SHI, Y. Examining the effectiveness of gamification as a tool promoting teaching and learning in educational settings: a meta-analysis. **Frontiers in Psychology**, 2023.

OLIVEIRA, M. D. *et al.* Gamification, artificial intelligence and virtual reality: the future of the classroom is here! ARACÊ, [S. l.], v. 7, n. 4, p. 15954–15968, 2025.

PRIYAADHARSHINI, M.; MAITI, M. Learning analytics: gamification in flipped classroom for higher education. **Journal of Engineering Education Transformations**, v. 37, n. 1, p. 106–119, 2023.

QUINALHA, E. Gêmeos digitais, o futuro da indústria 4.0: estudo de caso. 2018. 61 f. Monografia de Especialização (Curso de Especialização em Redes de Computadores e Teleinformática) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

RASHEED, A.; SAN, O.; KVAMSDAL, T. Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. **IEEE Xplore**, v. 8, p. 21980–22012, 2020.

SEABORN, K.; FELS, D. I. Gamification in theory and action: a survey. **International Journal of Human-Computer Studies**, v. 74, p. 14–31, 2015.

VERGARA, M. V. M. *et al.* Gamificação e neuroeducação: estratégias inovadoras para potencializar a aprendizagem cerebral. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S. l.], v. 10, n. 8, p. 605–617, 2024.

WRIGHT, L.; DAVIDSON, S. How to tell the difference between a model and a digital twin. **Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences**, v. 7, n. 13, 2020.

WULAN, D. R. *et al.* Exploring the benefits and challenges of gamification in enhancing student learning outcomes. **Global International Journal of Innovative Research**, v. 2, n. 7, p. 1657–1674, 2024.

ZHOU, Y. Effectiveness assessment of educational theories in VR game design. **Frontiers in Educational Research**, v. 8, p. 124–136, 2025.



Desenvolvimento e aplicação: casos do Gêmeo Digital

*Andressa Clara Barbosa de Araujo
Cristiane Agra Pimentel*

Alicerçado no avanço das tecnologias habilitadoras, o conceito de Gêmeo Digital (GD) transcende a ideia de representação virtual de um ativo físico, consolidando-se como um sistema dinâmico e inteligente (Araujo *et al.*, 2024). No cerne dessa revolução, as tecnologias habilitadoras desempenham um papel crucial na viabilização e potencialização dos Gêmeos Digitais. A Internet das Coisas (IoT) fornece uma vasta rede de sensores e dispositivos conectados que coletam dados em tempo real do objeto físico. A inteligência artificial (IA) e o aprendizado de máquina (ML) analisam esse fluxo contínuo de informações, identificando padrões, realizando previsões e otimizando o desempenho do Gêmeo Virtual. A computação em nuvem oferece a infraestrutura escalável e flexível necessária para armazenar e processar grandes volumes de dados, enquanto a realidade virtual (RV) e a realidade aumentada (RA) proporcionam interfaces imersivas para visualização e interação com o GD (Tao *et al.*, 2023).

Apesar de ser voltada à manufatura, e associada à indústria, a aplicação do Gêmeo Digital em diversos segmentos demonstra seu potencial para gerar valor, otimizar processos e impulsionar a inovação, consolidando-o como uma tecnologia fundamental para o futuro (Araujo *et al.*, 2024). Avanços recentes têm mostrado sistemas complexos com aplicação de modelagens na indústria automobilística para veículos elétricos, no ramo da construção civil, agricultura, rede elétrica, indústria do petróleo, indústria farmacêutica e áreas da saúde,

contribuem para soluções digitais frente aos desafios contemporâneos (Silva, 2024).

No setor da saúde, o Gêmeo Digital é aplicado para além de equipamentos e instalações, quando relacionado ao paciente possibilita a integração de dados genômicos, histórico médico, informações de dispositivos vestíveis e resultados de exames, abre novas perspectivas para a medicina personalizada. Além disso, os GDs podem ser utilizados para otimizar o fluxo de pacientes em hospitais, gerenciar recursos de forma eficiente e aprimorar a segurança dos procedimentos (Monteiro *et al.*, 2025).

O Gêmeo Digital para a indústria se revela um catalisador para a otimização de todo o ciclo de vida de produtos e processos. Desde a concepção e o projeto, passando pela simulação de desempenho e a identificação de falhas potenciais, até o monitoramento em tempo real da produção e a manutenção preditiva de equipamentos, o GD permite aumentar a eficiência, reduzir custos, melhorar a qualidade e acelerar a inovação. A capacidade de simular cenários complexos e testar diferentes configurações virtualmente antes da implementação física representa uma vantagem competitiva significativa para as indústrias (Brambilla *et al.*, 2024).

A aplicação do Gêmeo Digital na construção civil revoluciona o planejamento, a execução e o gerenciamento de projetos. Ao criar representações virtuais detalhadas de edifícios e infraestruturas, é possível simular o comportamento estrutural, otimizar o uso de materiais, prever cronogramas e identificar potenciais conflitos antes mesmo do início da construção física. Durante a fase de operação, o GD permite monitorar o desempenho energético, gerenciar a manutenção e otimizar o uso do espaço, contribuindo para edifícios mais eficientes, seguros e sustentáveis (Wang *et al.*, 2023).

O setor energético também se beneficia enormemente do potencial dos Gêmeos Digitais. Desde a otimização da operação de usinas de energia e redes de distribuição até a simulação de cenários de geração renovável e o gerenciamento inteligente de recursos, o GD oferece ferramentas poderosas para aumentar a eficiência, a confiabilidade e a sustentabilidade do sistema energético. A capacidade de prever a demanda, otimizar o armazenamento de energia e simular o impacto de eventos climáticos extremos contribui para um setor mais resiliente e eficiente (Khan *et al.*, 2022).

Desse modo, o estudo apresenta as possíveis aplicações e usos do Gêmeo Digital nas áreas da indústria, saúde, construção civil e energia, por meio do levantamento de exemplos existentes na literatura no formato de cases reais do uso do GD para soluções digitais nas referidas áreas. Desse modo, realiza-se uma pesquisa documental, enquanto técnica qualitativa, para auxiliar no entendimento científico da temática central deste, em um determinado período, esclarecendo assim inquietações relacionadas aos casos de uso do GD. Esse tipo de pesquisa, assim como outros formatos, tem como proposta a produção de conhecimentos, sendo assim, ela se apresenta como uma opção para o entendimento de fenômenos pesquisados (Júnior; Batista, 2023).

Indústria e manufatura

A tecnologia de Gêmeos Digitais está se consolidando como uma ferramenta indispensável na transformação digital da indústria, especialmente no contexto da Indústria 4.0. Essa tecnologia consiste em criar réplicas digitais de equipamentos, processos ou sistemas físicos, permitindo simulações, previsões e controle remoto em tempo real. Entre suas principais aplicações estão o monitoramento contínuo de operações, a

otimização de processos produtivos e a antecipação de falhas, o que resulta em maior eficiência operacional e redução de custos (Mocanu *et al.*, 2024).

A aplicação de Gêmeos Digitais em processos de manufatura tem crescido exponencialmente. Os modelos digitais já foram implementados em áreas como usinagem CNC, fundição, conformação de chapas metálicas e processamento de alimentos. Contudo, é na Manufatura Aditiva que os Gêmeos Digitais vêm ganhando destaque, em especial por sua capacidade de produzir peças com geometrias complexas, controle da distribuição de material e digitalização completa do processo. Apesar dos benefícios evidentes, a aplicação de Gêmeos Digitais na manufatura aditiva ainda enfrenta desafios, como a necessidade de desenvolvimento de modelos personalizados para diferentes tipos de processos e aplicações, o que demanda alto investimento financeiro e conhecimento técnico especializado. Além disso, muitas soluções dependem de dados históricos robustos, o que limita sua adoção por pequenas e médias empresas, cujos equipamentos podem não fornecer dados suficientes para alimentar esses modelos digitais com precisão (Wang *et al.*, 2024).

No campo da gestão de cadeias de suprimentos internas (ISCs), os Gêmeos Digitais também começam a transformar os processos decisórios. Uma recente proposta desenvolveu uma plataforma de planejamento de produção baseada em simulação multiplanta que utiliza GDs para analisar diferentes cenários de fabricação. A arquitetura modular e orientada para objetos permite flexibilizar e adaptar os processos produtivos de forma dinâmica, reduzindo atrasos e melhorando o desempenho geral do sistema em ambientes de alta variabilidade de demanda. A plataforma mencionada foi validada em um estudo de caso no setor de petróleo e gás, demonstrando que a utilização de Gêmeos Digitais pode reduzir significativamen-

te o tempo médio de fluxo e o número de pedidos atrasados (Bonci *et al.*, 2024).

