

DIGITAL TWINS NA CADEIA DE SUPRIMENTOS: SUA APLICAÇÃO E DESAFIO NA IMPLEMENTAÇÃO

DIGITAL TWINS IN THE SUPPLY CHAIN: THEIR APPLICATION AND IMPLEMENTATION CHALLENGES

Genildo Freitas Prado

genildofreitas0@gmail.com

Luany K. Figueiroa Alves

luafig7@gmail.com

Saulo Medeiros

saulo.medeiros@ppaulista.ifpe.edu.br

RESUMO

Com o avanço da Indústria 4.0 e a expansão da Internet das Coisas (IoT), cresce a necessidade de processos decisórios mais eficientes, precisos e de menor custo operacional. Nesse contexto, os Digital Twins (Gêmeos Digitais) vêm se consolidando como uma tecnologia estratégica ao integrar dados do ambiente físico e digital, permitindo simulações, previsões e análises em tempo real. Apesar de seu potencial, a adoção dessa tecnologia ainda enfrenta barreiras relevantes, especialmente relacionadas a custos, infraestrutura e maturidade digital das organizações. Este estudo discute o conceito de Digital Twins e suas aplicações na cadeia de suprimentos, destacando benefícios como visibilidade operacional e suporte avançado à tomada de decisão, bem como os principais desafios que dificultam sua implementação. A pesquisa possui natureza teórica, com abordagem qualitativa e caráter exploratório, desenvolvida por meio de levantamento bibliográfico estruturado por palavras-chave em bases acadêmicas. Conclui-se que, embora os Digital Twins apresentem elevado potencial para transformar a gestão da cadeia de suprimentos, sua adoção depende de investimentos estruturais e do desenvolvimento de competências tecnológicas.

PALAVRAS-CHAVE: digital twins; cadeia de suprimentos; indústria 4.0; logística 4.0.

ABSTRACT

With the advancement of Industry 4.0 and the growing use of the Internet of Things (IoT), the demand for more efficient, precise, and cost-effective decision-making has intensified. In this scenario, Digital Twins have emerged as a strategic technology by integrating physical and digital data, enabling real-time simulations, predictions, and operational analysis. Despite their potential, the adoption of this technology still faces significant barriers, particularly related to costs, infrastructure, and the digital maturity of organizations. This study discusses the concept of Digital Twins and examines their applications in the supply chain, highlighting benefits such as operational visibility and enhanced decision support, as well as the main challenges that hinder their implementation. The research is theoretical in nature, employs a qualitative exploratory approach, and was conducted through a structured literature review using keyword-based searches in academic databases. The findings indicate that, although Digital Twins have strong potential to transform supply chain management, their adoption requires structural investments and the development of technological capabilities.

Keywords: digital twins. supply chain. industry 4.0. logistics 4.0.

1. INTRODUÇÃO

A Quarta Revolução Industrial — também chamada de Indústria 4.0 — tem transformado profundamente a forma como as organizações estruturam seus processos produtivos e logísticos. Entre as tecnologias emergentes desse contexto, destaca-se o conceito de Digital Twins (Gêmeos Digitais), que consiste na criação de réplicas virtuais de ativos físicos capazes de simular comportamentos, prever falhas e representar o desempenho real em tempo quase instantâneo (Grieves, 2014). O idealizador do conceito argumenta que os Digital Twins evoluíram a partir de

modelos tradicionais e passaram a integrar dados ao longo de todo o ciclo de vida do produto, oferecendo visibilidade contínua e atualizada de seu funcionamento.

Com os avanços em conectividade, sensores inteligentes e computação em nuvem, os Gêmeos Digitais tornaram-se ferramentas estratégicas para a tomada de decisão em ambientes dinâmicos. Para Crespi, Drobt e Minerva (2023), o Digital Twin representa “uma entidade digital viva, que se molda e se adapta a partir de fluxos contínuos de sensores, eventos e contexto”, permitindo análises preditivas e respostas ágeis a mudanças operacionais. Essa capacidade é especialmente relevante na cadeia de suprimentos, onde incertezas, complexidade e variabilidade exigem previsibilidade e assertividade.

As bases tecnológicas que permitiram o surgimento dos Digital Twins estão relacionadas à evolução dos sistemas de controle industrial. Segovia e Theorin (2012) destacam que o desenvolvimento dos PLCs (Controladores Lógicos Programáveis) e dos DCSs (Sistemas de Controle Distribuído) foi fundamental para viabilizar automação, coleta de dados em tempo real e monitoramento descentralizado. Esse percurso marcou a transição de uma automação focada apenas na eficiência operacional para uma abordagem inteligente, orientada à previsão e ao suporte avançado à decisão.

