



Recebido em: 11/12/2024.

Aceito em: 30/01/2025.

Revista SODEBRAS – Volume 20
Nº 223 – JANEIRO/ ABRIL - 2025

GÊMEOS DIGITAIS NA INDÚSTRIA 5.0: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE AVANÇOS, DESAFIOS E CRITÉRIOS DE QUALIDADE

DIGITAL TWINS IN INDUSTRY 5.0: A LITERATURE REVIEW ON ADVANCES, CHALLENGES AND QUALITY CRITERIA

Frankysia Faria Maciel¹

Marcelo Rudek²

Resumo – Gêmeos digitais são consolidados como uma tecnologia essencial na transformação digital com aplicações em setores como educação, saúde, inovação e gestão de desastres. Este estudo, baseado em uma revisão bibliográfica sistemática, teve como objetivo analisar os avanços, desafios e critérios de avaliação da qualidade dos gêmeos digitais, explorando sua relevância no contexto da Indústria 5.0. Foi utilizado o método de Revisão Sistemática da Literatura e as diretrizes PRISMA. Foram investigados critérios como precisão, interoperabilidade, integridade e segurança, além de soluções tecnológicas como blockchain e aprendizado profundo. Os resultados indicam que, embora os gêmeos digitais apresentem elevado potencial para otimização de processos e apoio à tomada de decisão, desafios como a ausência de padronização e infraestrutura limitada ainda restringem sua implementação. Conclui-se que frameworks padronizados e políticas de segurança são indispensáveis para garantir a confiabilidade e escalabilidade da tecnologia. Este artigo contribui ao fornecer uma análise crítica do estado da arte e ao propor alternativas para futuras pesquisas no campo dos gêmeos digitais.

Palavras-chave: Gêmeos digitais. Qualidade de modelos virtuais. Blockchain. Indústria 5.0.

Abstract – Digital twins are consolidated as an essential technology in the digital transformation with applications in sectors such as education, health, innovation and disaster management. This study, based on a systematic literature review, aimed to analyze the advances, challenges and quality assessment criteria of digital twins, exploring their relevance in the context of Industry 5.0. The Systematic Literature Review method and PRISMA guidelines were used. Criteria such as accuracy, interoperability, integrity and security were investigated, as well as technological solutions such as blockchain and deep learning. The results indicate that although digital twins have great potential for optimizing processes and supporting decision-making, challenges such as the lack of standardization and limited infrastructure still restrict their implementation. It is concluded that standardized frameworks and security policies are indispensable to guarantee the reliability and scalability of the technology. This article contributes by providing a critical analysis of the state of the art and proposing alternatives for future research in the field of digital twins.

¹ Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). E-mail: frankysia.maciel@pucpr.edu.br.

² Pós-Doutorado no Public Research Centre Henri Tudor em Luxemburgo. Professor da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). E-mail: marcelo.rudek@pucpr.br.

Keywords: *Digital twins. Quality of virtual models. Blockchain. Industry 5.0.*

I. INTRODUÇÃO

Os gêmeos digitais, réplicas virtuais precisas de objetos ou sistemas físicos, emergiram como uma das tecnologias mais promissoras no cenário contemporâneo. Suas aplicações abrangem setores diversos como educação, saúde, indústria e gestão de desastres, possibilitando simulações avançadas, monitoramento em tempo real e tomadas de decisões fundamentadas em dados. Essa tecnologia é essencial na integração de recursos como inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT) e aprendizado profundo, otimizando processos e potencializando a eficiência operacional (LV et al., 2022a; PODÉUS et al., 2024).

Contudo, a qualidade dos gêmeos digitais é uma variável crítica que impacta diretamente sua eficácia. Elementos como precisão, integridade dos dados, interoperabilidade e segurança são fundamentais para garantir simulações confiáveis e úteis em aplicações práticas. Tecnologias emergentes como o blockchain, têm sido propostas para fortalecer a integridade dos dados em contextos críticos, enquanto redes neurais e modelos de aprendizado profundo otimizam a responsividade e a capacidade de adaptação de gêmeos digitais em ambientes dinâmicos (HUANG; YI, 2024; ROULLIER et al., 2024). No que pese esses avanços, os desafios permanecem, incluindo a ausência de padronização para avaliação de qualidade, a necessidade de quadros escaláveis e a implementação de medidas de segurança robustas.

Compreender os avanços e os desafios concernentes à qualidade e às aplicações dos gêmeos digitais é crucial, especialmente em um momento em que a transformação digital redefine processos industriais e sociais. Nesse sentido, uma revisão bibliográfica se apresenta como uma ferramenta valiosa para consolidar o conhecimento existente, identificar lacunas na literatura e propor caminhos para futuras investigações.

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar uma revisão sistemática da literatura sobre critérios de avaliação da qualidade e as aplicações dos gêmeos digitais. A pesquisa busca mapear os avanços recentes na área, discutir os desafios enfrentados e explorar soluções propostas, com foco em critérios como soluções, segurança, interoperabilidade e eficiência. Este estudo visa contribuir para o entendimento abrangente do tema, auxiliando pesquisadores e profissionais na implementação mais eficaz dessa tecnologia em diferentes contextos.

Com esta abordagem contextual, é proposto a apresentação de uma visão crítica e integrada sobre o estado da arte dos gêmeos digitais, destacando seu potencial transformador e os obstáculos que ainda precisam ser superados para maximizar os resultados de sua aplicação nas mais diversas áreas.

II. METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo deste trabalho, a abordagem utilizada foi baseada no método de revisão bibliográfica sistemática (STAFFS, 2007). Esse método é amplamente utilizado para organizar, sintetizar e criticar o conhecimento existente sobre um tema, assegurando o rigor científico e permitindo a identificação de lacunas e tendências na literatura.