Outra contribuição relevante está no uso de Gêmeos Digitais para processos de soldagem por fricção e mistura (FSW). Nesse caso, um modelo digital em nuvem foi conectado à máquina física, analisando dados em tempo real e permitindo intervenções imediatas no processo de fabricação. A solução integrou diagnóstico contínuo e previsão da condição da ferramenta, evitando falhas e desperdícios, e demonstrou a importância de integrar computação em nuvem e *edge computing* para ampliar o potencial dessa tecnologia. Estudos de caso como o da manufatura FSW apontam que, além da supervisão em tempo real, os GDs permitem armazenar históricos de operação e realizar análises preditivas e de tendências (Nandal *et al.*, 2021).

No contexto de sistemas de manufatura flexível (FMS), a integração de DTs tem possibilitado avanços no desenvolvimento de linhas de produção inteligentes. Um projeto recente implementou um Gêmeo Digital em um FMS experimental, processando peças cilíndricas. Por meio de simulações baseadas em tempo e eventos, foram identificadas colisões e falhas, e propostas soluções de otimização, como o uso de robôs colaborativos e veículos guiados automaticamente (AGVs), consolidando a aplicação prática da Indústria 4.0 (Ciobanu *et al.*, 2024).

A adoção de Gêmeos Digitais nesses ambientes complexos proporciona não apenas ganhos operacionais, mas também benefícios estratégicos, como a customização em massa de produtos sob demanda. Além disso, permite integrar tecnologias emergentes da Indústria 5.0, promovendo a colaboração homem-máquina e a utilização de robótica colaborativa. Esse avanço evidencia o potencial dos GDs como tecnologia habilitadora para a próxima geração de fábricas intelligen-

tes (Ciobanu *et al.*, 2024). Outro aspecto relevante refere-se às limitações e desafios que a tecnologia ainda enfrenta, como a necessidade de integração de dados entre diferentes sistemas de informação corporativos. Muitas empresas possuem plantas adquiridas de grupos distintos, com sistemas heterogêneos, o que dificulta a comunicação entre os Gêmeos Digitais. Estudos sugerem a necessidade de criar plataformas compatíveis com múltiplos formatos e padrões de dados para viabilizar a integração total em ambientes industriais reais (Bonci *et al.*, 2024).

Embora os benefícios da aplicação de Gêmeos Digitais na indústria sejam evidentes, sua adoção ainda depende da superação de barreiras como custos de implementação, disponibilidade de infraestrutura digital, capacitação da força de trabalho e integração entre sistemas. As perspectivas futuras apontam para o uso combinado de inteligência artificial e otimização automatizada, tornando os Gêmeos Digitais cada vez mais autônomos e integrados aos processos decisórios industriais (Mocanu *et al.*, 2024).

Construção civil

O conceito de infraestrutura inteligente evoluiu ao longo dos anos e foi aplicado em vários campos, ou seja, distribuição de eletricidade, sistemas de emergência ou monitoramento de infraestrutura (Pavón *et al.*, 2025). Avanços na Construção Civil, que abrangem muitos campos, são chamados a trazer novos ecossistemas econômicos e tecnológicos. Isso pode ter consequências profundas para as partes interessadas existentes e novas. Fabricação industrial, tecnologias digitais e sistemas ciberfísicos representam três vastos domínios para crescimento potencial. A digitalização de procedimentos em canteiros de obras é um grande desafio devido ao número de processos não digitalizados e ao número e variedade de partes interessadas. É reconhecido que a adoção de muitos dos avanços

encontrados no setor da construção é atualmente desigual na maioria dos canteiros de obras (Chacón *et al.*, 2024).

O termo Construção 4.0 representa uma tentativa de adaptar a Indústria 4.0 para a construção civil e uma oportunidade de superar os desafios mencionados e as perdas e ineficiências em termos de processos, fluxos de informações e trabalho colaborativo. Os princípios da Indústria 4.0 podem ajudar as empresas de construção a reduzirem a complexidade e a incerteza, aprimorar a troca de informações e a comunicação entre as partes interessadas no projeto e, dessa forma, aumentar a produtividade e a qualidade. A sua adoção pode ainda trazer consideráveis benefícios nas áreas de segurança e sustentabilidade, além de melhorar a longo prazo a imagem da indústria da construção (Araújo, 2021).

No Brasil os projetos do setor da construção civil são impulsionados por soluções de *Building Information Modeling* (BIM) que integram Gêmeos Digitais para monitoramento em tempo real (Silveira; Cardoso; Martins, 2024). Um dos elementos beneficiados com o uso do GD, e que podem ser observados nos espaços urbanos, são as Obras de Arte Especiais (OAE), caracterizadas por pontes, viadutos e passarelas. Nogueira e Afonso (2022) apresentaram de forma prática a utilização combinada de conceitos de BIM e GD na gestão de pontes e viadutos, estruturas de extrema importância para a logística de qualquer país. Através dos estudos, observou-se a otimização na realização das inspeções em campo, permitindo maior precisão das informações coletadas e tratadas e redução do tempo necessário no fluxo de coleta, processamento e disponibilização dos dados. Além disso, por ser uma metodologia de trabalho que promove intensa digitalização e integração de uma série de grupos informacionais, existe a expectativa de redução entre 10% e 25% das despesas operacionais associadas a esse tipo de atividade.

Já Mariano *et al.* (2024) apresenta um estudo sobre o uso de sensores de umidade para monitorar os fenômenos de umidade ascendente e descendente, visando construir um sistema de monitoramento para edifícios de alvenaria considerados patrimônios materiais. A rede de sensores foi instalada nas fachadas de edifícios, e interage com o modelo digital da construção que monitora patologias do ambiente construído. O protótipo monitora o patrimônio cultural e obteve êxito em todas as fases do sistema, incluindo a coleta de informações, transmissão, análise e tratamento de dados. No entanto, os autores ressaltam que o monitoramento por sensores, da forma como foi feita no estudo, é uma prática invasiva devido às perfurações necessárias.

O Gêmeo Digital também pode ser aplicado no cumprimento de normas e requisitos técnicos da área da construção civil. A atualização da norma NBR 9452, em 2019, requer um maior número de fotografias da obra de arte especial (OAE). Nesse sentido, Teixeira (2023) propõe o desenvolvimento de um Gêmeo Digital do Viaduto sobre a FCA, localizado no km 19 da rodovia BR-262/ES, com a aplicação do procedimento de inspeção rotineira conforme a NBR 9452:2019. Com o uso da metodologia, o autor afirma que é possível mensurar a extensão e área de ocorrência das patologias e dimensionar as soluções e quantitativos necessários para reparo da estrutura, agilizando os procedimentos de orçamento e contratação da recuperação, quando estes se fizerem necessários.

Setor energético

No setor energético, essa tecnologia tem possibilitado novas formas de monitoramento e controle, otimizando operações e antecipando falhas (Neos Advisory, 2024). Com o avanço da digitalização, empresas e gestores públicos têm

adotado Gêmeos Digitais para maximizar a eficiência de seus ativos e contribuir para a sustentabilidade ambiental.

Nos últimos anos, o setor energético vem passando por uma transformação significativa, impulsionada principalmente pela digitalização e pela busca por soluções mais eficientes e sustentáveis. Nesse contexto, os Gêmeos Digitais se consolidam como uma tecnologia estratégica, permitindo a criação de representações virtuais de ativos e sistemas energéticos reais. Por meio de sensores e modelos computacionais, essas réplicas digitais possibilitam o monitoramento, simulação e otimização de processos em tempo real, melhorando o desempenho operacional e a tomada de decisão no setor (Nikitin *et al.*, 2023).

A aplicação de Gêmeos Digitais em usinas de geração de energia tem se mostrado promissora, principalmente no aprimoramento da eficiência e no suporte à manutenção preditiva. Em usinas termelétricas, por exemplo, modelos virtuais são utilizados para simular diferentes condições de operação e identificar estratégias que reduzam o consumo de combustível e as emissões. Xu *et al.* (2019) desenvolveram um Gêmeo Digital de uma usina de carvão que, ao otimizar variáveis operacionais, conseguiu diminuir o consumo de carvão por quilowatt-hora gerado, resultando em ganhos econômicos e ambientais consideráveis.