No âmbito da cadeia de suprimentos, o uso de Digital Twins possibilita benefícios como maior visibilidade operacional, rastreabilidade, simulação de cenários complexos e detecção antecipada de falhas. Entretanto, sua implementação ainda enfrenta obstáculos expressivos. Segundo Quinalha (2018), apesar de avanços pontuais no Brasil, a adoção da tecnologia é limitada por altos custos, infraestrutura tecnológica insuficiente, escassez de mão de obra qualificada e resistência cultural à inovação.

Os Digital Twins já são amplamente empregados em setores como manufatura, energia, saúde e infraestrutura (Grieves, 2002; Vickers, 2010). Contudo, na cadeia de suprimentos sua aplicação ainda é pouco explorada, sobretudo pela complexidade do setor, pela fragmentação dos processos e pela dificuldade de integração entre sistemas heterogêneos. Mesmo com o uso consolidado em áreas

como manufatura e energia, o emprego de Digital Twins na cadeia de suprimentos permanece limitado, sendo considerado um campo em desenvolvimento que exige maior investimento, integração sistêmica e maturidade digital.

Além desses elementos, desafios como o elevado custo inicial e a dificuldade em mensurar o retorno sobre o investimento tornam a adoção menos atrativa no curto prazo (Grieves, 2002). Ainda assim, os Digital Twins apresentam potencial significativo para transformar o setor, especialmente no aprimoramento da visibilidade dos fluxos logísticos, na simulação de cenários complexos e na mitigação de riscos operacionais.

Diante desse panorama, o presente trabalho tem como objetivo investigar de que modo essa tecnologia pode contribuir para a competitividade logística e quais barreiras precisam ser superadas para ampliar sua adoção. A pesquisa será desenvolvida por meio de revisão de literatura técnica e acadêmica, complementada pela análise de estudos de caso relevantes ao contexto industrial brasileiro.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A Quarta Revolução Industrial, conhecida como Indústria 4.0, tem transformado profundamente os processos produtivos e logísticos ao integrar tecnologias digitais avançadas aos ambientes organizacionais. Nesse contexto, os Digital Twins (Gêmeos Digitais) destacam-se como uma das inovações mais relevantes, ao permitir a replicação virtual de ativos físicos e a simulação de seu comportamento em tempo real (Grieves, 2014). De acordo com o idealizador do conceito, os Digital Twins emergiram como uma evolução dos sistemas tradicionais de modelagem, estruturados ao longo do ciclo de vida do produto e orientados à obtenção de uma visão contínua do desempenho físico de equipamentos e processos.

A consolidação dessa tecnologia foi impulsionada por avanços em conectividade, sensores, Internet das Coisas (IoT) e computação em nuvem, permitindo a criação de modelos digitais dinâmicos e responsivos. Nesse sentido, Crespi, Drobt e Minerva (2023) definem o Digital Twin como uma representação digital viva de um sistema real, capaz de evoluir a partir de dados contínuos provenientes de sensores, eventos e contexto. Essa característica torna sua aplicação especialmente relevante

para a cadeia de suprimentos, que exige previsibilidade, agilidade e suporte avançado à tomada de decisão.

O desenvolvimento dos Digital Twins possui raízes nos sistemas industriais de controle e automação. Segovia e Theorin (2012) destacam que a evolução dos Controladores Lógicos Programáveis (PLCs) e dos Sistemas de Controle Distribuído (DCSs) possibilitou a coleta de dados em tempo real e o controle descentralizado, pavimentando o caminho para arquiteturas digitais mais complexas e inteligentes. Essa transição representou uma mudança de paradigma: de uma automação voltada apenas para eficiência operacional para uma automação orientada à predição, adaptação e autonomia.

A incorporação do Digital Twins na cadeia de suprimentos ainda é incipiente. Essa limitação decorre de fatores como a fragmentação estrutural da cadeia, a baixa integração entre sistemas, a reduzida maturidade digital de muitas organizações e a escassez de profissionais especializados. Além disso, o alto custo de implementação e a dificuldade de mensurar o retorno sobre o investimento tornam sua adoção menos atrativa no curto prazo (Quinalha, 2018).

