

# Aplicações, Desafios e Limitações dos Digital Twins na América Latina

Ismar Frango Silveira  
Programa de Pós-Graduação em Com-  
putação Aplicada – Faculdade de Com-  
putação e Informática – Universidade  
Presbiteriana Mackenzie  
São Paulo, Brasil  
0000-0001-8029-072X

Alexandre Cardoso  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brasil  
0000-0002-2023-9647

Valéria Farinazzo Martins  
Programa de Pós-Graduação em  
Computação Aplicada – Faculdade de  
Computação e Informática –  
Universidade Presbiteriana Mackenzie  
São Paulo, Brasil  
0000-0002-5058-6017

**Abstract**—DT (Digital Twins) are an emerging technology that has gained increasing relevance across various industries worldwide, including Latin America. Digital twins are virtual replicas of physical objects, processes, or systems, created through real-time data, sensors, and advanced algorithms. These replicas allow companies and institutions to simulate, monitor, and optimize the operation of their assets and processes before implementing them in the physical world. This article presents a theoretical framework on DT and an overview of the state of the art in DT in Latin America.

**Keywords**—Digital Twins; Latin America Latina; Panorama.

**Resumo ou Resumen**— Os DT (digital twins ou gêmeos digitais) são uma tecnologia emergente que tem ganhado crescente relevância em diversas indústrias ao redor do mundo, incluindo a América Latina. Gêmeos digitais são réplicas virtuais de objetos, processos ou sistemas físicos, criadas por meio de dados em tempo real, sensores e algoritmos avançados. Essas réplicas permitem que empresas e instituições simulem, monitorem e otimizem a operação de seus ativos e processos antes de implementá-los no mundo físico. Este artigo apresenta um arrazoado teórico sobre DT e um panorama sobre o estado da arte em DT na América Latina.

**Palavras-chave**—Digital Twins; América Latina; Panorama.

## I. INTRODUÇÃO

Grievés [1] apresentou em 2002 a definição embrionária de Gêmeos Digitais (Digital Twins - DT) como instâncias virtuais de elementos físicos, capazes de espelhar continuamente suas contrapartes reais. Naquela época, as tecnologias disponíveis não eram adequadas para o processamento e transmissão de grandes volumes de dados em tempo real, e as capacidades de visualização e manipulação de elementos virtuais eram limitadas em comparação com os padrões atuais.

Com os avanços tecnológicos recentes, como a largura de banda de alta velocidade, armazenamento e processamento em nuvem, sensores e atuadores da Internet das Coisas (Internet of Things - IoT), e dispositivos modernos para Realidade Virtual (Virtual Reality - VR), surgiu um novo cenário. A combinação de Realidade Mista (Mixed Reality - MR) – que integra VR e Realidade Aumentada (Augmented Reality - AR) – com DT representa uma evolução significativa na interação humano-máquina e na simulação de ambientes

físicos. Especialmente no que diz respeito aos DT de componentes, ativos e ambientes, cujas categorias serão detalhadas posteriormente [2].

Há um amplo espectro de aplicações potenciais para DT baseados em MR, cada um com suas peculiaridades. Uma dessas áreas é a Educação e Treinamento, onde as possibilidades expandidas para experimentação, visualização e interação podem gerar experiências de aprendizado altamente eficazes. Neste sentido, este estudo propõe uma arquitetura robusta e escalável para suportar a implementação e integração de sistemas MR e DT no contexto educacional, apresentando também um estudo de caso sobre a aplicação MR-DT para treinamento de pessoal na indústria de energia [3].

A proposta enfatiza a flexibilidade e escalabilidade da arquitetura, permitindo sua adaptação para diversos outros setores, como manufatura, saúde, logística e entretenimento. A implementação dessa arquitetura promete revolucionar a interação com os mundos digital e físico, oferecendo novas oportunidades para inovação e eficiência operacional. A integração de MR e DT representa uma evolução significativa na interação humano-máquina e na simulação de ambientes físicos, especialmente no que tange aos DT de componentes, ativos e ambientes—tipos de DT que serão discutidos posteriormente.

Na América Latina, a adoção de Gêmeos Digitais ainda está em estágios iniciais, mas as aplicações prometem transformar diversos setores. No setor educacional, a utilização de DT pode enriquecer o processo de ensino, possibilitando simulações e modelagens mais realistas e interativas, além de promover o acesso a recursos educacionais avançados, mesmo em regiões com infraestrutura limitada.

No setor de manufatura, os DT podem otimizar processos e melhorar a manutenção preditiva, enquanto no setor de saúde, eles oferecem oportunidades para treinamento médico avançado e simulações de procedimentos cirúrgicos, contribuindo para a capacitação de profissionais e melhorando a qualidade dos cuidados de saúde.

No setor de logística, os Gêmeos Digitais podem melhorar o gerenciamento de cadeias de suprimento e operações de

transporte, aumentando a eficiência e reduzindo custos. Além disso, no setor de entretenimento, os DT podem criar experiências imersivas e personalizadas, ampliando as possibilidades criativas e comerciais.

Apesar do potencial significativo, a implementação de DT na América Latina enfrenta desafios, incluindo a desigualdade digital e a necessidade de investimentos em infraestrutura tecnológica. No entanto, com avanços contínuos e políticas de apoio adequadas, os Gêmeos Digitais têm o potencial de catalisar a inovação e impulsionar o desenvolvimento econômico e educacional na região.