Outro setor que tem se beneficiado dessa tecnologia é o de parques eólicos. Com a utilização de Gêmeos Digitais, é possível prever o comportamento das turbinas sob diferentes condições meteorológicas e de carga, reduzindo paradas não programadas e otimizando a produção de energia. Estudos mostram que a adoção dessa abordagem permite identificar falhas em componentes antes que ocorram danos graves, além de orientar o melhor posicionamento das turbinas para maximizar a captação de vento (Sivalingam, 2018; Qaiser *et al.*, 2023).

Na energia hidrelétrica, modelos digitais também têm sido empregados para simular e prever o desempenho de usinas, considerando variações no nível dos reservatórios, demanda energética e condições ambientais. Zhao *et al.* (2021) propuseram um Gêmeo Digital para uma usina hidrelétrica que, ao incorporar técnicas de aprendizado de máquina, foi capaz de antecipar o comportamento operacional da planta, oferecendo suporte à gestão de recursos hídricos e à operação em tempo real.

No campo das energias renováveis, a indústria fotovoltaica vem utilizando Gêmeos Digitais para otimizar a manutenção e diagnosticar falhas em sistemas de geração distribuída. A abordagem permite comparar os dados reais de funcionamento dos sistemas com as previsões do modelo digital, identificando rapidamente anomalias e facilitando intervenções corretivas. Além disso, a metodologia proposta se mostra flexível para diferentes arquiteturas de conversão de energia, com aplicações que vão desde telhados solares até sistemas de integração em edifícios (Sivakumar *et al.*, 2020).

Grandes empresas do setor, como a *General Electric* (GE), desenvolveram plataformas que integram *hardware* e *software* para o gerenciamento de parques eólicos digitais. Por meio da plataforma Predix, a GE possibilita que seus clientes monitorem e otimizem o desempenho das turbinas com base em dados meteorológicos e operacionais em tempo real, além de realizar manutenções preditivas. Casos relatados demonstram economia significativa ao evitar falhas graves e ao prolongar a vida útil dos equipamentos (GE, 2021).

A tecnologia de Gêmeo Digital também avança no planejamento e operação de redes elétricas inteligentes. A Siemens, por exemplo, implementou soluções desse tipo na Finlândia, criando uma rede elétrica digital integrada capaz de simular cenários e otimizar a alocação de recursos energéticos. Essa iniciativa

permite prever o comportamento da rede frente às variações de carga e de fontes intermitentes, aumentando a segurança, confiabilidade e eficiência operacional (SIEMENS, 2022).

Por fim, a aplicação de Gêmeos Digitais no setor nuclear tem se destacado por seu potencial de aprimorar o monitoramento de equipamentos críticos e de proporcionar ambientes virtuais para treinamento de operadores. A *Électricité de France* (EDF) conduz um projeto que visa desenvolver réplicas digitais específicas para cada usina nuclear, integrando dados históricos e operacionais. Esse recurso permitirá não apenas o acompanhamento das condições dos equipamentos em tempo real, mas também a preservação de informações valiosas para o planejamento de futuras instalações (EDF, 2023).

Saúde

A tecnologia de Gêmeos Digitais tem se consolidado como uma ferramenta inovadora na área da saúde, oferecendo novas possibilidades para personalização do cuidado, monitoramento contínuo e tomada de decisão clínica. Entre as principais aplicações dessa tecnologia, destaca-se a capacidade de integrar informações provenientes de registros eletrônicos de saúde, dispositivos vestíveis e sensores médicos. Essa combinação de dados permite a construção de um perfil digital detalhado do paciente, possibilitando diagnósticos mais precisos e a elaboração de planos terapêuticos personalizados. Profissionais de saúde podem, com isso, acompanhar de forma contínua o estado clínico de seus pacientes e intervir precocemente em situações de risco, reduzindo o número de eventos adversos e hospitalizações (Jafari *et al.*, 2023).

No contexto da inteligência artificial, os Gêmeos Digitais estão sendo utilizados para o reconhecimento de emoções em tempo real, uma estratégia que melhora a compreensão do

estado emocional dos pacientes e permite intervenções oportunas. Utilizando recursos de aprendizado profundo e redes neurais, sistemas de reconhecimento de emoções podem ser integrados aos Gêmeos Digitais, auxiliando no diagnóstico precoce de doenças mentais, no monitoramento de estresse e no gerenciamento de condições crônicas, elevando a qualidade e a personalização do cuidado médico (Mukherjee *et al.*, 2022).

O uso de Gêmeos Digitais também se mostra promissor no tratamento de feridas crônicas, cuja cicatrização envolve processos complexos e de difícil monitoramento. Nesse campo, modelos preditivos baseados em inteligência artificial são utilizados para simular a evolução da cicatrização de feridas a partir de imagens obtidas antes e depois do tratamento. A análise comparativa entre a ferida real e seu Gêmeo Digital permite identificar padrões de não cicatrização precocemente, possibilitando ajustes no plano terapêutico e melhorando os resultados clínicos (Wang *et al.*, 2023).

No combate ao câncer cervical, uma das principais causas de mortalidade feminina, a aplicação de Gêmeos Digitais tem demonstrado potencial para revolucionar os processos diagnósticos. Sistemas baseados em aprendizado de máquina, como o CervixNet, foram desenvolvidos para analisar imagens de células cervicais, classificando-as e identificando anomalias com elevada precisão. A integração desse recurso com Gêmeos Digitais permite um monitoramento contínuo e personalizado das pacientes, além de facilitar a detecção precoce da doença e o início imediato do tratamento, aumentando significativamente as taxas de cura (Khan *et al.*, 2024).

A segurança cibernética surge como um desafio essencial na implementação dos Gêmeos Digitais na saúde, visto que a coleta e processamento de dados sensíveis em tempo real expõem os sistemas a vulnerabilidades. Modelos de aprendizado profundo vêm sendo utilizados para identificar e mitigar

falhas de segurança em códigos de *software* utilizados em sistemas de IoT médicos. Um exemplo é o uso de redes Bi-LSTM combinadas com mecanismos de autoatenção para reconhecer padrões de vulnerabilidade em grandes bases de dados, aprimorando a resiliência cibernética de ambientes hospitalares conectados (Liu *et al.*, 2018).

Outro aspecto importante é a capacidade dos Gêmeos Digitais de apoiar decisões clínicas através de simulações prévias de tratamentos e procedimentos médicos. Isso permite testar virtualmente o impacto de diferentes abordagens terapêuticas antes de sua aplicação física, reduzindo riscos e otimizando recursos. A prática já vem sendo aplicada em áreas como cirurgia, tratamento oncológico e manejo de doenças crônicas, destacando-se pelo potencial de melhorar significativamente os resultados clínicos e a experiência do paciente (Jafari *et al.*, 2023).

Recentemente, surgiu o conceito de *Whole Body Digital Twin* (WBDT), como desenvolvido pela Q Bio, que propõe a criação de uma réplica digital completa do corpo humano. Essa abordagem integra exames de imagem, testes laboratoriais e dados fisiológicos contínuos, formando um modelo abrangente que permite monitoramento total da saúde de um indivíduo. A proposta visa antecipar doenças, otimizar intervenções preventivas e personalizar tratamentos com base em projeções precisas do estado de saúde futuro do paciente (Q BIO, 2024).

A implementação de Gêmeos Digitais também oferece oportunidades para otimizar os fluxos de trabalho em instituições de saúde. A integração desses sistemas com registros eletrônicos, agendas de atendimento e processos administrativos permite reduzir tempos de espera, evitar desperdícios e melhorar a utilização de recursos. Além disso, facilita o acompanhamento longitudinal dos pacientes, possibilitando o ajuste

dinâmico de tratamentos e intervenções conforme a evolução clínica registrada pelo Gêmeo Digital (Jafari *et al.*, 2023).

Apesar de seus benefícios, a adoção dos Gêmeos Digitais na saúde enfrenta desafios significativos, incluindo questões éticas, privacidade de dados, interoperabilidade entre sistemas e resistência cultural. A proteção de informações sensíveis e a criação de normas regulatórias adequadas são essenciais para garantir a segurança e a aceitação da tecnologia. Além disso, a capacitação de profissionais de saúde para o uso dessas ferramentas e a adaptação dos fluxos de trabalho tradicionais são passos fundamentais para sua implementação efetiva (Khan *et al.*, 2024).