Apesar dessas barreiras, os Digital Twins apresentam elevado potencial para transformar a gestão da cadeia de suprimentos ao ampliar a visibilidade operacional, permitir simulações de cenários complexos e fortalecer a resposta a riscos logísticos. Essa lacuna entre potencial e adoção efetiva sustenta a relevância deste estudo.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo analisar as aplicações e os desafios da implementação de Digital Twins na cadeia de suprimentos, buscando compreender de que forma essa tecnologia pode contribuir para a competitividade logística e quais barreiras estruturais precisam ser superadas para sua adoção em larga escala. A pesquisa fundamenta-se em revisão de literatura técnica e acadêmica, complementada pela análise de estudos de caso alinhados ao contexto industrial brasileiro.

2.1 RAMI 4.0

O Modelo Arquitetônico de Referência para Indústria 4.0 (RAMI 4.0) constitui um dos frameworks mais utilizados para orientar a implementação de tecnologias digitais no ambiente industrial. Embora tenha sido inicialmente desenvolvido para setores manufatureiros, sua estrutura tem sido adaptada para aplicações em Gêmeos Digitais na área de logística e cadeia de suprimentos (Le; Fan, 2023). O modelo apresenta uma representação tridimensional que integra a perspectiva hierárquica dos sistemas produtivos, a arquitetura funcional das camadas tecnológicas e o ciclo de vida dos ativos.

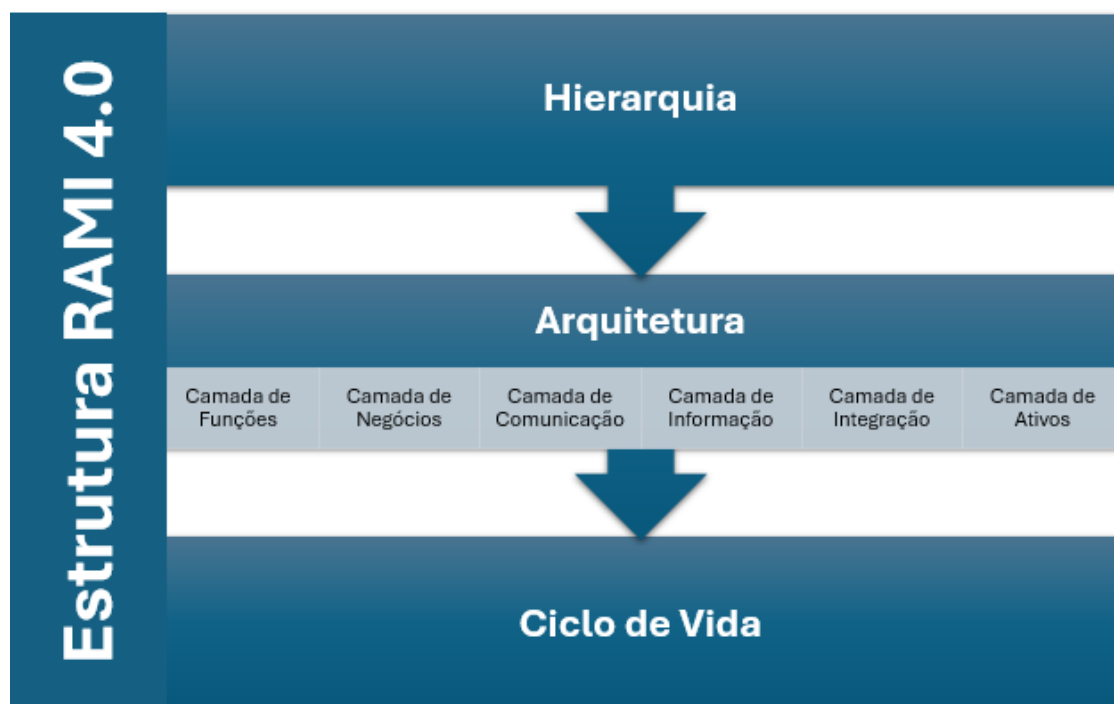
Segundo Mendonça et al. (2022), o RAMI 4.0 cumpre os requisitos essenciais da Indústria 4.0 ao promover a integração vertical e horizontal dos sistemas, ampliando a visibilidade dos processos e oferecendo uma forma padronizada de interpretar as tecnologias envolvidas. Sua estrutura é dividida em três dimensões principais:

I) Hierarquia, que representa os diferentes níveis funcionais da cadeia de valor e suas interconexões;

II) Arquitetura, composta por seis camadas — ativo, integração, comunicação, informação, funcional e de negócios — que organizam os fluxos de dados e serviços;

III) Ciclo de vida, que abrange todas as fases do produto ou processo, desde o planejamento até a operação e a desativação (Mendonça et al., 2022; Câmara, 2023).