## II. TIPOS DE DT

Existem diversos tipos de Gêmeos Digitais, cada um com características e aplicações específicas em diferentes áreas. Expandindo os quatro tipos propostos por [4] e com base nos trabalhos anteriores de [1]. De acordo ainda com o trabalho de [3, 5, 8] os sete principais tipos atuais são:

- **Gêmeo Digital de Componente (Component DT - CDT):** Refere-se a componentes individuais, unidades de máquinas ou partes de um objeto complexo. Geralmente, é utilizado para monitorar a saúde e o desempenho de componentes críticos, prever falhas e otimizar a manutenção. Em Engenharia e Arquitetura, é utilizado em combinação com Modelagem da Informação da Construção (BIM), como ilustrado por [6]. Na Saúde e Medicina, é empregado para representar órgãos corporais, conforme demonstrado por [7].
- **Gêmeo Digital de Objeto (Asset DT - ADT):** Pode representar componentes físicos de um objeto ou o próprio objeto, denominado aqui como “ativo”. Também pode ser um contraparte digital de processos ou sistemas, extrapolando a definição original de DT, já que essas representações podem não exigir visualizações ou interações baseadas em VR ou MR [8]. Utilizado para projetar, testar e aprimorar produtos antes da fabricação, possibilita o monitoramento do desempenho do produto em uso e a previsão das necessidades de manutenção.
- **Gêmeo Digital de Processo (Process DT - PDT):** Representa processos de fabricação, operacionais, administrativos, sociais e econômicos. Este tipo de DT não está necessariamente vinculado a uma interface baseada em MR e é utilizado para otimizar processos de produção, identificar gargalos, melhorar a eficiência, simular cenários e reduzir custos [8][9].
- **Gêmeo Digital de Sistema (System DT - SDT):** Integra múltiplos ativos (potencialmente com muitos componentes) e processos em um sistema completo. É utilizado em setores como infraestrutura, energia e transporte para gerenciar e otimizar a operação de sistemas complexos, além de representar sistemas

educacionais. Permite a visualização e análise complexa do desempenho do sistema como um todo [10].

- **Gêmeo Digital de Ambiente (Environment DT - EDT):** Representa ambientes físicos como edifícios, cidades ou regiões geográficas. Utilizado no planejamento urbano, gestão ambiental, monitoramento de edifícios e infraestrutura, e na criação de campi virtuais. Permite a simulação de mudanças ambientais, o planejamento de novas construções e o gerenciamento eficiente de recursos, além de proporcionar experiências imersivas [11].
- **Gêmeo Digital de Organização (Organization DT - ODT):** Representa processos e operações de negócios e administrativas dentro de uma organização. Geralmente é utilizado para otimizar operações empresariais, melhorar o gerenciamento de recursos e apoiar a tomada de decisões estratégicas. Pode auxiliar as organizações a se adaptar e inovar, aumentando a sustentabilidade organizacional [12].
- **Gêmeo Digital Humano (Human DT - HDT):** É uma tecnologia emergente com grande potencial em áreas como saúde e esportes, para personalizar tratamentos médicos, prever reações a medicamentos e monitorar a saúde em tempo real. Diferente dos Gêmeos Digitais tradicionais, os HDTs representam seres humanos, o que traz desafios como definições ambíguas e falta de diretrizes de design [13]. Segundo [14], representa indivíduos ou grupos de pessoas.

### A. Diferenças Entre Tipos de Gêmeos Digitais

Cada tipo de Gêmeo Digital oferece benefícios específicos, dependendo da aplicação e do setor. A escolha do tipo correto é crucial para maximizar os benefícios da implementação dos gêmeos digitais.

É importante discutir as principais diferenças entre os tipos de DT. Embora as diferenças entre Gêmeos Digitais de Componente (CDT) e Gêmeos Digitais de Ativo (ADT) sejam evidentes, com o ADT sendo um potencial agregado de elementos caracterizados como CDT, as diferenças entre ADT e Gêmeos Digitais de Ambiente (EDT) também devem ser esclarecidas.

O ADT representa uma coleção de CDT interconectados que modelam um produto complexo. Por outro lado, o EDT vai além da simples agregação de ADT, oferecendo um ambiente virtual, infraestrutura e ferramentas para desenvolver, implantar e gerenciar ADT, abrangendo todo o ecossistema e a infraestrutura necessários para criar, simular e operar gêmeos digitais. Com uma camada de visualização baseada em Realidade Mista (MR), o EDT permite a exploração virtual de ambientes 3D através de passeios e manipulação de ADT.

Algumas confusões e definições imprecisas tornam difícil distinguir entre Gêmeos Digitais de Processo (PDT) e Gêmeos Digitais de Sistema (SDT). Ambos são usados para simular, monitorar e otimizar diferentes aspectos de entidades físicas e suas operações e dinâmicas. No entanto, eles se concentram em elementos distintos: enquanto o SDT inclui modelos de todos os componentes físicos, suas interações e o comportamento geral do sistema, o PDT representa processos operacionais específicos dentro de um sistema, como fluxos de trabalho de manufatura, operações de cadeia de suprimentos ou processos administrativos e de negócios. O ciclo de vida de um PDT pode abranger desde o design, manufatura, inspeção de qualidade, simulação, operação, manutenção até a disposição [15]. Ambos podem se beneficiar de dados em tempo real obtidos a partir de sensores, outros sistemas, fontes de dados e dispositivos IoT para monitoramento, experimentação e controle em tempo real, e não dependem necessariamente da camada MR para interação. Por outro lado, a utilização de um ODT pode ajudar as empresas a se adaptarem e inovarem, aumentando a sustentabilidade organizacional. No entanto, a falta de melhores práticas para o desenvolvimento e operação de um ODT dificulta que as empresas se beneficiem plenamente dessa tecnologia. Muitas empresas, especialmente no contexto da América Latina, o que inclui o Brasil, ainda não adotaram práticas da Indústria 4.0 [16] e provavelmente enfrentarão dificuldades em implementar tanto a transformação digital quanto os Gêmeos Digitais. Muitas empresas estão atualmente investigando o potencial uso do ODT, mas as soluções disponíveis costumam ser dependentes do contexto ou específicas para sistemas, tornando-as difíceis de adaptar, estender e reutilizar. Portanto, a digitalização é vista como um processo lento, exigente em termos de recursos e extremamente caro, com resultados incertos. Assim, as empresas buscam soluções que permitam uma introdução gradual do ODT em suas operações e a evolução do sistema conforme as necessidades e situações mudam [12].