Em termos técnicos, a principal dificuldade está na obtenção e integração de dados de diferentes fontes, que muitas vezes possuem formatos heterogêneos e padrões de qualidade variáveis. A interoperabilidade entre sistemas de informação de saúde e a padronização dos dados clínicos são imprescindíveis para o funcionamento eficaz dos Gêmeos Digitais. Além disso, o alto custo de infraestrutura tecnológica e o uso intensivo de recursos computacionais ainda são barreiras para a adoção em larga escala (Liu *et al.*, 2018).

Considerações finais

O avanço e a consolidação da tecnologia de Gêmeo Digital (GD) têm proporcionado profundas transformações nos mais diversos setores da economia e infraestrutura social. Ao longo deste capítulo, foi possível identificar, por meio de exemplos práticos e estudos de caso documentados na literatura, como essa tecnologia se adapta a contextos industriais, energéticos, de construção civil e da saúde, otimizando processos, reduzindo riscos e aumentando a previsibilidade operacional. A capacidade de criar réplicas digitais integradas a dados em tempo real e algoritmos de inteligência artificial

oferece um novo patamar de controle e tomada de decisão, evidenciando o potencial estratégico dos GDs para a gestão contemporânea.

Nos setores industrial e de manufatura, os Gêmeos Digitais vêm se consolidando como ferramentas essenciais para a simulação de cenários, antecipação de falhas e otimização de processos produtivos. Os cases analisados demonstraram ganhos em produtividade, eficiência energética e redução de custos operacionais. Contudo, ainda existem desafios consideráveis a serem superados, como a integração de sistemas heterogêneos, a disponibilidade de dados históricos robustos e os elevados custos de implementação. Superar essas barreiras será essencial para que pequenas e médias empresas também possam usufruir dos benefícios oferecidos pela digitalização avançada e pela Indústria 5.0.

No âmbito da construção civil, a tecnologia GD se apresenta como alternativa disruptiva, principalmente ao integrar conceitos de *Building Information Modeling* (BIM) e monitoramento inteligente em tempo real. Além disso, a tecnologia contribui significativamente para a sustentabilidade e segurança das obras, antecipando problemas estruturais e facilitando o planejamento de intervenções. O setor energético também se revelou terreno fértil para a adoção de Gêmeos Digitais, com aplicações que vão desde a otimização operacional de usinas termelétricas e hidrelétricas até a manutenção preditiva de parques eólicos e sistemas fotovoltaicos. As experiências relatadas demonstraram ganhos consistentes em eficiência, segurança e sustentabilidade.

Além disso, a utilização de GDs em redes elétricas inteligentes e usinas nucleares amplia a resiliência e a capacidade de resposta a cenários adversos, consolidando a tecnologia como peça-chave para a transição energética e para a construção de um setor mais limpo e inteligente. Por fim, na área

da saúde, os Gêmeos Digitais despontam como ferramentas promissoras para a medicina personalizada, monitoramento contínuo de pacientes e otimização de processos hospitalares. Os exemplos apresentados evidenciam a capacidade dos GDs de integrar dados clínicos, genéticos e fisiológicos, proporcionando diagnósticos mais precisos e planos terapêuticos personalizados. Os avanços recentes indicam que, com investimentos adequados e desenvolvimento de marcos regulatórios, os Gêmeos Digitais tendem a se tornar, em curto prazo, parte fundamental da assistência médica e da gestão hospitalar inteligente.

Referências

AHMAD, M. *et al.* Cervical Cancer Detection using a Digital Twin Framework. **Journal of Biomedical Informatics**, v. 153, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2024.104583>.

ARAUJO, A. C. B. de *et al.* Mercado do Gêmeo Digital: aplicação da matriz SWOT para análise mercadológica e tendências do setor. **Revista de Gestão e Secretariado**, [S. l.], v. 15, n. 9, p. e4160, 2024. DOI: 10.7769/gesec.v15i9.4160. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/4160>. Acesso em: 14 maio 2025.

BONCI, A. *et al.* A Digital Twin-based multiplant production planning platform for internal supply chains. **Computers & Industrial Engineering**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835224007927>. Acesso em: 1 jun. 2025.

BRAMBILLA, A.; COLOMBO, A. W.; HUSSAIN, A. Digital Twin for Industrial Applications: A Comprehensive Review. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 20, n. 1, p. 1–15, 2024.

CHACÓN, R. *et al.* Digital twinning of building construction processes. Case study: A reinforced concrete cast-in structure.

Journal of Building Engineering, [S. l.], v. 84, p. 108522, 2024.

CIOBANU, R. *et al.* Digital twin development for flexible manufacturing systems integrating robots and intelligent machine tools. **Machines**, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-1702/12/11/785>. Acesso em: 1 jun. 2025.

EDF. Électricité de France desenvolve Gêmeos Digitais para usinas nucleares. 2023. Disponível em: <https://www.edf.fr>. Acesso em: 1 jun. 2025.

GENERAL ELECTRIC. Predix Platform: Digital Twins for Wind Farms. 2021. Disponível em: <https://www.ge.com/digital>. Acesso em: 1 jun. 2025.

GOMEZ, N. *et al.* Digital Twin in Healthcare: Challenges and Future Perspectives. **Frontiers in Digital Health**, v. 5, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fdgth.2023.1253050/full>. Acesso em: 1 jun. 2025.

ISO. ISO 24237:2022, Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing. **Geneva: International Organization for Standardization**, 2022.

JAIN, R. *et al.* AI-based Digital Twin for Chronic Wound Management. **IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics**, v. 27, n. 2, p. 585–594, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/JBHI.2023.3234670>.

JÚNIOR, C. A. D. O. M.; BATISTA, M. C. Metodologia da pesquisa em educação e ensino de ciências. 1. ed. [S. l.]: **Atena Editora**, 2023. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/ebook/metodologia-da-pesquisa-em-educacao-e-ensino-de-ciencias>. Acesso em: 28 maio 2025.

KHAN, R. A. *et al.* Emotion Recognition System Integrated with Real-time Digital Twin for Personalized Healthcare. **IEEE Access**, v. 10, p. 78952–78964, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3187842>.

KHAN, S. *et al.* Digital twin in energy sector: Applications, challenges, and future directions. **Energy Research & Social Science**, v. 83, p. 102314, 2022.

Liu, Z., Meyendorf, N., Blasch, E., Tsukada, K., Liao, M., Mrad, N. (2025). O papel da fusão de dados na manutenção preditiva usando gêmeos digitais. In: **Meyendorf, N., Ida, N., Singh, R., Vrana, J. (eds) Manual de Avaliação Não Destrutiva 4.0. Springer, Cham.** https://doi.org/10.1007/978-3-030-48200-8_65-1.

MARIANO, P. O. P. *et al.* Aplicação de sensores de umidade para o monitoramento do patrimônio cultural construído. In: **XX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, 2024, Maceió, Brasil. Anais [...]. Maceió, Brasil: [s. n.], 2024. p. 1–12. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/5771>. Acesso em: 1 jun. 2025.

MOCANU, B. *et al.* Digital twin applications in manufacturing: state of the art and future directions. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05306-w>. Acesso em: 1 jun. 2025.

MONTEIRO, J. *et al.* Patient Digital Twin: A Revolution in Healthcare. **Journal of Biomedical Informatics**, v. 153, p. 104621, 2025.

NANDAL, A. *et al.* Digital twin for friction stir welding process: A cloud-based real-time data-driven approach. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-05306-w>. Acesso em: 1 jun. 2025.

NIKITIN, M. *et al.* Digital twins for energy sector: applications and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 165, p. 112658, 2023.

NOGUEIRA, R.; AFONSO, T. BIM como ferramenta multidisciplinar em todas as fases do processo arquitetônico. In: GRANJA, J.; MARTINS, J. P. **4o Congresso Português de Building Informa-**

tion Modelling vol. 1 – ptBIM. 1. ed. [S. l.]: UMinho Editora, 2022. p. 19–27. Disponível em: <https://ebooks.uminho.pt/index.php/uminho/catalog/view/32/132/1614-1>. Acesso em: 1 jun. 2025.

PAVÓN, R. M. *et al.* Bim-based Digital Twin development for university Campus management. Case study ETSICCP. **Expert Systems with Applications**, [S. l.], v. 262, p. 125696, 2025.

Q BIO. Introducing the Whole Body Digital Twin. **Q Bio Official Website**, 2023. Disponível em: <https://www.q.bio>. Acesso em: 1 jun. 2025.