Figura 1 - Estrutura RAMI 4.0



Fonte: Câmara, Fernando José Gonçalves Osório Bianchi da, 2023 - A Digitalização e a Descentralização da Produção na Indústria 4.0 - Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2023.

A partir dessa estrutura, cada camada possui um papel específico. A camada **Ativo** refere-se aos elementos físicos que geram os dados; a camada **Integração** conecta esses ativos ao ambiente digital; a camada **Serviço** processa e disponibiliza as funções necessárias para interpretar os dados do sistema real; e a camada **Gestão** orienta a tomada de decisão com base em princípios de melhoria contínua e otimização de recursos (Mendonça et al., 2022; Câmara, 2023).

A principal contribuição do RAMI 4.0 para a estruturação de Gêmeos Digitais está na padronização da linguagem e dos protocolos de comunicação, requisito essencial para viabilizar a interoperabilidade entre sistemas heterogêneos. Como os Gêmeos Digitais dependem de uma troca contínua e integrada de informações entre o mundo físico e o digital, o modelo oferece uma base sólida para alinhar diferentes tecnologias e garantir a consistência dos fluxos de dados (Mendonça et al., 2022).

2.2 DIGITAL TWINS

O surgimento do conceito de Digital Twin é frequentemente associado às fases iniciais da exploração espacial, especialmente ao programa Apollo, desenvolvido pela NASA na década de 1960. Nesse contexto, eram construídas duas naves idênticas: uma destinada ao voo e outra mantida em solo para simulações, possibilitando o diagnóstico remoto e a resolução de falhas durante as missões (Grieves, 2016). Embora essa prática represente um precursor do modelo contemporâneo, foi Michael Grieves quem, em 2002, formalizou conceitualmente o “Modelo de Gêmeo Digital”, estruturando-o a partir de três elementos fundamentais: o espaço físico, o espaço virtual e o fluxo de dados que estabelece a interação entre ambos (Grieves; Vickers, 2017). Essa formulação contribuiu para consolidar o Digital Twin como uma tecnologia habilitadora da Indústria 4.0, definida como “uma representação digital de um objeto ou sistema físico atualizada por meio de trocas de dados em tempo real” (Grieves, 2016, p. 1).

Figura 2 – Estrutura DT segundo a arquitetura RAMI 4.0



Fonte: Tho V. Le and Ruoling Fan, 2023 - Digital Twins for Logistics and Supply Chain Systems: Literature Review, Conceptual Framework, Research Potential, and Practical Challenges - School of Engineering Technology, Purdue University, West Lafayette, IN 47907, USA.

Conforme apresentado na Figura 2, Le e Fan (2023) estruturam o Digital Twin a partir de três dimensões principais: **Camada, Nível de Hierarquia e Ciclo de Vida e Fluxo de Valor**. A dimensão **Camada** é composta por três nichos — Físico, Comunicação e Digital — que se desdobram em seis componentes correlacionados: ativo, integração, comunicação, informação, funcional e negócios. No nicho **Físico**, localizam-se os componentes *Ativo*, que representam os equipamentos e elementos reais do sistema, e *Integração*, responsável pela transferência dos dados para o ambiente digital. O nicho **Comunicação** abrange os componentes Integração, Comunicação e Informação, funcionando como elo entre os ambientes físico e digital ao conduzir e tratar os dados provenientes dos processos. Por fim, o nicho **Digital** engloba os componentes funcionais, onde as informações são processadas para melhoria contínua, e Negócios, que integra os serviços e processos da cadeia logística em sua dimensão digital.

A dimensão **Nível de Hierarquia** fornece uma visão estratificada da operação, permitindo relacionar atividades específicas às diferentes camadas do modelo, facilitando assim o processo de tomada de decisão (Le; Fan, 2023). Já a dimensão **Ciclo de Vida e Fluxo de Valor** abrange todas as etapas do processo, desde a concepção até o encerramento, buscando a maximização do valor agregado ao produto ou serviço final (Le; Fan, 2023).

Diante do exposto, observa-se que tanto o RAMI 4.0 quanto o Digital Twin configuram elementos centrais na transformação digital dos sistemas logísticos e das cadeias de suprimentos. A convergência entre essas duas abordagens fortalece a modelagem, o monitoramento e a simulação de operações, ao mesmo tempo em que amplia a capacidade analítica e a tomada de decisão em tempo real (Tao et al., 2019; Kritzinger et al., 2018; Lu, 2017). A integração entre níveis hierárquicos, camadas funcionais e ciclo de vida, conforme estruturado nessas arquiteturas, evidencia um novo paradigma operacional mais inteligente, responsivo e eficiente (Mendonça et al., 2022; Câmara, 2023; Le; Fan, 2023).
Compreender essas

estruturas é, portanto, essencial para o avanço das propostas de aplicação prática no contexto logístico, tema que será aprofundado nas seções seguintes.