2.1 Estrutura Metodológica

Conforme o método sugerido, a revisão bibliográfica foi organizada em três etapas principais:

Planejamento da revisão:

- Definição do problema de pesquisa e dos objetivos específicos, orientados pela questão central: *Quais são os avanços, desafios e critérios de avaliação da qualidade e aplicações dos gêmeos digitais em diferentes setores?*
- Desenvolvimento de um protocolo de revisão para sistematizar a busca, seleção e análise do conteúdo.

Execução da revisão:

- Realização das buscas nas bases de dados do Portal de Periódicos CAPES, como Scopus, IEEE Xplore, Springer e ScienceDirect, sendo que a seleção de artigos foi realizada com base em critérios de impacto e relevância para o tema.
- Uso de aspas duplas (" ") para pesquisar frases exatas e estratégias de busca com palavras-chave combinadas com o termo "gêmeos digitais", como: "Critérios de Avaliação", "Metaverso Industrial", "Transformação Digital", "Performance", e "Computação Espacial".
- Foram utilizados operadores booleanos (AND, OR e NOT), para garantir abrangência e precisão.

Análise e síntese dos dados:

- Extração de informações relevantes dos artigos selecionados, categorizando-os por contexto de aplicação, critérios de qualidade avaliados, tecnologias associadas e desafios enfrentados.
- Integração das informações para mapear o estado da arte, identificar lacunas e proporções futuras.

2.2 Critérios de Inclusão e Exclusão

Os critérios de inclusão e exclusão foram definidos para garantir a relevância e a qualidade dos estudos analisados:

Critérios de inclusão:

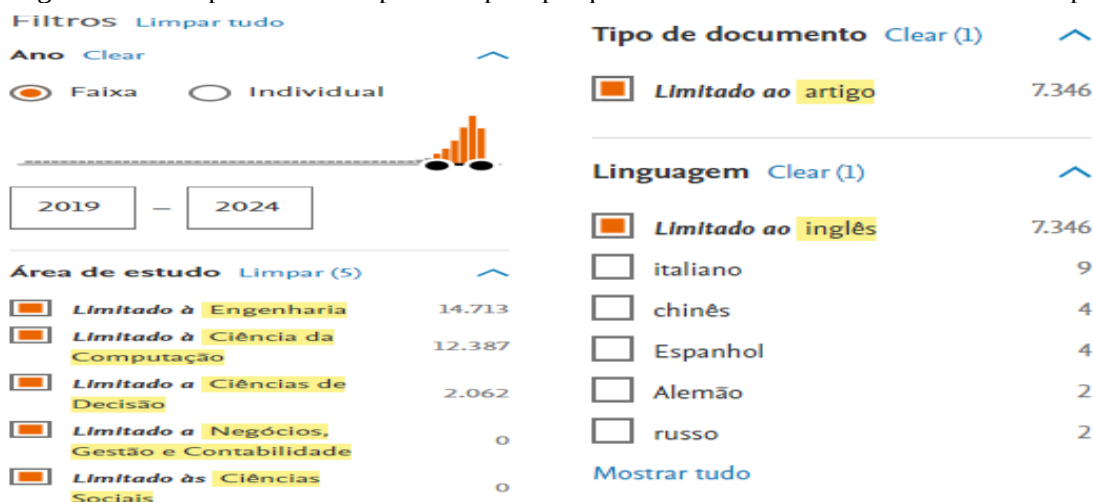
- Estudos publicados em língua inglesa, entre 2019 e 2024, salvo aqueles considerados fundamentais para o tema.
- Artigos revisados por pares que abordem o tema de gêmeos digitais com foco em qualidade ou aplicações práticas.
- Áreas temáticas como: Engenharia; Ciência da Computação; Ciências da Decisão; Ciências Sociais Aplicadas; Negócios e Gestão.

Critérios de exclusão:

- Estudos que não apresentavam conexão direta com o tema central ou tratavam de maneira superficial.
- Trabalhos repetidos em diferentes bases de dados.
- Publicações de baixa qualidade metodológica ou sem revisão por pares.

Na Figura 1 é possível verificar um exemplo de parte da pesquisa, onde foi feita uma filtragem que considera um intervalo de 5 (cinco) anos, trabalhos publicados em língua inglesa e algumas áreas específicas de estudo.

Figura 1 – Exemplo de filtros aplicados para pesquisas realizadas na base de dados da Scopus.



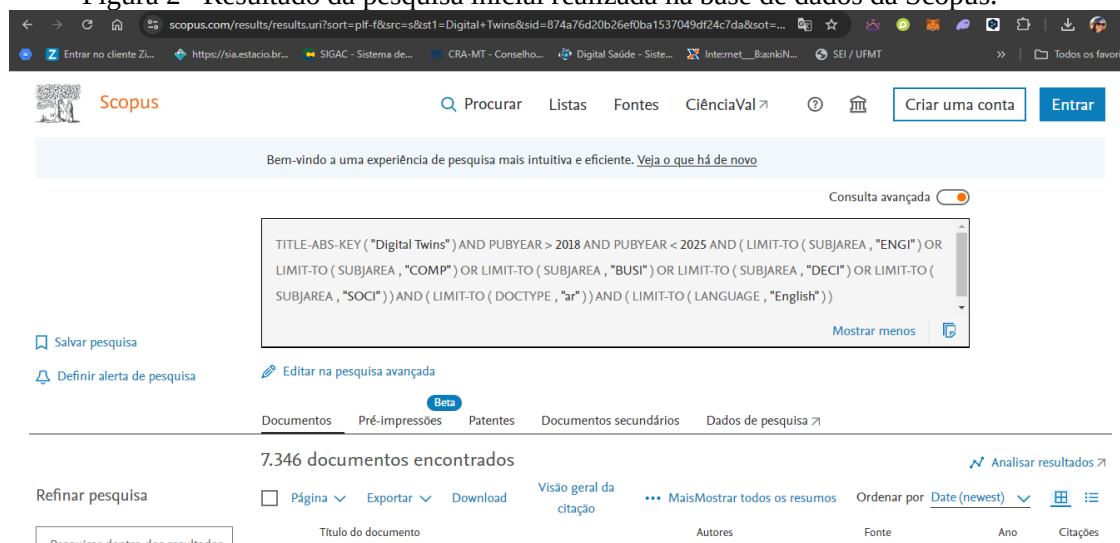
Fonte: Adaptado da Scopus, 2024.