Sobre os HDT, trata-se de personagens gerados por computador que interagem simultaneamente com os mundos real e virtual. Esses entes virtuais são projetados para simular a aparência, comportamento e comunicação humana, frequentemente utilizando tecnologias avançadas como inteligência artificial (IA), captura de movimento, processamento de linguagem natural (NLP), reconhecimento e sintetização de voz, além de modelos de linguagem (LLM) para interpretar e gerar diálogos humanizados. Em ambientes de MR, HDTs podem interagir com o ambiente físico e usuários reais, proporcionando uma integração fluida entre experiências reais e digitais. Eles são empregados em diversas aplicações, incluindo treinamento, educação, saúde, entretenimento e atendimento ao cliente, para aprimorar o engajamento e a imersão do usuário.

A Fig. 1, extraída de [blind review] exibe as relações entre os setes tipos de DT.

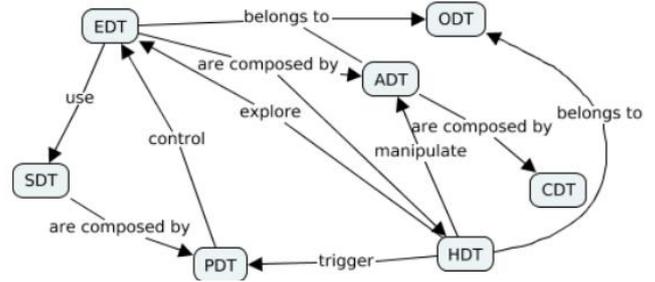


Fig. 1 Relacionamentos entre os tipos de DT (fonte: [3])

### III. REVISÃO DE LITERATURA

Inicialmente, os DT foram definidos como simulações multipisciais e multiescalares de um veículo ou sistema, utilizando os melhores modelos físicos, sensores e histórico de voo para replicar a vida de seu correspondente real, um conceito inicialmente vinculado à indústria aeroespacial.

Uma definição mais ampla descreve DT como um modelo de software que atua como um protótipo para um produto, empregado em todas as etapas da produção industrial para comparar o estado atual com o modelo e corrigir discrepâncias. Esse modelo cria uma representação virtual do mundo real, permitindo comunicação contínua entre os dois mundos ao longo do processo de produção.

Os DT têm o potencial de criar simulações realistas e interativas que permitem aos alunos explorar, testar e entender conceitos complexos. Seu uso é especialmente esperado nas áreas de ciência, tecnologia, engenharia, artes e matemática (STEAM). No entanto, a implementação de DT na educação enfrenta vários obstáculos, especialmente em países em desenvolvimento como o Brasil e toda a América Latina, onde a lacuna digital é notória. Esses desafios incluem falta de infraestrutura, ausência de políticas públicas de apoio e o alto custo e complexidade inicial de implementação. Além disso, questões de privacidade e segurança de dados devem ser rigorosamente abordadas em conformidade com as leis de proteção de dados dos respectivos países.

O trabalho de [17] destaca que a falta de soluções arquiteturais amplamente aceitas para DT frequentemente leva à sua construção usando uma combinação de padrões em camadas e orientados a serviços. Esses padrões abordam atributos de qualidade essenciais como manutenibilidade, eficiência de desempenho e compatibilidade. Por exemplo, [18] propõem um padrão arquitetural abstrato de quatro camadas usado para construir DT e integrar informações de várias fontes. Baseada em microsserviços, essa proposta é projetada para ser flexivelmente extensível com novas fontes de informações e pode suportar novos tipos de informações proprietárias ou padrão.

Modelos arquiteturais gerais para DT são capazes de suportar elementos, cenários e dinâmicas comuns, como o trabalho de [19], que propõe um catálogo de padrões de design de arquitetura DT que pode ser amplamente reutilizado em

engenharia de sistemas. No entanto, dado que os DT são altamente dependentes de seus casos de uso específicos, resultando em uma ampla variedade de configurações, faz sentido ter padrões e modelos arquiteturais específicos para cada área de aplicação. Nesse sentido, [20] apresentam um conjunto de arquétipos DT adaptados para casos de uso individuais.

[21] fornecem uma visão geral das arquiteturas de Gêmeos Digitais, destacando uma arquitetura geral do sistema baseada em vários cenários de uso. Eles rastreiam a evolução dos DT, desde sua aplicação na gestão do ciclo de vida do produto (PLM), passando pela visualização 3D (AR/VR) e simulações de uso do produto. A integração da tecnologia Internet das Coisas (IoT) captura o estado dinâmico dos ativos reais. No mundo conectado de hoje, os DT baseados em nuvem aproveitam as redes de banda larga para funcionalidades aprimoradas. Espaços de dados emergentes como GAIA-X e IDSA possibilitam o compartilhamento seguro de dados, formando a base para Mundos Digitais Distribuídos que abordam desafios globais, como a descarbonização.