2.3 SUPPLY CHAIN

A Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, tem promovido transformações profundas nos sistemas produtivos e logísticos ao incorporar tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Big Data, Inteligência Artificial (IA), computação em nuvem e Gêmeos Digitais (Digital Twins). Esse novo paradigma ultrapassa o ambiente fabril e alcança toda a cadeia de suprimentos, conferindo-lhe maior conectividade, automação e capacidade analítica. A integração entre sistemas ciberfísicos e infraestruturas digitais permite que sensores monitorem em tempo real o desempenho de máquinas, veículos e centros de distribuição, viabilizando decisões mais precisas sobre reposição, demanda e distribuição (Lu, 2017).

Exemplos dessa transformação incluem o uso de blockchain para rastreabilidade de alimentos, garantindo segurança e transparência (Ibm, 2019); a adoção de robôs autônomos em armazéns inteligentes; e a aplicação de Gêmeos Digitais para simular processos logísticos, reduzindo riscos operacionais antes da execução física (Grieves, 2014). Em portos inteligentes, sensores conectados à nuvem têm sido utilizados para agilizar operações de atracação e liberação de cargas, diminuindo gargalos logísticos (Silva; Oliveira, 2018). No varejo, plataformas integradas sustentadas por análise preditiva permitem alinhar estoques entre canais físicos e digitais, assegurando maior eficiência no atendimento ao consumidor (Mendonça et al., 2022). A interoperabilidade requerida por esses ambientes é viabilizada por arquiteturas como o RAMI 4.0, que proporciona integração vertical e horizontal entre sistemas produtivos e logísticos (Kagermann; Wahlster; Helbig, 2013).

Nesse contexto, os Gêmeos Digitais se destacam como uma das tecnologias mais estratégicas da Supply Chain 4.0. Sua capacidade de representar virtualmente o passado, o presente e projeções futuras dos processos logísticos permite monitoramento contínuo, análise avançada e geração de insights em tempo real. A modelagem virtual possibilita dois níveis de aplicação: o nível parcial, direcionado a segmentos específicos da cadeia — como sensores ambientais ou veículos

autônomos —, e o nível sistêmico, no qual o Digital Twin representa todo o fluxo logístico. Neste último, é possível prever demandas, definir rotas ótimas e priorizar cargas conforme destinos e restrições operacionais, contribuindo para decisões mais assertivas e operações mais eficientes.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste Trabalho de Conclusão de Curso possui natureza qualitativa, com caráter exploratório e abordagem teórica, sendo estruturada a partir de uma revisão bibliográfica sistemática. O objetivo dessa estratégia metodológica é analisar o conhecimento disponível sobre a aplicação de Digital Twins na cadeia de suprimentos, bem como os desafios associados à sua implementação.

A revisão bibliográfica foi realizada por meio de buscas estruturadas em bases acadêmicas nacionais e internacionais, tais como Google Scholar, Scielo, ScienceDirect, IEEE Xplore e SpringerLink, utilizando palavras-chave relacionadas ao tema, como: “digital twins”, “supply chain 4.0”, “logística 4.0”, “indústria 4.0”, “RAMI 4.0”, “tecnologias habilitadoras”, “implementação de gêmeos digitais” e “desafios tecnológicos”. Os critérios de seleção incluíram:

- a) atualidade das publicações (com foco em trabalhos produzidos a partir de 2010, sem excluir autores clássicos essenciais);
- b) pertinência ao contexto dos Digital Twins aplicados à logística e cadeia de suprimentos.

A leitura e análise do material permitiram identificar conceitos, aplicações práticas, lacunas de pesquisa e barreiras de adoção da tecnologia. A escolha dessa metodologia justifica-se pela necessidade de consolidar conhecimento existente sobre um tema emergente e em rápida evolução, permitindo construir uma base teórica sólida para análises posteriores e para a compreensão crítica das evidências apresentadas na literatura.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DEFINIÇÃO E IMPORTÂNCIA NA PRÁTICA PARA A APLICAÇÃO

A cadeia de suprimentos pode ser entendida como uma rede integrada responsável pelo fluxo coordenado de materiais, informações, serviços e recursos financeiros, abrangendo todas as etapas que se estendem desde os fornecedores iniciais até o consumidor final. Segundo Chopra e Meindl (2011), essa rede inclui todos os agentes envolvidos, direta ou indiretamente, no atendimento ao cliente, como fabricantes, distribuidores, transportadoras, armazéns, varejistas e os próprios consumidores. O principal objetivo da gestão da cadeia de suprimentos consiste em assegurar que os pedidos sejam atendidos corretamente, no prazo estabelecido, na quantidade requerida, com a qualidade esperada e de forma economicamente viável.