SILVA, J. P. *et al.* Gêmeo Digital e Indústria 4.0: Uma revisão sistemática da literatura. **Revista Tecnológica**, v. 15, n. 2, p. 30–55, 2023.

SILVEIRA, I. F.; CARDOSO, A.; MARTINS, V. F. Aplicações, Desafios e Limitações dos Digital Twins na América Latina. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE SOFTWARE LIVRE E TECNOLOGIAS ABERTAS, 2024, Brasil. **Anais do XXI Congresso Latino-Americano de Software Livre e Tecnologias Abertas (Latinoware, 2024)**. Brasil: Sociedade Brasileira de Computação – SBC, 2024. p. 71–79. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/latinoware/article/view/31509>. Acesso em: 1 jun. 2025.

SIEMENS. Digital twins transform Finland’s power grid. 2022. Disponível em: <https://www.siemens.com>. Acesso em: 1 jun. 2025.

SIVALINGAM, K. Digital twin framework for offshore wind turbine operation and maintenance. **Journal of Wind Engineering**, v. 42, n. 3, p. 212–223, 2018.

SIVAKUMAR, A. *et al.* Digital twin-based fault diagnosis in distributed photovoltaic systems. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 35, n. 10, p. 10455–10466, 2020.

TAO, F.; ZHANG, M.; LICHTIG, W. Digital twin driven product design, manufacturing and service. **Frontiers in Mechanical Engineering**, v. 18, n. 1, p. 1–19, 2023.

TEIXEIRA, B. E. S. **Gêmeos digitais**: utilização de drones em inspeções rotineiras para modelagem de obras de arte especiais conforme NBR 9452:2019 – Aplicação no viaduto sobre a FCA em Viana/ES. 2023. 43f. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-graduação em Engenharia de Infraestrutura Urbana) – Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vitória, Vitória, 2023.

WANG, X. *et al.* Digital twins for additive manufacturing: Applications, challenges and future directions. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612524000797>. Acesso em: 1 jun. 2025.

WANG, Y. *et al.* Digital twin in construction: A bibliometric analysis and future research directions. **Automation in Construction**, v. 149, p. 104809, 2023.

WU, Y. *et al.* Cyber Resilience for Healthcare Digital Twins via Deep Learning-based Vulnerability Detection. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 7, n. 12, p. 12210–12222, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3010312>.

XU, B. *et al.* Digital twin-driven smart energy management for coal-fired power plants. **Energy Reports**, v. 5, p. 1224–1233, 2019.

ZHAO, X. *et al.* Data-driven digital twin for hydropower plants. **Applied Energy**, v. 300, p. 117307, 2021.



Tendências futuras: indústria 4.0 e o Gêmeo Digital

*Andressa Clara Barbosa de Araujo
Jhonatas Novais Silva
Cristiane Agra Pimentel*

As tendências associadas à Indústria 4.0 vêm promovendo uma transformação profunda nos processos industriais, impulsionadas pela convergência de tecnologias digitais como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, *big data*, manufatura aditiva e realidade aumentada. Esse movimento tem permitido a integração em tempo real entre os mundos físico e digital, otimizando operações, aumentando a eficiência e reduzindo custos operacionais. Dentro desse cenário, destaca-se a virtualização de processos industriais, conceito que viabiliza a modelagem, simulação e controle remoto de operações produtivas por meio de réplicas digitais de equipamentos, linhas de produção e ambientes industriais inteiros. Essa abordagem, além de possibilitar a antecipação de falhas e o planejamento preditivo, permite a realização de ajustes e melhorias em tempo real, sem a necessidade de intervenções físicas diretas, ampliando significativamente a flexibilidade e a competitividade das organizações (Pinto; Lima; Maduro, 2024).

Nesse contexto, os relatórios de megatendências tecnológicas tornam-se instrumentos estratégicos para orientar a inovação industrial. O IEEE, em sua publicação *Technology Megatrends 2024*, destaca transformações que irão moldar

as próximas décadas, como inteligência artificial aplicada à saúde, energia limpa, mobilidade urbana inteligente e o avanço dos Gêmeos Digitais. Essas tendências não apenas sinalizam novas oportunidades, mas também reposicionam o papel da indústria em um ambiente cada vez mais interconectado e sustentável (Bash, 2024).

Outros relatórios internacionais, como os do Fórum Econômico Mundial e da McKinsey, corroboram a importância de tecnologias emergentes para a competitividade global. A convergência de dados, automação avançada e conectividade ultrarrápida está criando o ambiente propício para a Indústria 4.0 e, progressivamente, para a Indústria 5.0, que coloca o ser humano no centro dos processos produtivos, reforçando o papel da manufatura como motor econômico e social (Fórum Econômico Mundial, 2023; McKinsey; Company, 2023).

Entre as tecnologias em ascensão, o conceito de Gêmeo Digital destaca-se como elemento-chave da manufatura avançada. Para melhor compreensão do posicionamento dessa tecnologia, Araujo *et al.* (2024) desenvolveram uma análise SWOT do mercado de Gêmeo Digital que revela como forças como a capacidade de integração de dados em tempo real e o suporte à manutenção preditiva. Entre as fraquezas destacam-se os custos iniciais elevados e a necessidade de maturidade digital para plena implementação. As oportunidades abrangem o uso crescente em setores como saúde, energia e mobilidade urbana, enquanto as ameaças incluem a complexidade regulatória e os riscos cibernéticos associados a ambientes conectados.

No cenário competitivo global, empresas que adotam estratégias baseadas em megatendências e soluções digitais avançadas conseguem antecipar demandas e capturar valor antes dos concorrentes. Além disso, a manufatura avançada contribui para o atendimento de metas ambientais e de gover-

nança, alinhando-se aos princípios *Environmental, Social and Governance* (ESG). Tecnologias como Gêmeos Digitais e manufatura aditiva reduzem desperdícios, otimizam consumo de recursos e favorecem a circularidade de materiais, promovendo uma produção mais limpa e responsável, condição cada vez mais valorizada por investidores e consumidores (Araujo et al., 2024).

Diante desse panorama, como destacado por Pinto, Lima e Maduro (2024), a incorporação de tecnologias digitais e de manufatura avançada não apenas redefine os modelos produtivos, mas também amplia as possibilidades de inovação, integração e controle em tempo real, permitindo respostas ágeis às demandas do mercado e mitigação de riscos operacionais. Assim, a virtualização de processos, associada às megatendências tecnológicas, contribui para a construção de ambientes industriais mais flexíveis, eficientes e alinhados às exigências de sustentabilidade e transformação digital, reafirmando seu papel estratégico no fortalecimento da economia industrial contemporânea.

Os membros do Conselho Consultivo da Indústria do IEEE *Future Directions Committee* determinaram as seguintes três megatendências tecnológicas: Transformação Digital, Sustentabilidade e Inteligências artificiais. Dentre as quais, a ampla adoção comercial do Gêmeo Digital está prevista para os próximos seis anos (Bash, 2024). Desse modo, baseado no relatório, este estudo tem por objetivo apresentar as tendências relacionadas à indústria 4.0 e por consequência atreladas ao Gêmeo Digital. Para isso, será realizada uma revisão bibliográfica em documentos como artigos científicos, relatórios técnicos, teses e dissertações, datados entre 2023 e 2025, de modo a levantar os mais recentes investimentos e estudos sobre a temática, além de projeções para os próximos anos.

Inteligência artificial generativa

De acordo com a definição fornecida pela Inteligência Artificial (IA) ChatGPT, a "Inteligência Artificial Generativa é um ramo da IA que utiliza modelos avançados de aprendizado de máquina, capazes de criar novos conteúdos como textos, imagens, músicas e códigos de forma autônoma, simulando a criatividade humana com base nos padrões aprendidos em grandes volumes de dados" (OpenAI, 2025). Os avanços tecnológicos, a inteligência artificial, tem se tornado cada vez mais presente no cenário digital nas últimas décadas, atuando como uma ferramenta de apoio no cotidiano dos indivíduos, tanto no trabalho quanto nos estudos. Banh (2023) define a IA generativa como uma fusão inovadora entre criatividade e dados, que se baseia nos princípios da inteligência artificial. Essa abordagem redefine os limites da inovação, transformando o futuro do cenário digital e contribuindo para uma melhor compreensão do papel da IA generativa.