2.3 Processo de Seleção

Para a seleção dos artigos foi empregada a abordagem PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), que orienta a apresentação de revisões sistemáticas (MOHER et al., 2009). As etapas incluíram:

- Identificação: busca inicial na base de dados da Scopus, que resultou em 7.346 (sete mil trezentos e quarenta e seis) artigos, conforme Figura 2.
- Triagem: leitura de títulos e resumos para identificar os artigos mais relevantes.
- Elegibilidade: leitura completa de 116 (cento e dezesseis) artigos para verificar alinhamento com os objetivos do estudo e os critérios de inclusão e exclusão.
- Inclusão: seleção final de 38 (trinta e oito) artigos considerados relevantes para o estudo em tela.

Figura 2 –Resultado da pesquisa inicial realizada na base de dados da Scopus.



2.4 Análise dos Dados

Os artigos selecionados foram analisados qualitativamente, e as informações extraídas foram organizadas em categorias temáticas, como:

- Critérios de qualidade: precisão, integridade, interoperabilidade e segurança.
- Avanços tecnológicos: uso de inteligência artificial, aprendizado profundo e blockchain.
- Aplicações práticas: setores de saúde, educação, fabricação, gestão de desastres, entre outros.
- Desafios identificados: ausência de padronização, vulnerabilidades cibernéticas e integração tecnológica.

2.5 Limitações do Estudo

Apesar do rigor metodológico, o estudo apresenta limitações, incluindo a restrição às bases de dados específicas e aos critérios temporais aplicados, o que pode ter excluído trabalhos relevantes fora desse escopo. Ademais, a escolha de estudos publicados apenas em inglês pode limitar a diversidade de perspectivas globais sobre o tema. E a seleção de áreas temáticas, em especial, direcionadas para engenharia, gestão e tecnologia, pode inibir as contribuições advindas de outras ciências.

III. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Avaliação da Qualidade e Aplicações dos Gêmeos Digitais: Avanços e Desafios

Gêmeos digitais são amplamente utilizados em diversas áreas como educação, saúde, inovação e gestão de desastres, para otimização de processos, prever falhas e apoiar decisões (LV et al., 2022b; QU; ZHAO; ZHANG, 2024). Na saúde, por exemplo, esses modelos permitem prever respostas a tratamentos e monitorar condições crônicas, como diabetes, fornecendo insights personalizados (PODÉUS et al., 2024; SURIAN et al., 2024).

A qualidade dos gêmeos digitais é essencial e depende de critérios como precisão, integridade, interoperabilidade e segurança de dados. A fidelidade à representação física e a integridade dos dados garantem simulações confiáveis, enquanto tecnologias emergentes como inteligência artificial aumentam a precisão, embora exijam uma infraestrutura robusta (HUANG; YI, 2024; ROULLIER et al., 2024). Soluções como o uso de blockchain têm sido propostas para fortalecer a segurança e integridade de dados em aplicações críticas (AKHTAR et al., 2024).

Modelos baseados em redes neurais e aprendizado profundo otimizam o emprego de gêmeos digitais em sistemas dinâmicos como veículos autônomos, tornando possível a adaptação às mudanças do ambiente (LEE; PARK; SUNG, 2024). Estudos como o *Disaster City Digital Twin*, que busca integrar inteligência artificial e inteligência humana para aperfeiçoar a gestão de desastres, destacam a necessidade de avaliações contínuas de qualidade de gêmeos digitais em cenários críticos (FAN et al., 2021).

Embora avanços tenham sido feitos, desafios como a ausência de padronização dificultam a comparação e as garantias de qualidade no que tange a aplicabilidade de gêmeos digitais em diferentes setores. As pesquisas futuras devem focar em frameworks flexíveis e escaláveis para apoiar a crescente complexidade dos sistemas integrados e as

implicações éticas e de segurança associadas a tecnologias emergentes (GUO et al., 2024; KULKARNI et al., 2024).

3.2 Metaverso Industrial: Integração Tecnológica e Desafios na Avaliação de Qualidade

O metaverso industrial surge como uma evolução tecnológica para setores industriais, oferecendo ambientes virtuais imersivos que simulam e analisam operações em tempo real. Baseado em tecnologias como inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT), realidade aumentada e virtual, esse conceito integra dados do mundo físico para otimização de processos e predição de cenários, alinhando-se aos princípios da Indústria 5.0, que promove a colaboração humano-máquina (MARTÍNEZ-GUTIÉRREZ et al., 2024; PATTERSON, 2024).

Os gêmeos digitais, componentes centrais do metaverso industrial, funcionam como réplicas dinâmicas que interagem continuamente com o ambiente físico. Suas aplicações incluem testes virtuais, integração com NFTs (tokens não fungíveis) para rastreabilidade de ativos e suporte a decisões críticas, redução de custos e melhoria da eficiência (CHEN, 2022; HASAN et al., 2024). A qualidade desses modelos exige avaliação criteriosa, considerando aspectos como precisão, integridade dos dados e interoperabilidade, fundamentais para simulações confiáveis (GOURISETTI et al., 2023; TU et al., 2024).