Para Ballou (2006), a eficácia da gestão da cadeia de suprimentos depende da sincronização entre os fluxos de produtos, informações e recursos financeiros, de modo a maximizar o nível de serviço ao cliente enquanto se reduz o custo total do sistema. Nesse contexto, as empresas buscam aprimorar continuamente cada etapa da cadeia — produção, armazenagem, transporte e distribuição — por meio da incorporação de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e sistemas de rastreamento em tempo real. Christopher (2016) destaca que a visibilidade e a integração tecnológica são fatores essenciais para o desenvolvimento de cadeias mais responsivas, resilientes e competitivas em ambientes globais.

A colaboração entre os diferentes elos também se apresenta como elemento central da competitividade logística. Conforme Bowersox, Closs e Cooper (2009), a coordenação entre fornecedores, operadores logísticos e clientes contribui para a redução de ineficiências, a melhoria do desempenho operacional e a criação de valor para o consumidor final. Assim, a cadeia de suprimentos deixa de ser apenas um conjunto de atividades operacionais e passa a atuar como um sistema estratégico integrado.

4.2. COMPONENTES DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

A cadeia de suprimentos representa as conexões entre organizações e atividades envolvidas na criação de valor na forma de produtos e serviços para clientes. Inicia-se com as necessidades dos clientes e, posteriormente, as informações são transmitidas através dos elos para a frente da cadeia. Em seguida, os fornecedores da matéria-prima vendem ao transformador ou produtor para que ele inicie a criação do produto que será vendido ao cliente final. Conforme Martins e Alt (2017), para que todo esse processo ocorra de maneira correta, é necessário integrar fornecedores e clientes. Segundo Bowersox et al. (2011), pela crescente complexidade das operações e a necessidade de aumentar a eficiência, é recomendada a colaboração de empresas, instituições e departamentos de diferentes países para implementação da cadeia efetiva de suprimentos. Segundo Christopher (2016), o objetivo da cadeia de suprimentos é desenvolver um sistema que reduza o custo geral de distribuição e aumente o nível de serviço ao consumidor da forma mais eficiente possível. Para que a cadeia esteja preparada para a mudança, a estrutura, o controle e a logística devem admitir diferentes estratégias de gestão que garantam a prestação de serviços de qualidade e baixos custos, mesmo com inesperadas mudanças. Essa dinâmica dos mercados, tanto interna quanto externamente, faz com que a gestão da cadeia de suprimentos precise ser preparada para que produtos que precisam de reposição urgente cheguem, mesmo que desacompanhados de pedidos ou com pedido tardio ou incompleto. Quanto maior a rapidez para repor produtos, maior é a satisfação dos clientes.

4.3. APLICAÇÕES DOS GÊMEOS DIGITAIS NA CADEIA DE SUPRIMENTOS

A cadeia de suprimentos representa o conjunto de organizações, processos e atividades interligadas que atuam de forma coordenada para gerar valor ao cliente final por meio da entrega de produtos e serviços. O processo inicia-se a partir das necessidades dos consumidores, cujas informações são transmitidas ao longo dos diversos elos da cadeia, orientando a produção e o fornecimento de insumos. Nesse fluxo, os fornecedores de matéria-prima abastecem os produtores ou transformadores, que por sua vez realizam as etapas necessárias para que o produto alcance o mercado consumidor.

Segundo Martins e Alt (2017), a integração entre fornecedores e clientes é essencial para assegurar que esse fluxo ocorra de maneira eficiente e coerente com a demanda. Bowersox et al. (2011) reforçam que, diante da crescente complexidade das operações e da necessidade de maior eficiência, torna-se indispensável a colaboração entre empresas, instituições e diferentes setores, inclusive em nível internacional. De acordo com Christopher (2016), a gestão da cadeia de suprimentos deve buscar a redução do custo total de distribuição simultaneamente ao aumento do nível de serviço ao consumidor, garantindo eficiência operacional mesmo em contextos de mudanças imprevistas.