Como apresentado por [22], os DT estão sendo usados em vários domínios de aplicações digitais, incluindo produção (manufatura e setor automotivo), energia (design de reatores nucleares e petróleo e gás), construção (edificações), aplicações de TI (sistemas IoT, cidades inteligentes), ciências da saúde (cuidados com a saúde, ciências da vida), educação (física, educação em manufatura, VR) e sociedade (DT pessoais, patrimônio cultural).

Apesar de não ser uma relação obrigatória, VR (Realidade Virtual) e DT (Gêmeo Digital) frequentemente caminham juntas, especialmente ao representar gêmeos de componentes e ativos. No campo educacional, visualizações baseadas em VR têm sido utilizadas – com as já conhecidas limitações – para permitir experiências de aprendizagem imersivas (ou não tão imersivas) que não eram possíveis devido a condições físicas (especialmente ao lidar com micromundos, como átomos, células ou componentes químicos, mas também macromundos, como no ensino de Astronomia, por exemplo), riscos envolvidos (como em experimentos de aprendizagem em Biologia e Química) ou custos (muitos experimentos em Física às vezes exigem equipamentos caros, por exemplo). Nesse sentido, é importante entender o Gêmeo Digital como uma evolução contínua da Realidade Virtual, mesmo ao considerar gêmeos de processos e sistemas, que frequentemente não requerem visualização baseada em VR ou MR (Realidade Mista). A Figura 2 propõe o continuum VR-DT, explicando algumas tecnologias que apoiaram essa evolução.

Esse continuum pode ser considerado como uma linha do tempo, mas também é importante perceber as tecnologias que foram agregadas ao longo dessa evolução, permitindo algumas transformações e trazendo novas possibilidades para o processamento, armazenamento, transmissão e visualização de dados. Como pode ser visto na Figura 2, apesar de ser um continuum, ele pode ser organizado em quatro marcos principais.

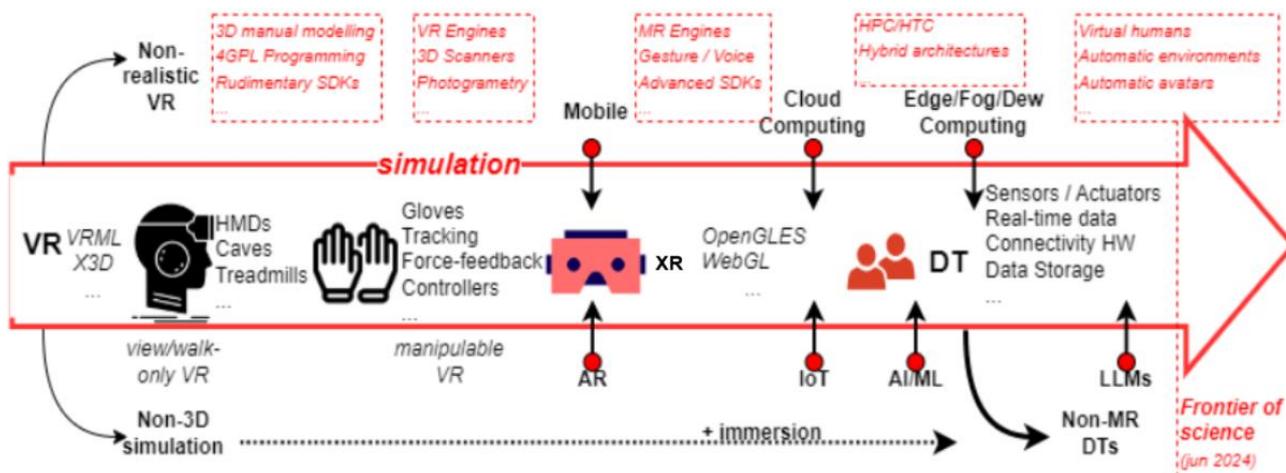


Fig. 2. Continuum VR-DT (fonte: [3])

#### IV. PANORAMA DE DT NA AMÉRICA LATINA

Pretende-se aqui traçar um panorama da aplicação de gêmeos digitais na América Latina [23]:

##### A. Adoção por Setores Industriais

A América Latina está começando a adotar essa tecnologia em setores como:

- **Manufatura:** Empresas estão utilizando gêmeos digitais para otimizar cadeias produtivas, prever falhas em equipamentos e melhorar a eficiência operacional.
- **Energia e Mineração:** Setores como o de energia, principalmente em petróleo e gás, têm sido pioneiros no uso de gêmeos digitais para gerenciar ativos críticos. Na mineração, as grandes companhias usam

para otimização de operações e simulações de processos.

- **Construção e Infraestrutura:** Projetos de construção civil e infraestrutura estão aplicando gêmeos digitais para monitoramento contínuo de obras, permitindo reduzir custos e prever problemas de manutenção.
- **Saúde:** Há iniciativas na área da saúde, embora ainda incipientes, utilizando gêmeos digitais para simular corpos humanos, antecipar respostas a tratamentos e melhorar a gestão de instalações hospitalares.
- **Educação e Treinamento:** DT vêm sendo usados para oferecer simulações realistas de objetos e ambientes, muitas vezes apresentando situações de risco, como instâncias energéticas e exploração de petróleo.