Desafios como a padronização de critérios de qualidade e a segurança dos dados ainda precisam ser superados. Propostas de arquiteturas modulares e escaláveis apontam para a evolução do metaverso industrial, possibilitando aplicações abrangentes, desde o design de produtos até a manutenção preditiva. A proteção contra ataques cibernéticos e a garantia de dados confiáveis são cruciais para a continuidade e eficácia dessas tecnologias (DOLGUI; IVANOV, 2024; XIANG et al., 2024).

O desenvolvimento de ferramentas consistentes para a avaliação de qualidade dos gêmeos digitais no metaverso industrial é essencial para viabilizar o pleno potencial dessas tecnologias na Indústria 5.0, promovendo inovação e eficiência (YAO et al., 2024).

3.3 Contribuições e Desafios da Computação Espacial na Qualidade dos Gêmeos Digitais

A computação espacial emerge como uma tecnologia essencial para o desenvolvimento de réplicas digitais interativas e precisas em ambientes tridimensionais, integrando elementos físicos e virtuais. No contexto dos gêmeos digitais, ela desempenha papel central ao fornecer simulações em tempo real e interações que refletem a física do mundo real, fundamentando a avaliação de sua qualidade (ALDRIDGE, 2023; ALI et al., 2023). Essa tecnologia abrange algoritmos de percepção visual, sensores de movimento e plataformas de realidade possíveis, que buscam replicar a aparência e o comportamento dinâmico de objetos físicos (CUG; PALCAK; MATEI, 2023).

No setor industrial, a computação espacial otimiza processos por meio de simulações precisas, favorecendo configurações e análises antes de implementações físicas. Como no caso de um projeto inovador que utiliza a realidade mista e gêmeos digitais para desenvolver um ambiente virtual imersivo, destinado ao treinamento de colaboradores de uma empresa especializada no setor eletromecânico, situada na cidade de Curitiba-PR. Considerando os riscos envolvidos e à impossibilidade de interrupção reiterada dos processos de fabricação, é proposto um método que utiliza tecnologias Microsoft Hololens para criar cenários de treinamento virtual imersivo, permitindo

capacitar os funcionários de forma eficiente para atuarem na manutenção de máquinas e equipamentos para as subestações elétricas (VALANDRO; NOGUEIRA; RUDEK, 2024).

Nesse contexto, surge uma abordagem que destaca a eficiência na transformação digital e a interação humana com modelos virtuais para otimização de processos industriais. Trata-se de um método automatizado que utiliza gêmeos digitais e realidade mista imersiva para projetar e atualizar layouts de chão de fábrica no setor automotivo. Com base em técnicas de fotogrametria, ambientes 3D são recriados a partir de imagens digitais, eliminando a necessidade de interações manuais e desenhos em software CAD. A proposta visa digitalizar plantas industriais com precisão e rapidez, tornando possível a simulação de diferentes arranjos antes da implementação dos mesmos (DA SILVA NETO; RUDEK, 2024).

Entretanto, a integração dessa tecnologia enfrenta desafios, como a alta demanda computacional para processamento de dados em tempo real e a necessidade de garantir a interoperabilidade entre sistemas (CAPPANNARI; VITILLO, 2022). Além disso, algoritmos avançados de fusão de sensores são imprescindíveis para consolidar dados e criar modelos digitais responsivos e confiáveis (WALLACE, 2023). A avaliação de qualidade de gêmeos digitais depende da precisão da modelagem espacial, da responsividade das simulações e da adaptação às mudanças em tempo real. Aspectos como a segurança de dados também são críticos, especialmente em contextos sensíveis, onde a proteção contra ciberataques é fundamental (PENA-RIOS; WU, 2023).

O futuro da computação espacial aponta para maior integração entre os mundos físico e digital, com avanços em inteligência artificial e realidade aumentada, ampliando as aplicações de gêmeos digitais em diversos setores, como educação e manufatura (LUO et al., 2024; STATES; CITY; STATES, 2024). Novos estudos devem ser realizados visando aumentar a eficiência e acessibilidade das tecnologias espaciais, além de criar padrões e controles que assegurem a qualidade dos gêmeos digitais, promovendo sua relevância na transformação digital (PENA-RIOS; WU, 2023).

3.4 Transformação Digital e Gêmeos Digitais: Desafios e Oportunidades na Indústria

A transformação digital redefine processos industriais por meio da integração de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e big data, promovendo eficiência, redução de custos e melhoria na qualidade de produtos e serviços. Gêmeos digitais desempenham papel central, fornecendo representações virtuais que permitem simulações em tempo real, prevenção de falhas e otimização de processos, especialmente em setores como a fabricação (KANG; LEE, 2024; SABATUCCI et al., 2023).

Não obstante o seu potencial, barreiras culturais, econômicas e organizacionais, além da falta de infraestrutura tecnológica, dificultam sua implementação. A avaliação de qualidade desses modelos é essencial e deve considerar critérios como precisão dos dados, capacidade de integração e eficiência das simulações. O desenvolvimento de frameworks para avaliação e a integração de tecnologias emergentes, como machine learning e blockchain, são estratégias promissoras para superar os desafios e garantir a confiabilidade das metades digitais (HAGEN; ANDERSEN, 2024).

A tendência é que a relevância dos gêmeos digitais em operações industriais complexas aumente, principalmente com métodos de avaliação adaptados às demandas dinâmicas da Indústria 5.0. Estudos sobre sincronização de dados e otimização de processos são fundamentais para aprimorar sua qualidade e aplicabilidade, assegurando que essas tecnologias continuem a desempenhar papel central na transformação digital (ZHANG et al., 2024).