Com Wang *et al.* (2023), o conteúdo gerado por IA compreende diversos conteúdos sintéticos, que incluem imagens, textos, áudios, vídeos, além de amostras de treinamento aumentadas e conteúdos 3D interativos. Essa tecnologia permite uma produção de baixo custo e em grande escala, de forma automatizada, sendo benéfica para aplicações como, por exemplo, Gêmeos Digitais e o metaverso. Os autores contribuem ao se referirem à IA generativa, que irão substituir ou auxiliar os humanos na criação de conteúdos mais personalizados, com alta qualidade, maior rapidez e menores custos, atendendo aos requisitos dos usuários.

Para Feuerriegel *et al.* (2023), o grande avanço da inteligência artificial mudou rapidamente a idealização de que apenas os seres humanos poderiam realizar atividades criativas e artísticas, como escrever poemas, compor músicas,

desenvolver *softwares*, redigir artigos e até gerar imagens. Os autores definem a IA generativa como um conjunto de técnicas computacionais capazes de produzir conteúdo aparentemente novos e significativos. Destacam que a disseminação de tecnologias como DALL-E, GPT-4 e Copilot está revolucionando a forma como trabalhamos, comunicamo-nos e executamos nossas tarefas diárias. Além disso, conceituam a IA generativa como uma modelagem realizada por meio de arquiteturas de aprendizado de máquina, como redes neurais profundas, capazes de criar novas amostras de dados com base nos padrões aprendidos.

Andreoni (2024), diz que a inteligência artificial representa um avanço que permite a geração de conteúdos impulsionada por modelos generativos, os quais analisam e interpretam padrões de distribuição em um conjunto de dados. O autor ressalta que o objetivo dos modelos de IA generativa é capturar e interpretar, com precisão, as distribuições de probabilidades que caracterizam um determinado conjunto de dados. Dessa forma, por meio da compreensão profunda dessas distribuições, os modelos generativos são capazes de produzir novas instâncias de dados que se alinham às características do conjunto original.

Além da conceitualização abordada, este capítulo busca destacar as aplicações práticas da IA generativa em distintos campos de estudo. Rani *et al.* (2023) contribuíram com uma análise sistêmica e abrangente, com foco nas técnicas de IA desenvolvidas para combater doenças de plantas, discutindo vários desafios enfrentados pelos agricultores e as soluções oferecidas pela IA. Ressalta-se que a inteligência artificial pode ser empregada em diversos domínios da agricultura, como, por exemplo, no manejo da irrigação, fertilização, análise preditiva e produção agrícola. Trata-se de uma aplicação objetiva que permite a automatização dos diagnósticos de doenças,

o monitoramento da saúde das plantas e a maximização da produtividade.

Sarferaz (2025) contribui com o estudo sobre a implementação da IA generativa em *softwares* ERP, sendo esta uma inovação significativa para o aumento das capacidades desses sistemas de forma inteligente, utilizando técnicas de auto-aprendizagem com base nas instruções dos usuários. O autor ressalta que a IA generativa auxilia na criação de conteúdo para sistemas ERP, automatizando a produção de diversos materiais baseados em texto. Entre os exemplos citados estão: geração de artigos, descrições de cargos que reflitam com precisão os requisitos das funções, desenvolvimento de perguntas para entrevistas personalizadas, além da criação de conteúdos de mídia personalizados para *marketing*, redação de *e-mails* e uma descrição mais detalhada de produtos.

Conforme estudos realizados por Andreoni (2024), que exploram o papel da inteligência artificial generativa no aumento da confiabilidade e segurança de sistemas autônomos como veículos aéreos não tripulados (VANTs), braços robóticos e carros autônomos, observa-se que a IA generativa enfrenta desafios inerentes a esses sistemas, impulsionando inovações e aprimorando sua funcionalidade e segurança. Dessa forma, permite o desenvolvimento de tecnologias mais complexas e adaptativas. A IA generativa possui um potencial significativo no aprimoramento da arquitetura de segurança, sendo crucial para a proteção de sistemas autônomos, como drones, veículos autônomos e sistemas embarcados.

A ética é fundamental em relações pautadas no respeito, na confiança e na responsabilidade, pois orienta o comportamento e guia as decisões em direção ao que se entende como certo ou errado. Lopes (2025) apresenta uma análise sobre a necessidade e a urgência de abordar, de forma crítica, o desenvolvimento e as aplicações das tecnologias, destacando

o princípio da responsabilidade, essencial para enfrentar os desafios emergentes da IA. O autor afirma que a implantação da tecnologia deve ser acompanhada de uma reflexão ética profunda, a fim de evitar riscos significativos. Defende, ainda, que é imprescindível abordar, de forma multidisciplinar, as implicações éticas nas etapas de desenvolvimento tecnológico, bem como a responsabilidade dos desenvolvedores no diálogo entre as diversas áreas, que são de extrema importância e fundamentais para o bem-estar humano.

As reflexões de Blauth (2022) trazem discussões relevantes sobre o uso abusivo da inteligência artificial. Devido à sua ampla aplicação em diferentes áreas, a IA oferece inúmeros benefícios e facilidades aos usuários, mas também acarreta riscos à sociedade quando utilizada de forma maliciosa. O autor exemplifica essa preocupação com a atuação de cibercriminosos, que podem incorporar técnicas de IA em seus planos ilícitos. Ressalta, ainda, que é necessário compreender o abuso da IA para que sejam desenvolvidos mecanismos de proteção à sociedade e às infraestruturas críticas contra-ataques. Defende o mapeamento contínuo dos riscos associados ao uso malicioso e abusivo da IA, de modo a aprimorar e fortalecer as capacidades de prevenção.

Zohny (2023) contribui com um estudo sobre os desafios éticos e a questão da confiança pública frente à IA generativa. Dentre as preocupações destacam-se a autoria e a capacidade de identificar se, de fato, um trabalho foi produzido por um ser humano, o que se configura como um dos principais desafios para o Ensino Superior, o Ensino Médio e os periódicos acadêmicos. O impacto da IA na criatividade, no pensamento crítico e no desenvolvimento de ideias pode levar à perda de oportunidades de geração de *insights*. O autor ressalta a importância de os periódicos continuarem atentos à questão da

autoria, bem como à qualidade e à originalidade das ideias. Diante do rápido desenvolvimento da inteligência artificial, encontrar maneiras adequadas de adaptação torna-se essencial. Assim, quando utilizada de forma responsável e como ferramenta de apoio, a IA pode auxiliar na elaboração de artigos, otimizando o tempo e os esforços intelectuais dos usuários.

Transformação digital

A transformação digital (TD) é um processo dinâmico e contínuo que visa a reconfiguração profunda de modelos de negócios, estratégias organizacionais, fluxos operacionais e cultura empresarial por meio da incorporação de tecnologias digitais emergentes. A TD pode ser definida como um processo que visa melhorar uma entidade desencadeando mudanças significativas em suas propriedades por meio de combinações de tecnologias de informação, computação, comunicação e conectividade. Essa transformação não se limita à simples digitalização de processos, mas abrange a criação de novos produtos e serviços, a otimização da interação com os clientes e a reformulação das cadeias de valor (Shi *et al.*, 2023).

A digitalização, como etapa anterior e complementar à transformação digital, tornou-se um requisito essencial para a competitividade e inovação, especialmente em setores caracterizados pela alta volatilidade e intensa concorrência. Ela permite que empresas de diferentes portes, incluindo pequenas e médias, escalem seus negócios por meio de estratégias descentralizadas, aproveitando canais digitais e tecnologias de automação para reduzir custos e melhorar a produtividade. Entretanto, muitas organizações ainda enfrentam barreiras relacionadas a restrições de recursos, baixa intenção de uso de canais digitais e falta de cultura organizacional orientada para a inovação (Bella *et al.*, 2024).

Os impactos da transformação digital no mercado são

profundos e multifacetados. Segundo Ramos *et al.* (2024), dois efeitos principais podem ser observados: o impacto na interação com o público, que se tornou mais personalizada, ágil e *omnichannel*, e a alteração dos modelos de negócios, que passaram a incorporar tecnologias para automatizar processos, melhorar a experiência do cliente e reduzir custos operacionais. A TD também interfere diretamente na cadeia de valor das organizações, afetando desde a concepção de produtos e serviços até sua entrega e relacionamento com os consumidores. A introdução de atividades digitais altera a estrutura organizacional, exigindo novas competências tecnológicas e maior integração entre setores antes isolados. Isso implica desafios relacionados à gestão da mudança e à resistência de colaboradores, que precisam se adaptar a novos sistemas e formas de trabalho.