#### B. Iniciativas em Países da América Latina

- **Brasil:** O Brasil tem visto um impulso considerável na adoção de gêmeos digitais, especialmente na indústria de óleo e gás e no setor de manufatura. Há também projetos no setor de construção, impulsionados por soluções de Building Information Modeling (BIM) que integram gêmeos digitais para monitoramento em tempo real [24].
- **México:** O México também é um dos principais mercados de gêmeos digitais na América Latina, com o uso mais difundido no setor automotivo e na manufatura avançada, devido à grande presença de indústrias nesse segmento [25].
- **Chile e Peru:** Estes países, com forte tradição na mineração, estão adotando gêmeos digitais para melhorar a eficiência operacional e reduzir riscos em minas.
- **Na Colômbia,** a adoção de gêmeos digitais ainda está em fase inicial, mas há um interesse crescente em setores estratégicos, como infraestrutura, energia e saúde [26].
  - **Infraestrutura:** Com investimentos em cidades inteligentes e a modernização da infraestrutura urbana, a Colômbia está explorando o uso de gêmeos digitais para monitorar e gerenciar grandes projetos, como a manutenção de estradas, edifícios e redes de serviços públicos. O objetivo é melhorar a eficiência e a longevidade das infraestruturas através da antecipação de falhas e da otimização de recursos.
  - **Energia e Mineração:** Empresas de energia e mineração na Colômbia têm adotado o uso de gêmeos digitais para otimizar operações e monitorar ativos em tempo real. Isso permite prever possíveis interrupções, melhorar a eficiência das operações e reduzir os custos de manutenção.

- **Startups e Inovação:** O ecossistema de startups na Colômbia também começa a se envolver com a tecnologia de gêmeos digitais, especialmente em áreas como a simulação de processos industriais e otimização logística, em parceria com universidades e centros de inovação tecnológica.
- **Na Argentina,** a tecnologia de gêmeos digitais também está começando a ser explorada, com foco em indústrias tradicionais, como manufatura, agricultura e petróleo e gás, que desempenham um papel central na economia do país.
  - **Manufatura:** O uso de gêmeos digitais no setor industrial argentino está focado na digitalização dos processos de fabricação para melhorar a eficiência e a qualidade dos produtos. Empresas de manufatura têm utilizado gêmeos digitais para simular linhas de produção, otimizar a logística e prever falhas em equipamentos, ajudando a reduzir o tempo de inatividade e os custos.
  - **Agricultura:** A agricultura de precisão é uma área promissora para a aplicação de gêmeos digitais na Argentina. O país tem um dos maiores setores agrícolas da América Latina, e a tecnologia está sendo usada para simular o comportamento de plantações, prever colheitas e gerenciar o uso de água e insumos de forma mais eficiente, com a integração de dados de sensores de campo e imagens de satélite.
  - **Energia e Petróleo:** A indústria de petróleo e gás na Argentina também está adotando gêmeos digitais para melhorar a operação de seus ativos. No setor de energia, a aplicação de gêmeos digitais é usada para prever a manutenção de turbinas, oleodutos e plataformas, otimizando o consumo de energia e a sustentabilidade das operações.

A Fig. 3 sintetiza, para comodidade da pessoa leitora, o panorama de DT na América Latina.



Fig. 3. Panorama de adoção de DT na América Latina Fonte: pessoas autoras

Em todos os países da região, os desafios para a adoção mais ampla de gêmeos digitais incluem a necessidade de uma infraestrutura de dados mais robusta, maior investimento em capacitação de mão-de-obra, e a integração entre as plataformas digitais e os sistemas existentes. No entanto, a crescente conscientização sobre os benefícios da transformação digital e o avanço de projetos piloto indicam um futuro promissor para a implementação de gêmeos digitais na Colômbia e na Argentina, particularmente em setores como energia, infraestrutura e agricultura. Os países latino-americanos também têm explorado parcerias com organizações internacionais e iniciativas locais de inovação para acelerar o uso de gêmeos digitais em suas economias, reforçando o papel dessa tecnologia na construção de economias mais inteligentes e sustentáveis.

### C. Desafios na Implementação

- **Infraestrutura Digital Limitada:** Em muitos países da região, a infraestrutura digital necessária para suportar gêmeos digitais, como redes de alta velocidade (5G) e conectividade IoT, ainda está em fase de desenvolvimento.
- **Custo Inicial Elevado:** A implementação de gêmeos digitais envolve custos significativos, o que pode ser um desafio em uma região onde algumas empresas ainda enfrentam limitações orçamentárias.
- **Escassez de Mão de Obra Especializada:** A América Latina ainda enfrenta escassez de profissionais com habilidades específicas em tecnologias digitais, o que pode limitar a adoção em larga escala.
- **Desenvolvimento de Smart Cities:** Com várias cidades latino-americanas adotando tecnologias de cidades inteligentes, os gêmeos digitais podem ser

usados para otimizar sistemas urbanos, como transporte, energia e infraestrutura, melhorando a eficiência e sustentabilidade das cidades.

- **Avanço do 5G e IoT:** A implantação de redes 5G em países da América Latina permitirá que gêmeos digitais se tornem mais viáveis e eficientes, já que a conectividade é um dos principais habilitadores dessa tecnologia.
- **Integração com Sustentabilidade:** Empresas estão cada vez mais focadas em práticas sustentáveis, e gêmeos digitais oferecem uma ferramenta poderosa para monitorar e reduzir o impacto ambiental de operações, otimizar recursos e reduzir desperdícios.