3.5 Desempenho e Sustentabilidade dos Gêmeos Digitais: Fatores Críticos e Desafios

A performance dos gêmeos digitais está associada à sua capacidade de realizar simulações precisas, processando grandes volumes de dados em tempo real e respondendo de forma ágil às mudanças no ambiente físico. Fatores como infraestrutura tecnológica, qualidade dos dados e algoritmos implementados influenciam diretamente sua eficácia. Técnicas de aprendizado profundo, como redes neurais convolucionais (CNNs), e ferramentas de atualização de dados são essenciais para melhorar o desempenho de modelos dessas aplicações nos setores industriais e de saúde (MIAO; LI; PAN, 2024; ROULLIER et al., 2024).

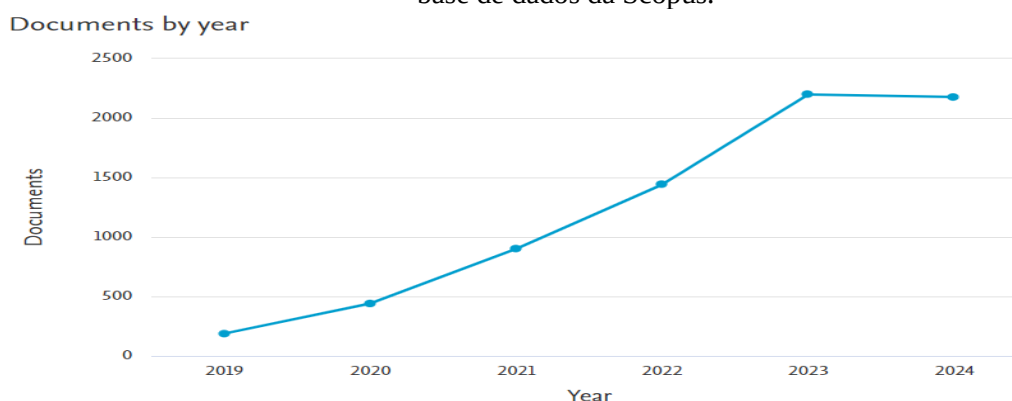
Em áreas como a construção e a cadeia de suprimentos, o desempenho é avaliado pela precisão geométrica dos modelos e pela eficácia em mitigar interrupções, como na pandemia de COVID-19. No entanto, desafios como latência em ambientes de nuvem, qualidade dos dados e equilíbrio entre precisão e agilidade são barreiras significativas. Estratégias de otimização de algoritmos e tendências de dados são fundamentais para garantir insights oportunos e confiáveis (JAVED et al., 2024; PAN et al., 2024).

O futuro da avaliação de desempenho dos gêmeos digitais depende do desenvolvimento contínuo de inteligência artificial, computação em nuvem e blockchain, além da criação de frameworks padronizados que assegurem consistência e adaptação a diferentes contextos de aplicação (HUANG; YI, 2024).

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa revelou que houve um aumento no número de artigos publicados, entre 2019 e 2024, o que indica ser um tema de crescente interesse no meio acadêmico, como pode ser observado no gráfico da Figura 3.

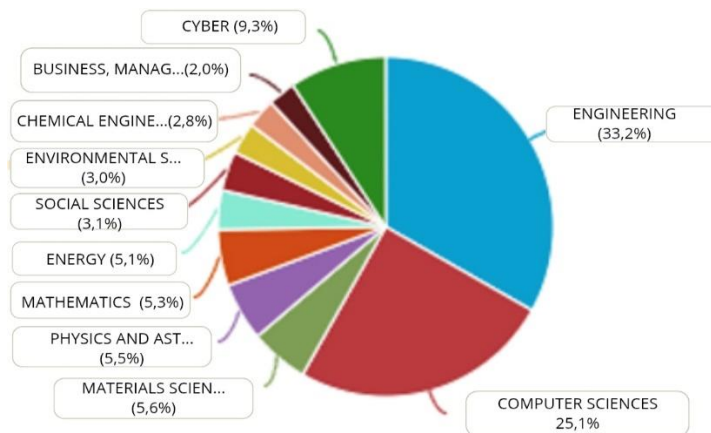
Figura 3 – Gráfico dos artigos por ano, emitido a partir das pesquisas realizadas na base de dados da Scopus.



Fonte: Adaptado da Scopus, 2024.

Foi observado que a Engenharia com 33,2%, seguida pela Ciências de Computação com 25,1%, são as áreas que tem demonstrado maior empenho em realizar estudos no que concerne ao cenário dos gêmeos digitais, o que pode ser visualizado na Figura 4.

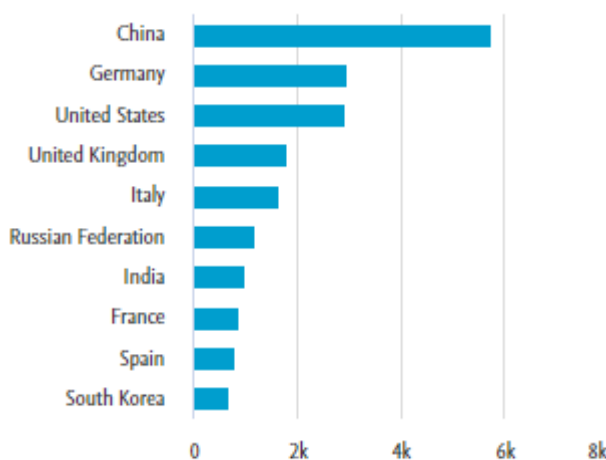
Figura 4 – Gráfico dos artigos por área temática, emitido a partir das pesquisas realizadas na base de dados da Scopus.