O avanço da TD tem permitido a criação de novos mercados e a personalização em escala, impulsionada pela coleta e análise massiva de dados em tempo real. As empresas passaram a utilizar *big data* e inteligência artificial para antecipar tendências de consumo, otimizar cadeias produtivas e desenvolver soluções personalizadas para nichos específicos. Entre as tendências futuras da transformação digital, destacam-se a intensificação do uso de Gêmeos Digitais, computação quântica, inteligência artificial generativa, *blockchain* e Internet das Coisas (IoT). Segundo o relatório *Tecnolgy Megatrends* do IEEE (Bash, 2024), essas tecnologias convergiram para criar ambientes de negócios hiperconectados, inteligentes e autônomos, modificando profundamente setores como manufatura, saúde, construção civil e energia.

A inovação aberta surge como uma abordagem estratégica para acelerar o processo de transformação digital, permitindo que empresas compartilhem conhecimento, recursos e tecnologias com parceiros externos. Essa estratégia é es-

pecialmente relevante em setores onde o ciclo de vida dos produtos é curto e os investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento são elevados (Shi *et al.*, 2023). No que se refere à gestão estratégica, é imprescindível alinhar a transformação digital aos objetivos de longo prazo da organização, garantindo que as iniciativas tecnológicas não sejam meramente pontuais, mas estejam integradas ao planejamento corporativo.

A transformação digital, além de desafio técnico, é sobretudo um desafio de gestão. Ela demanda líderes preparados para conduzir mudanças estruturais e culturais, promover a integração entre áreas e explorar de forma estratégica as oportunidades oferecidas pelas tecnologias digitais. Mais do que uma tendência, a TD tornou-se um fator crítico para a competitividade e a sustentabilidade organizacional (Ramos *et al.*, 2024).

Sustentabilidade

A sustentabilidade deixou de ser apenas um conceito associado a boas práticas ambientais e passou a integrar, de maneira estratégica, o planejamento de empresas e governos, especialmente no contexto da Indústria 4.0. Essa mudança reflete a crescente necessidade de alinhar desenvolvimento tecnológico e responsabilidade ambiental, garantindo a viabilidade econômica, social e ecológica das atividades produtivas no longo prazo (Bella *et al.*, 2024).

De acordo com o relatório IEEE *Technology Megatrends* 2024, a sustentabilidade configura-se como um dos três *megatrends* tecnológicos mais relevantes para os próximos anos, ao lado da Transformação Digital e da Inteligência Artificial Geral (AGI). Nesse sentido, tecnologias como Internet das Coisas (IoT), manufatura aditiva e Gêmeos Digitais são vistas como ferramentas fundamentais para tornar processos produtivos mais

eficientes e ambientalmente responsáveis (Bash, 2024).

A Indústria 4.0, conceito estabelecido na Alemanha em 2011, é caracterizada pela integração entre sistemas ciberfísicos, inteligência artificial e análise de dados em tempo real. Essa revolução industrial não apenas redefine os processos produtivos, mas também potencializa a implementação de práticas sustentáveis, como o reuso de materiais e a redução das emissões de CO₂, alinhando-se aos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) propostos pela ONU (Camilleri *et al.*, 2023).

O Brasil, devido à sua biodiversidade e potencial energético, ocupa uma posição estratégica nesse cenário. Iniciativas como o Programa RenovaBio e os avanços em biotecnologia e agricultura sustentável reforçam a capacidade do país em desenvolver soluções sustentáveis que dialogam com as demandas da Indústria 4.0. Além disso, investimentos em pesquisa e inovação ampliam o potencial competitivo e sustentável do setor produtivo nacional (Nezzi *et al.*, 2023). No campo da inovação organizacional, a sustentabilidade surge como uma das quatro perspectivas estratégicas, ao lado de inovação, empreendedorismo e gestão de riscos. Essa integração busca responder às exigências ambientais e sociais, que pressionam empresas a repensarem suas operações e cadeias de suprimento, promovendo ações que reduzam impactos ambientais e gerem valor social (Bella *et al.*, 2024).

Ainda segundo Jesus (2024), tecnologias emergentes como IoT, computação em nuvem, *big data* e manufatura aditiva são essenciais para a construção de ambientes produtivos e sustentáveis. Essas tecnologias possibilitam a coleta e análise de dados em tempo real, favorecendo decisões baseadas em eficiência energética, redução de resíduos e otimização de recursos, contribuindo diretamente para a sustentabilidade industrial.

A utilização de Gêmeos Digitais também se destaca como uma tendência promissora. Essa tecnologia permite simular e monitorar processos e equipamentos de forma virtual, antecipando falhas, otimizando recursos e diminuindo desperdícios. Na América Latina, embora em fase inicial, o uso de GD já demonstra benefícios em setores como energia, construção e manufatura, com potencial para ampliar a eficiência operacional e reduzir custos (Silveira; Cardoso; Martins, 2024).

O relatório IEEE *Technology Megatrends 2024* destaca ainda a importância da integração entre tecnologias sustentáveis e infraestrutura energética renovável. Soluções como eletrificação, armazenamento de energia e sistemas inteligentes de gerenciamento são apontadas como fundamentais para enfrentar os desafios das mudanças climáticas e da escassez de recursos naturais (Bash, 2024). A implementação de sistemas de iluminação inteligente baseada em IoT, por exemplo, tem demonstrado resultados significativos na otimização do consumo de energia. Além de reduzir custos operacionais, essas soluções contribuem para práticas mais sustentáveis ao integrar sensores de presença, controle remoto e análise de dados em tempo real (Simões *et al.*, 2025).

Nezzi *et al.* (2023) evidenciam que, ao incorporar a sustentabilidade como fator estratégico, empresas passam a obter vantagens competitivas relevantes, como redução de custos, melhoria da reputação corporativa e acesso a novos mercados. Além disso, práticas sustentáveis favorecem a fidelização de clientes e atração de investidores preocupados com critérios ESG (Ambiental, Social e Governança). Outro ponto relevante é a capacitação da força de trabalho para a sustentabilidade. Treinamentos e programas de qualificação são fundamentais para que funcionários compreendam os impactos ambientais das operações e adotem comportamentos responsáveis no ambiente industrial, contribuindo para o sucesso financeiro e

ambiental das organizações (Bella *et al.*, 2024).

Considerações finais

As transformações tecnológicas promovidas pela Indústria 4.0 e projetadas para a Indústria 5.0 delineiam um cenário industrial marcado pela convergência entre os mundos físico e digital, onde tecnologias como inteligência artificial, Internet das Coisas, *big data* e manufatura aditiva desempenham papéis estratégicos. Nesse contexto, o conceito de Gêmeo Digital surge como um dos pilares dessa revolução, proporcionando não apenas o monitoramento em tempo real de operações industriais, mas também a modelagem preditiva e a otimização contínua de processos produtivos. Os estudos e análises apresentados ao longo deste capítulo confirmam que essa tecnologia não apenas aprimora a eficiência operacional, mas também contribui para a sustentabilidade e a resiliência das organizações diante das exigências de um mercado global cada vez mais competitivo e dinâmico.

As tendências identificadas em relatórios de relevância internacional, como o IEEE *Technology Megatrends 2024* e as publicações do Fórum Econômico Mundial, reforçam a importância de tecnologias emergentes para a reconfiguração dos sistemas produtivos e urbanos. Entre essas tendências, a integração de Gêmeos Digitais com inteligência artificial, sistemas ciberfísicos e redes 5G possibilita avanços significativos na personalização de produtos, na gestão de ativos industriais e na manutenção preditiva. Tais aplicações não apenas aumentam a produtividade, mas também mitigam riscos operacionais e otimizam recursos, evidenciando o potencial estratégico dessa abordagem para diferentes setores da economia.

Apesar das inúmeras oportunidades, os desafios para a implementação plena dos Gêmeos Digitais permanecem

expressivos. Barreiras como os elevados custos iniciais, a necessidade de infraestrutura digital robusta, questões regulatórias e preocupações com a segurança cibernética demandam soluções integradas e políticas industriais adequadas. Nesse sentido, torna-se imprescindível que organizações e governos estabeleçam parcerias para promover ambientes de inovação colaborativa e a formação de profissionais capacitados, assegurando que os benefícios dessa tecnologia sejam amplamente acessíveis e sustentáveis no longo prazo.