### D. Oportunidades Futuras

Seguem algumas possibilidades futuras nos diferentes cenários de aplicação de DT na LA:

- **Desenvolvimento de Smart Cities:** Com várias cidades latino-americanas adotando tecnologias de cidades inteligentes, os gêmeos digitais podem ser usados para otimizar sistemas urbanos, como transporte, energia e infraestrutura, melhorando a eficiência e sustentabilidade das cidades.
- **Avanço do 5G e IoT:** A implantação de redes 5G em países da América Latina permitirá que gêmeos digitais se tornem mais viáveis e eficientes, já que a conectividade é um dos principais habilitadores dessa tecnologia.
- **Integração com Sustentabilidade:** Empresas estão cada vez mais focadas em práticas sustentáveis, e gêmeos digitais oferecem uma ferramenta poderosa para monitorar e reduzir o impacto ambiental de operações, otimizar recursos e reduzir desperdícios

### E. Parcerias e Iniciativas Governamentais

Alguns governos e empresas da América Latina já estão reconhecendo o potencial dos gêmeos digitais e investindo em pesquisa e desenvolvimento. Universidades e centros de inovação estão estabelecendo parcerias para impulsionar a adoção dessa tecnologia e capacitar profissionais locais.

### F. Demais aplicações no cenário internacional

Ao redor do mundo, DT têm aplicações promissoras na agricultura de precisão e na logística, oferecendo soluções que aumentam a eficiência, reduzem custos e promovem a sustentabilidade. Abaixo, detalho as tecnologias e soluções usadas em outras regiões que podem ser adaptadas para a América Latina:

#### 1. Aplicação de DTs na Agricultura de Precisão

- **Monitoramento de Culturas:** DT integram dados de sensores em campo, imagens de satélite e previsões meteorológicas para criar réplicas virtuais de cultivos. Na prática, isso permite o monitoramento em tempo real de variáveis como umidade do solo, níveis de nutrientes e crescimento das plantas.

- a. Tecnologias Utilizadas: Sensores de umidade do solo, drones equipados com câmeras multiespectrais e sensores climáticos de precisão.
  - b. Exemplo Prático: Na Europa, fazendas na Espanha usam sensores para monitorar o solo e aplicam DTs para prever as melhores práticas de irrigação e fertilização [27]. Esta abordagem ajuda a reduzir o uso de água e insumos, diminuindo custos e impactos ambientais.
- Previsão e Planejamento de Colheitas: Usando dados históricos e em tempo real, DT simulam o desenvolvimento das plantas, oferecendo previsões de produtividade e riscos de doenças. Essas informações orientam o agricultor sobre o momento ideal para a colheita e os recursos necessários.
    - a. Tecnologias Utilizadas: Modelagem baseada em DT com dados históricos de produtividade, sensores IoT, câmeras térmicas e algoritmos de inteligência artificial.
    - b. Exemplo Prático: Na Ásia, fazendas no Japão integram DT para prever e controlar a propagação de pragas em plantações de arroz, permitindo uma resposta rápida que preserva a saúde da cultura e reduz a necessidade de pesticidas [28].

## 2. Aplicação de DTs na Logística

- Otimização de Rotas e Gestão de Frotas: DT de rotas de transporte integram dados de tráfego, clima e capacidade de carga em tempo real para otimizar trajetos, evitando congestionamentos e reduzindo o consumo de combustível.
  - Tecnologias Utilizadas: Sensores de localização GPS, software de modelagem logística e algoritmos de machine learning para predição de tráfego.
  - Exemplo Prático: Na Europa, redes de distribuição na Alemanha aplicam DT para ajustar rotas de caminhões, baseando-se em dados atualizados de trânsito e condições climáticas. Essa prática permite economizar até 15% no consumo de combustível e reduzir as emissões de carbono [29].
- Simulação de Armazenamento e Distribuição: DT ajudam a simular e otimizar o uso de espaço em armazéns, prever demanda e ajustar a distribuição conforme as necessidades. Isso permite reduzir estoques, melhorar o fluxo de mercadorias e minimizar custos de armazenamento.
  - Tecnologias Utilizadas: Sensores RFID para controle de inventário, sistemas de

gestão de armazém (WMS) e algoritmos preditivos para controle de demanda.

- Exemplo Prático: Nos Estados Unidos, grandes armazéns e centros de distribuição adotam DTs para simular cenários de distribuição e ajustar a cadeia de suprimentos conforme o aumento da demanda sazonal, minimizando o tempo de armazenamento e otimizando a rotação de estoque [30].

As aplicações descritas podem ser adaptadas para a América Latina aproveitando o avanço de tecnologias como IoT, redes 5G/6G e computação em nuvem (e suas derivadas), que estão em expansão na região. Além disso, parcerias com startups locais e centros de inovação em agricultura e logística podem acelerar a adoção dos DT.

## CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo trata da aplicação, desafios e limitações dos Gêmeos Digitais (Digital Twins) na América Latina. Ele oferece uma visão geral sobre o estado atual da adoção dessa tecnologia na região, destacando suas aplicações em setores como manufatura, saúde, educação e energia. O estudo também explora o impacto das tecnologias emergentes, como IoT e 5G, que podem acelerar a adoção dos Gêmeos Digitais e potencializar seus benefícios na otimização de processos e eficiência operacional.