Fonte: Adaptado da Scopus, 2024.

No que tange aos países que têm investido maiores esforços para investigar essa temática, foi verificado que a China desponta em primeiro lugar, logo vem a Alemanha, e em terceiro lugar os Estados Unidos, a Figura 5 mostra essa tendência.

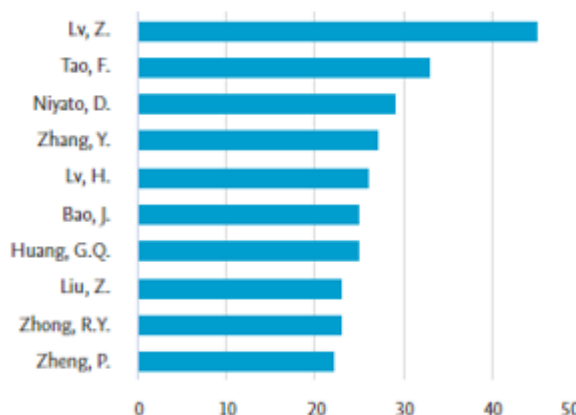
Figura 5 – Gráfico dos artigos por país, emitido a partir das pesquisas realizadas na base de dados da Scopus.



Fonte: Adaptado da Scopus, 2024.

O estudo identificou ainda alguns dos principais autores que têm dedicado tempo para abordar o tema de gêmeos digitais, onde Lv, Z. aparece em destaque, seguido por Tao, F. , e na terceira posição surge Niyato, D., sendo esses nomes elencados na Figura 6, os grandes estudiosos da atualidade dentro desse contexto que envolve os gêmeos digitais.

Figura 6 – Gráfico dos artigos por país, emitido a partir das pesquisas realizadas na base de dados da Scopus.



Fonte: Adaptado da Scopus, 2024.

A partir da revisão bibliográfica sistemática foram identificados avanços, desafios e critérios fundamentais para a avaliação da qualidade e as aplicações dos gêmeos digitais. Os resultados obtidos foram organizados em categorias temáticas para fornecer uma análise detalhada dos objetivos do estudo: avanços tecnológicos dos gêmeos digitais; critérios de qualidade dos gêmeos digitais; e desafios na implementação de gêmeos digitais.

4.1 Avanços Tecnológicos dos Gêmeos Digitais

Os gêmeos digitais evoluíram significativamente, impulsionados por tecnologias como inteligência artificial (IA), aprendizado profundo, Internet das Coisas (IoT) e blockchain. Esses avanços possibilitam:

- **Maior precisão nas simulações:** Modelos baseados em redes neurais e aprendizado profundo têm melhorado a fidelidade das representações virtuais, permitindo respostas mais rápidas e adequadas a mudanças no ambiente físico (LEE; PARK; SUNG, 2024).
- **Integração em aplicações críticas:** Exemplos como o "Disaster City Digital Twin" destacam sua eficácia em prever cenários de risco e apoiar a gestão de crises, demonstrando o potencial da tecnologia em situações de alta complexidade (FAN et al., 2021).
- **Segurança aprimorada:** O uso de blockchain tem como exibição promessa de proteção de integridade e confidencialidade de dados, especialmente em aplicações críticas como saúde e produção (AKHTAR et al., 2024).

Esses avanços permitiram o uso de tecnologias digitais em uma gama diversificada de setores, ampliando sua relevância na transformação digital e contribuindo para a transição da Indústria 5.0 (MARTÍNEZ-GUTIÉRREZ et al., 2024).

4.2 Critérios de Qualidade dos Gêmeos Digitais

A qualidade dos gêmeos digitais é essencial para sua eficácia e depende de critérios como:

- **Precisão e fidelidade da representação:** Garantir que os modelos virtuais reflitam com exatidão as características físicas do objeto ou sistema é fundamental para simulações confiáveis (HUANG; YI, 2024).

- **Interoperabilidade:** A integração de sistemas heterogêneos é um desafio recorrente. Soluções baseadas em padrões abertos e arquiteturas modulares têm sido propostas para melhorar a conectividade (DOLGUI; IVANOV, 2024).
- **Segurança e integridade dos dados:** A proteção contra ciberataques é crítica, especialmente em contextos sensíveis, como saúde e defesa. Blockchain e algoritmos avançados de criptografia têm sido utilizados para mitigar essas vulnerabilidades (GOURISETTI et al., 2023).

Os critérios de qualidade identificados na literatura reforçam a necessidade de padronização e enquadramentos consistentes para avaliação, garantindo fiabilidade e escalabilidade das aplicações.

4.3 Desafios na Implementação de Gêmeos Digitais

Apesar dos avanços, desafios importantes persistem na implementação e avaliação de gêmeos digitais:

- **Ausência de padronização:** A falta de critérios unificados dificulta comparações e a avaliação consistente entre diferentes setores (GUO et al., 2024).
- **Infraestrutura tecnológica limitada:** A alta demanda por poder computacional e conectividade de alta velocidade restringe sua adoção em ambientes com infraestrutura limitada (PODÉUS et al., 2024).
- **Implicações éticas e de segurança:** O uso extensivo de dados pessoais e industriais levanta preocupações sobre privacidade e confidencialidade, exigindo regulamentações robustas (SURIAN et al., 2024).

Estes desafios ressaltam a importância de investimentos em infraestrutura e políticas que promovam a segurança e a interoperabilidade, essenciais para o crescimento sustentável dos gêmeos digitais.

4.4 Discussão dos Resultados

Os avanços tecnológicos e os desafios identificados refletem um cenário de rápida evolução e complexidade crescente no desenvolvimento e uso de tecnologias digitais. A literatura destaca o potencial transformador dessas tecnologias, mas também aponta a necessidade de frameworks flexíveis e escaláveis para atender às demandas dinâmicas de aplicações industriais e sociais.