Para que a cadeia seja capaz de responder rapidamente às variações do mercado, sua estrutura e seus mecanismos de controle devem comportar diferentes estratégias de gestão que permitam a reposição ágil de produtos e a manutenção da disponibilidade nos pontos de consumo. Uma logística responsiva, portanto, contribui diretamente para a satisfação do cliente, ao assegurar que as demandas sejam atendidas de forma tempestiva e eficiente.

4.3.1. SIMULAÇÃO E MODELAGEM

Na maioria dos casos, os Gêmeos Digitais (GDs) são modelados a partir da simulação do sistema físico, utilizando-se técnicas de Modelagem e Simulação (M&S) como uma solução para representar o sistema físico em uma escala reduzida. Sendo assim, um GD pode ser definido como uma representação virtual que reflete o comportamento do sistema físico utilizando-se de modelos de simulação, geralmente baseados em eventos discretos. Segundo Negri, Fumagalli e Macchi (2017), a simulação de eventos discretos é uma técnica fundamental, pois "permite analisar o desempenho do sistema sob diferentes condições operacionais" (Negri; Fumagalli; Macchi, 2017, p. 5). A utilização de M&S para a modelagem do GD possibilita uma representação mais precisa e confiável do sistema físico, uma vez que utiliza dados reais para a modelagem do comportamento do sistema, possibilitando a realização de experimentos virtuais antes da implementação de mudanças.

As operações da Cadeia de Suprimentos são inerentemente complexas e inter-relacionadas, requerendo um esforço coordenado para um eficiente gerenciamento. A possibilidade de realização de experimentos virtuais com baixo custo e que não requerem a interrupção da operação torna a utilização de GDs, com base em M&S, uma alternativa válida e um suporte ao processo decisório. Nesse contexto, Grieves e Vickers (2017) afirmam que um dos principais benefícios é a capacidade de "explorar questões 'e se' sem o risco, o custo e o tempo de fazer essas explorações no mundo físico" (Grieves; Vickers, 2017, p. 90). Além destes, a possibilidade de representar virtualmente diferentes cenários antes da implementação física possibilita a escolha de um cenário que traga melhores resultados para as organizações que operam na cadeia, otimizando assim o seu desempenho global.

4.3.2. OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS

Na maioria dos casos, os Gêmeos Digitais (GDs) são desenvolvidos a partir da simulação de seus correspondentes físicos, utilizando técnicas de Modelagem e Simulação (M&S) que permitem representar, de forma abstrata e controlada, o comportamento do sistema real. Dessa forma, um GD pode ser compreendido como uma representação virtual capaz de reproduzir o desempenho do sistema físico por meio de modelos de simulação, frequentemente baseados em eventos discretos. Conforme Negri, Fumagalli e Macchi (2017), a simulação de eventos discretos desempenha papel central nesse processo, pois “permite analisar o desempenho do sistema sob diferentes condições operacionais” (Negri, Fumagalli e Macchi, 2017, p. 5).

O uso de M&S possibilita a construção de modelos mais precisos e confiáveis, alimentados por dados reais, o que viabiliza a realização de experimentos virtuais antes da implementação de mudanças no ambiente físico. Essa abordagem é particularmente relevante para as operações da cadeia de suprimentos, caracterizadas por elevada complexidade e interdependência entre processos. A possibilidade de executar experimentos com baixo custo e sem interrupção da operação faz dos GDs um instrumento valioso de apoio à tomada de decisão. Nesse contexto, Grieves e Vickers (2017) destacam que uma das principais contribuições

dessa tecnologia é a capacidade de “explorar questões ‘e se’ sem o risco, o custo e o tempo de fazer essas explorações no mundo físico” (Grieves; Vickers, 2017, p. 90). Assim, ao permitir a simulação de múltiplos cenários e a avaliação antecipada de alternativas, o GD favorece a escolha de soluções mais eficientes e contribui para a otimização global do desempenho da cadeia de suprimentos.

4.3.3. MONITORAMENTO EM TEMPO REAL

A capacidade de monitoramento em tempo real constitui um dos principais atributos dos Gêmeos Digitais (GDs), pois possibilita não apenas aprimorar a operação de produtos e serviços, mas também estabelecer um ciclo contínuo de retroalimentação entre os ambientes físico e virtual. Por meio de sensores baseados em Internet das Coisas (IoT), grandes volumes de dados são coletados e transmitidos continuamente ao modelo digital, permitindo que o estado do GD seja atualizado de forma sincronizada com as alterações do sistema físico. Esse processo cria um “fluxo de dados bidirecional que permite que o estado do gêmeo virtual seja sempre consistente com o estado de seu correspondente físico” (Grieves; Vickers, 2017, p. 89). A análise desses dados é viabilizada pelo uso de tecnologias de Big Data, que transformam informações brutas em conhecimento útil para apoiar decisões operacionais.