Na América Latina, os Gêmeos Digitais ainda estão em fase inicial de implementação. Contudo, países como Brasil, México e Chile já estão explorando suas aplicações em áreas como petróleo e gás, mineração e construção. A infraestrutura limitada e a falta de mão-de-obra qualificada são desafios que afetam a expansão desta tecnologia na região. Além disso, os altos custos iniciais de implementação são uma barreira significativa para empresas e instituições que desejam adotar Gêmeos Digitais em larga escala.

As limitações do uso de Gêmeos Digitais incluem a escassez de profissionais especializados na região, a infraestrutura tecnológica inadequada em muitos países latino-americanos e o custo elevado para implementar e manter essa tecnologia. Essas barreiras tornam a adoção em larga escala mais difícil, especialmente em setores com menor acesso a investimentos tecnológicos. Além disso, a ausência de políticas públicas e incentivos governamentais limita a disseminação dos Gêmeos Digitais em setores estratégicos. Setores como manufatura, energia, saúde e educação são os que mais podem se beneficiar da implementação de DT, principalmente na otimização de processos, redução de custos e melhoria na capacitação profissional e ensino.

Para trabalhos futuros na área, sugere-se o desenvolvimento de programas de capacitação para preparar mão-de-obra qualificada, além de parcerias entre universidades, centros de pesquisa e indústrias para impulsionar a inovação na área. Outra linha de pesquisa pode focar na criação de melhores práticas para a implementação

de Gêmeos Digitais, com adaptações específicas para o contexto latino-americano. Algumas possibilidades são:

- Pesquisa sobre melhores práticas: Um dos principais tópicos para trabalhos futuros envolve a criação de melhores práticas para a implementação e operação de DT, especialmente no contexto latinoamericano, onde muitas empresas ainda não adotaram práticas da Indústria 4.0.
- Capacitação e formação de profissionais: Há uma necessidade de desenvolver programas de capacitação para preparar profissionais qualificados para lidar com as tecnologias relacionadas aos DT. O fortalecimento de parcerias entre universidades, centros de pesquisa e empresas será essencial para preencher essa lacuna.
- Aplicações em Smart Cities: Um dos campos de pesquisa promissores está relacionado ao uso de DT no desenvolvimento de cidades inteligentes, otimizando serviços urbanos e contribuindo para a sustentabilidade urbana. Estudos futuros podem explorar como essas tecnologias podem ser aplicadas para melhorar a qualidade de vida nas cidades latino-americanas.
- Expansão do uso de DT em setores diversos: Estudos futuros também podem se concentrar em expandir o uso de DT em outros setores ainda não explorados na América Latina, como o setor de entretenimento e logística, além de aprimorar as tecnologias já em uso nos setores de saúde e energia. Essas perspectivas reforçam a ideia de que, embora o caminho para a implementação dos Gêmeos Digitais na América Latina seja desafiador, as oportunidades de transformação e inovação são vastas.

#### AGRADECIMENTOS

As pessoas autoras usaram o ChatGPT 4.0 em algumas partes do texto para organização de ideias, revisão gramatical e melhoria de estilo,

#### REFERÊNCIAS

1. M. W. Grieves, "Digital twins: past, present, and future," in *The Digital Twin*, Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 97-121.
2. J. E. C. Bachmann, I. F. Silveira, and V. F. Martins, "Digital Twins for Education: A Literature Review," in *Proceedings of CBIE 2024 – XIII Congresso Brasileiro de Informática na Educação*, Rio de Janeiro, Nov. 2024.
3. I. F. Silveira, A. Cardoso, and V. F. Martins, "Simulation in Education and Training: From Virtual Reality to Digital Twins," in *Proceedings of LACLO 2024 – XIX Conferência Latino-americana de Tecnologias de Aprendizagem*, Montevideo, Uruguay, Oct. 2024.
4. T. W. Kang and C. H. Hong, "A study on software architecture for effective BIM/GIS-based facility management data integration," *Automation in Construction*, vol. 54, pp. 25-38, 2015.
5. M. Singh, E. Fuenmayor, E. P. Hinchy, Y. Qiao, N. Murray, and D. Devine, "Digital twin: Origin to future," *Applied System Innovation*, vol. 4, no. 2, p. 36, 2021. doi: 10.3390/asi4020036.
6. Y. Zhao, C. Cao, and Z. Liu, "A framework for prefabricated component hoisting management systems based on digital twin technology," *Buildings*, vol. 12, no. 3, p. 276, 2022.
7. J. Tang, Y. Liu, X. Zhang, and W. Li, "Digital Twin-Driven Real-Time Suppression of Delamination Damage in CFRP Drilling," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 35, no. 1, pp. 1–18, 2024. doi: 10.1007/s10845-020-01725-4.
8. V. F. Martins, J. E. C. Bachmann, A. Cardoso, and I. F. Silveira, "A three-tiered architectural model for Digital Twins in Education," in *Anais do VI Workshop em Modelagem e Simulação de Sistemas Intensivos em Software (MSSIS)*, Curitiba, Brazil, 2024, pp. 68–77. doi: 10.5753/mssis.2024.3777.
9. I. Onaji, D. Tiwari, P. Soulatiantork, et al., "Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 35, no. 8, pp. 831-858, 2022. doi: 10.1080/0951192X.2022.2031234.
10. C. Semeraro, M. Lezoche, H. Panetto, and M. Dassisti, "Digital twin paradigm: a systematic literature review," *Computers in Industry*, vol. 130, 2023, p. 103469. doi: 10.1016/j.compind.2022.103469.
11. A. Vallée, "Digital Twin for Healthcare Systems," *Frontiers in Digital Health*, vol. 5, 2023. doi: 10.3389/fgth.2023.00123.
12. M. Caporuscio, F. Edrisi, D. Perez-Palacin, M. Hallberg, C. Kopf, and J. Sigvardsson, "EA Blueprint: An Architectural Pattern for Resilient Digital Twin of the Organization," in *Dependable Computing - EDCC 2021 Workshops*, Springer, 2021, pp. 120-131. doi: 10.1007/978-3-030-86507-8\_12.
13. M. Lauer-Schmaltz, P. Cash, and D. G. Tacdeo Rivera, "Towards the Human Digital Twin: A Framework for Human-Centered Digital Representation," in *Proceedings of the 2024 IEEE International Conference on Digital Transformation (ICDT)*, IEEE, 2024. doi: 10.1109/ICDT2024.1234567.
14. M. Zamake, Z. Huang, and J. Kim, "TinyChirp: Bird Song Recognition Using TinyML Models on Low-Power Wireless Acoustic Sensors," in *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Internet of Things (IoT)*, IEEE, 2020, pp. 34-45. doi: 10.1109/IoT2020.8972389.