Os critérios de qualidade emergem como um ponto crítico, evidenciando a importância de padronização e práticas robustas de segurança. Propostas como o uso de blockchain e aprendizado profundo demonstram como tecnologias emergentes podem ser combinadas para mitigar os principais desafios.

A integração dos gêmeos digitais ao metaverso industrial e outras iniciativas de transformação digital também reforçam sua relevância como ferramenta central na Indústria 5.0. No entanto, é imperativo que questões éticas e regulamentares sejam abordadas para evitar impactos negativos no longo prazo.

4.5 Contribuições para Pesquisas Futuras

Os resultados desta revisão apontam para a necessidade de:

- Desenvolver frameworks padronizados para avaliação da qualidade dos gêmeos digitais, considerando critérios como precisão, interoperabilidade e segurança.

- Explorar soluções que otimizem a eficiência energética e computacional para ampliar sua adoção em contextos com infraestrutura limitada.
- Ampliar estudos sobre as implicações éticas e sociais, promovendo o desenvolvimento de tecnologias inclusivas e seguras.

Os resultados e a discussão apresentada fornecem uma base sólida para o avanço do conhecimento sobre os gêmeos digitais, reforçando sua importância como tecnologia estratégica na transformação digital e na evolução para a Indústria 5.0.

V. CONCLUSÃO

Com base no que foi apresentado, o presente estudo respondeu à questão central da pesquisa ao demonstrar os principais avanços, desafios e critérios de avaliação da qualidade e das aplicações de gêmeos digitais em diversos setores. Os resultados evidenciaram que, embora tecnologias como inteligência artificial, blockchain e aprendizado profundo tenham impulsionado a evolução dessa ferramenta, desafios relacionados à padronização, interoperabilidade e segurança ainda limitam sua implementação e eficácia.

Os resultados reafirmam a hipótese de que a ausência de frameworks padronizados para avaliação de qualidade representa um obstáculo significativo para o desenvolvimento e aplicação consistente dos gêmeos digitais. Por outro lado, critérios fundamentais, como precisão, integridade dos dados e conectividade, foram identificados como alicerces para garantir simulações confiáveis e efetivas. A análise também apresentou soluções tecnológicas promissoras, como o uso de blockchain para segurança de dados e arquiteturas modulares para melhorar a interoperabilidade.

As limitações do estudo incluem a dependência de publicações disponíveis nas bases de dados selecionadas e o recorte temporal adotado, que podem ter restringido o acesso a contribuições mais amplas ou a estudos relevantes fora do intervalo considerado. Além disso, o foco em critérios técnicos não explorou em profundidade aspectos sociais e culturais relacionados à adoção dos gêmeos digitais.

O objetivo do trabalho foi cumprido ao consolidar e discutir o estado da arte sobre gêmeos digitais, fornecendo uma base sólida para o avanço da pesquisa e oferecendo subsídios práticos para a aplicação dessa tecnologia em diferentes setores. Este estudo contribui para a literatura existente ao integrar critérios técnicos e contextuais, traçando caminhos para a superação de desafios e o desenvolvimento sustentável dos gêmeos digitais no futuro. Desta forma, reforça-se a importância dessa tecnologia como um pilar da transformação digital e da Indústria 5.0.

VI. REFERÊNCIAS

- AKHTAR, S. I. et al. Compliance and feedback based model to measure cloud trustworthiness for hosting digital twins. **Journal of Cloud Computing**, v. 13, n. 1, 2024.
- ALDRIDGE, S. Tracking and Spatial Computing Technologies, Virtual Navigation and Ambient Scene Detection Tools, and Motion Planning and Remote Sensing Algorithms in the Metaverse. **Linguistic and Philosophical Investigations**, v. 22, n. 5, p. 111–127, 2023.
- ALI, M. E. et al. Enabling Spatial Digital Twins: Technologies, Challenges, and Future Research Directions. 2023.
- CAPPANNARI, L.; VITILLO, A. XR and metaverse software platforms.

Roadmapping Extended Reality: Fundamentals and Applications, n. 2021, p. 135–156, 2022.

CHEN, Y. Research on collaborative innovation of key common technologies in new energy vehicle industry based on digital twin technology. **Energy Reports**, v. 8, p. 15399–15407, 2022.

CUG, J.; PALCAK, L.; MATEI, A. D. Movement and Behavior Tracking Tools, Spatial Computing and Visual Perception Algorithms, and Deep Learning-based Sensing and Digital Twin Technologies in the Virtual Economy of the Metaverse. **Linguistic and Philosophical Investigations**, v. 22, n. 2022, p. 162–178, 2023.

DA SILVA NETO, O. M.; RUDEK, M. **Industrial Layout Mapping by Human-Centered Approach and Computer Vision BT - Product Lifecycle Management. Leveraging Digital Twins, Circular Economy, and Knowledge Management for Sustainable Innovation**. (C. Danjou et al., Eds.) Cham: Springer Nature Switzerland, 2024.

DOLGUI, A.; IVANOV, D. Internet of behaviors: conceptual model, practical and theoretical implications for supply chain and operations management. **International Journal of Production Research**, 2024.

FAN, C. et al. Disaster City Digital Twin: A vision for integrating artificial and human intelligence for disaster management. **International Journal of Information Management**, v. 56, n. December 2019, p. 102049, 2021.

GOURISETTI, S. N. G. et al. A Theoretical Open Architecture Framework and Technology Stack for Digital Twins in Energy Sector Applications. **Energies**, v. 16, n. 13, 2023.

GUO, J. et al. An enhanced state-aware model learning approach for security analysis in lightweight protocol implementations. **Journal of Cloud Computing**, v. 13, n. 1, 2024.