Outro aspecto relevante destacado neste estudo é a contribuição dos Gêmeos Digitais para a agenda de sustentabilidade e para o desenvolvimento de cidades e indústrias mais inteligentes. Ao possibilitar a simulação de cenários e a otimização do consumo de recursos, essa tecnologia oferece suporte decisivo para estratégias de descarbonização e de economia circular, colaborando para que empresas e governos avancem no cumprimento de compromissos ambientais e sociais. Assim, os Gêmeos Digitais consolidam-se não apenas como ferramentas de eficiência operacional, mas também como agentes facilitadores da evolução industrial.

Por fim, este capítulo evidencia que a adoção estratégica de Gêmeos Digitais e de tecnologias associadas não é apenas uma tendência, mas uma necessidade para organizações que buscam manter sua competitividade e relevância em mercados em constante transformação. À medida que a Indústria 4.0 ganha espaço, com foco na integração homem-máquina e na personalização em larga escala, os Gêmeos Digitais devem se tornar componentes indispensáveis para a construção de sistemas produtivos mais flexíveis, seguros e ambientalmente responsáveis.

Referências

ARAÚJO, A. C. B. de; OLIVEIRA, D. M. S.; LOPES, E. C. S.; SILVA, M. V.

L. da; SANT'ANNA, Â. M. O.; PIMENTEL, C. A. Mercado do gêmeo digital: aplicação da matriz SWOT para análise mercadológica e tendências do setor. **Revista de Gestão e Secretariado**, [S. l.], v. 15, n. 9, p. e4160, 2024. DOI: <https://doi.org/10.7769/gesec.v15i9.4160>. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/4160>. Acesso em: 14 maio 2025.

BELLA, R. L. F. *et al.* Small-and medium-sized enterprises: trends and future perspectives for sustainability and digitalization in Germany. **Sustainability**, [S. l.], v. 16, n. 16, p. 6900, 2024.

CAMILLERI, M. A. *et al.* Creating shared value through open innovation approaches: opportunities and challenges for corporate sustainability. **Business Strategy and the Environment**, [S. l.], v. 32, n. 7, p. 4485–4502, 2023.

FÓRUM ECONÔMICO MUNDIAL. The future of jobs report 2023. Geneva: **World Economic Forum**, 2023.

RAMOS, G. G. R. *et al.* Contribuições da transformação digital: estudo e proposta da aplicação para negócios digitais. **Revista Sociedade Científica**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 298–346, 2024.

IEEE. Technology megatrends 2024. [S. l.]: **IEEE Future Directions Committee**, 2024.

JESUS, G. M. K. Contribuições da inovação aberta para a economia circular: um estudo multimétodo. 2024. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2024.

MCKINSEY & COMPANY. The state of AI in 2023: generative AI's breakout year. New York: **McKinsey Global Institute**, 2023.

NEZZI, C. *et al.* Implementation of 3D simulation to foster digital twin based applications in manufacturing: an educational case study. **SSRN Electronic Journal**, [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.ssrn.com/abstract=4469934>. Acesso em: 19 fev. 2025.

OPENAI. **ChatGPT** (Jun 15 version) [Large language model]. 2025. Disponível em: <https://chat.openai.com/chat>. Acesso em: 1 jul. 2025.

PINTO, L. H. A.; LIMA, O. P. de; MADURO, M. R. Implicações da manufatura avançada na era da indústria 4.0: desafios e oportunidades. **Revista de Gestão e Secretariado**, [S. l.], v. 15, n. 6, p. e3906, 2024. DOI: <https://doi.org/10.7769/gesec.v15i6.3906>. Disponível em: <https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/3906>. Acesso em: 19 maio 2025.

SHI, Y. *et al.* Guest editorial: digital transformation in supply chains: challenges, strategies and implementations. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, [S. l.], v. 53, n. 4, p. 381–386, 2023.

SILVEIRA, I. F.; CARDOSO, A.; MARTINS, V. F. Aplicações, desafios e limitações dos digital twins na América Latina. In: **Congresso Latino-Americano de Software Livre e Tecnologias Abertas**, 2024, Brasil. Anais do XXI Congresso Latino-Americano de Software Livre e Tecnologias Abertas (Latinoware, 2024). Brasil: Sociedade Brasileira de Computação – SBC, 2024. p. 71–79. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/latinoware/article/view/31509>. Acesso em: 1 jun. 2025.

SIMÕES, W. C. S. S. *et al.* Sistemas de iluminação inteligente com IoT para a indústria 4.0: eficiência e sustentabilidade. **Studies in Engineering and Exact Sciences**, [S. l.], v. 5, n. 3, p. e13088, 2025.



Sobre os autores e as autoras

Andressa Clara Barbosa de Araújo

Graduada em Engenharia de Produção e Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, mestranda em Engenharia Industrial pela Universidade Federal da Bahia, dedicando-se a pesquisa na área de Gêmeo Digital parametrizável para manufatura.

E-mail: andressaaraujo@ufba.br

Cristiane Agra Pimentel

Graduada, mestre e doutora em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande, professora na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia no curso de Engenharia de Produção no Centro de Ciência e Tecnologia em Energia e Sustentabilidade. Conduz os projetos de pesquisa *Lean Healthcare* e Gêmeo Digital de uma Produção Parametrizável.

E-mail: cristianepimentel@ufrb.edu.br

Daniel Marques Santana Oliveira

Graduando no Bacharelado Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade com terminalidade em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em Feira de Santana. Atualmente estagiário do Centro de Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, e membro do projeto de pesquisa “Gêmeo Digital de Produção Parametrizável”.

E-mail: danielmarques@aluno.ufrb.edu.br

Emilli Cássia Souza Lopes

Graduanda em Bacharelado Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade com terminalidade em Engenharia de Energias pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em Feira de Santana. Foi estagiária de produção no CEPEDI de 2024 a 2025, e atualmente é estagiária de Digital 4.0, na Placo Saint-Gobain.

E-mail: emilli.cassia@aluno.ufrb.edu.br

João Pedro Silva Nascimento

Graduando no Bacharelado Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade com terminalidade em Engenharia de Energias pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em Feira de Santana. Atualmente estagiário no Projeto de Pesquisa “Gêmeo Digital de Produção Parametrizável”.

E-mail: joaopsilva@aluno.ufrb.edu.br

João Vitor Siqueira Fonseca

Graduando no Bacharelado Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade com terminalidade em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em Feira de Santana. Atualmente estagiário do Centro de Pesquisa, Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, e membro do Projeto de Pesquisa “Gêmeo Digital de Produção Parametrizável”.

E-mail: joaovsiqueira7@aluno.ufrb.edu.br

Jhonatas Novais Silva

Engenheiro de Produção pela Faculdade Santíssimo Sacramento (FSSS) e mestrando no Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Simulação de Biosistemas (PPGMSB) da Universidade do Estado da Bahia (UNEB). Atuou como bolsista de Iniciação Científica em pesquisas focadas em Gestão de Resíduos e Desenvolvimento Socioambiental. Atualmente integra o grupo de pesquisa Desenvolvimento Agroambiental, vinculado à UNEB. Suas principais áreas de interesse e atuação acadêmica incluem modelagem computacional, simulação de processos, otimização, sustentabilidade e gestão socioambiental.

E-mail: jhonlimasilva@outlook.com

Luciane Oliveira Lima

Graduanda no Bacharelado Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade com terminalidade em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em Feira de

Santana. Atualmente voluntária no projeto de pesquisa “Gêmeo Digital de Produção Parametrizável”, bolsista no projeto “*Lean Healthcare*” e Representante Estadual da Bahia da ABEPRO Jovem.

E-mail: luciane@aluno.ufrb.edu.br

Marcus Vinícius Oliveira Ribeiro Brandão

Graduando no Bacharelado Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade com terminalidade em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em Feira de Santana. Atualmente estagiário do Centro de pesquisa, desenvolvimento tecnológico e inovação, e membro do projeto de pesquisa “Gêmeo Digital de Produção Parametrizável”.

E-mail: brandao.marcus@aluno.ufrb.edu.br

Desmistificando o Gêmeo Digital convida você a quebrar o paradigma de que tecnologia e inovação são distantes e inacessíveis. Esta obra revela como o conceito do Gêmeo Digital está ao nosso alcance e pode transformar a maneira como aprendemos e aplicamos novas soluções. Mais do que entender a tecnologia, este livro mostra como aprofundar conhecimentos e impulsionar a criação de inovações. Um convite para explorar um mundo novo, desbravar possibilidades e alcançar o topo do desenvolvimento tecnológico. Ideal para quem quer estar à frente e fazer a diferença.