15. M. Liu, S. Fang, H. Dong, and C. Xu, "Digital Twin and Data-Driven Quality Prediction of Complex Die-Casting Manufacturing," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 18, no. 11, pp. 8119-8128, 2022. doi: 10.1109/TII.2022.3168309.
16. M. A. Eliseo, I. F. Silveira, V. F. Martins, C. A. de la Higuera Amato, D. V. Cunha, L. C. Junior, ... and F. Tanikawa, "An overview of Brazilian companies on the adoption of industry 4.0 practices," in *Iberoamerican Workshop on Human-Computer Interaction*, Cham: Springer International Publishing, Oct. 2022, pp. 15–27.
17. Z. Berko, J. Clark, R. O'Brien, and M. King, "Machine Learning-Based Digital Twin for Predictive Modeling in Wind Turbines," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 12345-12357, 2022. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3147602.
18. S. Malakuti, J. Deutch, and P. Brand, "The Digital Twin: An Enabler for New Business Models in Industrial Automation," in *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*, 2021, pp. 125-131. doi: 10.1109/DTPI.2021.1234567.
19. P. Verdoux, L. Coudert, and J. Serughetti, "Digital Twin-Enabled Optimization of Manufacturing Processes," in *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*, IEEE, 2021, pp. 45-49. doi: 10.1109/DTPI.2021.9634143.
20. H. van der Valk, H. Haße, F. Möller, and B. Otto, "Archetypes of Digital Twins," *Business & Information Systems Engineering*, vol. 64, no. 3, pp. 375-391, 2022. doi: 10.1007/s12599-022-00735-6.
21. E. Kovacs and K. Mori, "Digital Twin Architecture – An Introduction," in *The Digital Twin*, Springer International Publishing, Cham, 2023, pp. 125-151.
22. N. Crespi, R. Minerva, A. T. Drobot, and F. M. Awan, "Artificial Intelligence and the Digital Twin: An Essential Combination," in *The Digital Twin: What and Why?*, Springer, 2023, pp. 299-336. doi: 10.1007/978-981-97-5675-9\_1.
23. D. M. Botín-Sanabria, A. S. Mihaita, R. E. Peimbert-García, M. A. Ramírez-Moreno, R. A. Ramírez-Mendoza, and J. D. J. Lozoya-Santos, "Digital twin technology challenges and applications: A comprehensive review," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 6, p. 1335, 2022.
24. C. D. B. C. S. Alvarenga, "Framework para Digital Twins: integração entre o BIM, IoT e plataformas em nuvem para projetos de estruturas de edifícios industriais," 2024.
25. L. Gómez-Coronel, I. Santos-Ruiz, L. Torres, F. R. López-Estrada, S. Gómez-Peñate, and E. Escobar-Gómez, "Digital twin of a hydraulic system with leak diagnosis applications," *Processes*, vol. 11, no. 10, p. 3009, 2023.
26. C. A. Bonilla, A. Zanfei, B. Brentan, I. Montalvo, and J. Izquierdo, "A digital twin of a water distribution system by using graph convolutional networks for pump speed-based state estimation," *Water*, vol. 14, no. 4, p. 514, 2022.
27. P. Angin, M. H. Anisi, F. Göksel, C. Gürsoy, and A. Büyükgülcü, "Agrilora: a digital twin framework for smart agriculture," *J. Wirel. Mob. Networks Ubiquitous Comput. Dependable Appl.*, vol. 11, no. 4, pp. 77–96, 2020.
28. P. Skobelev, A. Tabachinskiy, E. Simonova, T. R. Lee, A. Zhilyaev, and V. Laryukhin, "Digital twin of rice as a decision-making service for precise farming, based on environmental datasets from the fields," in *2021 International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT)*, pp. 1–8, Sept. 2021. doi: 10.1109/ITNT52450.2021.9649235.
29. M. Kajba, B. Jereb, and T. Cvahte Ojsteršek, "Exploring Digital Twins in the Transport and Energy Fields: A Bibliometrics and Literature Review Approach," *Energies*, vol. 16, no. 9, p. 3922, 2023. doi: 10.3390/en16093922.
30. B. Nicoletti and A. Appolloni, "A framework for digital twins solutions for 5 PL operators," *Technology in Society*, vol. 76, p. 102415, 2024. doi: 10.1016/j.techsoc.2023.102415.