HAGEN, A.; ANDERSEN, T. M. Asset management, condition monitoring and Digital Twins: damage detection and virtual inspection on a reinforced concrete bridge. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 20, n. 7–8, p. 1242–1273, 2024.

HASAN, H. R. et al. Non-fungible tokens (NFTs) for digital twins in the industrial metaverse: Overview, use cases, and open challenges. **Computers and Industrial Engineering**, v. 193, n. July 2023, 2024.

HUANG, J.; YI, J. The key security management scheme of cloud storage based on blockchain and digital twins. **Journal of Cloud Computing**, v. 13, n. 1, 2024.

JAVED, A. et al. The role of advanced technologies and supply chain collaboration: during COVID-19 on sustainable supply chain performance. **Discover Sustainability**, v. 5, n. 1, 2024.

KANG, H. S.; LEE, J. Y. Toward cyber-physical systems for monitoring and analyzing energy consumption of machine tools. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 00, n. 00, p. 1–22, 2024.

KULKARNI, C. et al. Hybrid disease prediction approach leveraging digital twin and SODEBRAS, v. 20 – n. 223 – janeiro/abril - 2025. ISSN 1809-3957

metaverse technologies for health consumer. **BMC Medical Informatics and Decision Making**, v. 24, n. 1, p. 1–14, 2024.

LEE, J.; PARK, T.; SUNG, W. Digital twin based DDPG reinforcement learning for sum-rate maximization of AI-UAV communications. **Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2024, n. 1, 2024.

LUO, Z. et al. Achromatic diffractive liquid-crystal optics for VR displays. v. 12913, p. 6, 2024.

LV, Z. et al. BlockNet: Beyond reliable spatial Digital Twins to Parallel Metaverse. **Patterns**, v. 3, n. 5, p. 100468, 2022a.

LV, Z. et al. BlockNet: Beyond reliable spatial Digital Twins to Parallel Metaverse. **Patterns**, v. 3, n. 5, p. 10–11, 2022b.

MARTÍNEZ-GUTIÉRREZ, A. et al. Towards industry 5.0 through metaverse. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 89, n. February, p. 102764, 2024.

MIAO, Z.; LI, W.; PAN, X. Multivariate time series collaborative compression for monitoring systems in securing cloud-based digital twin. **Journal of Cloud Computing**, v. 13, n. 1, 2024.

MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **PLoS medicine**, v. 6, n. 7, p. e1000097, jul. 2009.

PAN, X. et al. Deep learning based approaches from semantic point clouds to semantic BIM models for heritage digital twin. **Heritage Science**, v. 12, n. 1, p. 1–17, 2024.

PATTERSON, E. A. Engineering design and the impact of digital technology from computer-aided engineering to industrial metaverses: A perspective. **Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 59, n. 4, p. 303–305, 2024.

PENA-RIOS, A.; WU, J. G. Guest Editorial The Metaverse and the Future of Education. **IEEE Transactions on Learning Technologies**, v. 16, n. 6, p. 887–891, 2023.

PODÉUS, H. et al. A physiologically-based digital twin for alcohol consumption—predicting real-life drinking responses and long-term plasma PEth. **npj Digital Medicine**, v. 7, n. 1, 2024.

QU, Y.; ZHAO, N.; ZHANG, H. Digital Twin Technology of Human–Machine Integration in Cross-Belt Sorting System. **Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)**, v. 37, n. 1, 2024.

ROULLIER, B. et al. Automated visual quality assessment for virtual and augmented reality based digital twins. **Journal of Cloud Computing**, v. 13, n. 1, 2024.

SABATUCCI, L. et al. Envisioning Digital Practices in the Metaverse: A Methodological Perspective †. **Future Internet**, v. 15, n. 12, p. 1–19, 2023.

STAFFS, K. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. **Technical report, Ver. 2.3 EBSE Technical Report. EBSE**, n. January

2007, p. 1–57, 2007.

STATES, U.; CITY, C.; STATES, U. Jewell, S. p. 1–2, 2024.

SURIAN, N. U. et al. A digital twin model incorporating generalized metabolic fluxes to identify and predict chronic kidney disease in type 2 diabetes mellitus. **npj Digital Medicine**, v. 7, n. 1, 2024.

TU, X. et al. Architecture for data-centric and semantic-enhanced industrial metaverse: Bridging physical factories and virtual landscape. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 74, n. February, p. 965–979, 2024.

VALANDRO, R.; NOGUEIRA, J. C.; RUDEK, M. **A Method to Interactive Simulations of Industrial Environments Based on Immersive Technologies BT - Product Lifecycle Management. Leveraging Digital Twins, Circular Economy, and Knowledge Management for Sustainable Innovation.** (C. Danjou et al., Eds.) Cham: Springer Nature Switzerland, 2024.

WALLACE, S. Digital Twin and Metaverse Technologies, Geospatial Simulation and Sensor Fusion Tools, and Object Perception and Motion Control Algorithms in Immersive Hyper-Connected Virtual Spaces. **Linguistic and Philosophical Investigations**, v. 22, n. 2022, p. 264–280, 2023.

XIANG, W. et al. Advanced Manufacturing in Industry 5.0: A Survey of Key Enabling Technologies and Future Trends. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 20, n. 2, p. 1055–1068, 2024.

YAO, X. et al. Enhancing wisdom manufacturing as industrial metaverse for industry and society 5.0. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 35, n. 1, p. 235–255, 2024.

ZHANG, X. et al. Designing the transition to operations in large inter-organizational projects: Strategy, structure, process, and people. **Journal of Operations Management**, v. 70, n. 1, p. 107–136, 2024.

VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluso no artigo.