A utilização de monitoramento em tempo real já se evidencia em empresas de tecnologia como Amazon e Netflix, cujos sistemas de recomendação ilustram como “a análise de dados em tempo real pode ser usada para adaptar sistemas e melhorar a experiência do cliente” (Mehrabi et al., 2021, p. 15). No entanto, apesar de tais avanços, o mercado brasileiro ainda enfrenta limitações significativas para a adoção plena dessa abordagem. A infraestrutura de comunicação apresenta restrições importantes, visto que “a largura de banda disponível e a latência da rede podem ser insuficientes para aplicações críticas de Gêmeos Digitais” (Fuller et al., 2020, p. 108962). Além disso, desafios de ordem organizacional e normativa dificultam a maturidade do processo. Muitas empresas ainda não dispõem de uma cultura orientada por dados, e o cumprimento das exigências legais — especialmente aquelas impostas pela Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) — requer altos níveis de governança e segurança da informação (Doneda; Mendes,

2021). Esses fatores, em conjunto, tornam o avanço dos GDs em tempo real no Brasil um processo gradual e dependente de investimentos estruturais.

4.4. DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO NO MERCADO BRASILEIRO

A adoção dos Gêmeos Digitais no mercado brasileiro enfrenta desafios multidimensionais que envolvem aspectos tecnológicos, organizacionais e regulatórios. No âmbito tecnológico, a infraestrutura de telecomunicações constitui um dos principais entraves, uma vez que a transmissão de dados em tempo real e com alta fidelidade é essencial para o funcionamento adequado dessa tecnologia. O país ainda apresenta limitações significativas nesse sentido, dado que “a infraestrutura de conectividade, essencial para suportar o fluxo massivo de dados dos sensores para a nuvem, ainda é desigual e insuficiente em diversas regiões do país” (Anatel, 2022, p. 15).

A implementação plena do 5G, embora reconhecida como um importante catalisador para aplicações de baixa latência, avança de forma lenta devido a controvérsias sociotécnicas relacionadas à instalação de antenas e à adequação das áreas urbanas. Paralelamente, a capacidade computacional necessária para processar grandes volumes de dados em tempo real representa outro obstáculo. O país carece de data centers distribuídos que possibilitem o uso eficiente de processamento de borda (edge computing), recurso indispensável para mitigar a latência que compromete a sincronia entre o gêmeo digital e seu correspondente físico (Fuller et al., 2020).

No campo regulatório, o cenário também se apresenta complexo. A integração de sistemas digitais depende de políticas públicas consistentes e investimentos contínuos em infraestrutura, especialmente no que diz respeito à interoperabilidade entre setores e modais logísticos. Além disso, o cumprimento das exigências legais relacionadas à proteção e ao tratamento de dados impõe desafios adicionais às organizações. Nesse contexto, “superar as barreiras regulatórias e investir em infraestrutura de dados que assegure a interoperabilidade e a segurança da informação” é condição essencial para o avanço dos Gêmeos Digitais no Brasil (Doneda; Mendes, 2021, p. 103). Tais fatores tornam a consolidação dessa

tecnologia um processo gradual em um país de grande extensão territorial e alta heterogeneidade socioeconômica.

4.4.1. INFRAESTRUTURA TECNOLÓGICA

O Brasil, como país em desenvolvimento com mercado em expansão, ainda apresenta disparidades significativas em sua infraestrutura, especialmente nas regiões mais afastadas dos grandes centros, o que impacta diretamente a competitividade das empresas e seus custos operacionais. Embora as infraestruturas de telecomunicações e de Tecnologia da Informação (TI) tenham evoluído nos últimos anos, elas continuam exercendo papel central na implementação de tecnologias digitais habilitadoras, como Internet das Coisas (IoT) e Big Data. Persistem, contudo, lacunas relevantes, uma vez que “a cobertura e a qualidade dos serviços de banda larga no Brasil ainda são heterogêneas, com marcantes diferenças regionais que excluem parcelas da população e do setor produtivo do acesso a tecnologias digitais modernas” (César et al., 2021, p. 45). Essa limitação é especialmente crítica em áreas remotas, restringindo a aplicabilidade operacional dessas tecnologias em diversos segmentos, incluindo o comércio eletrônico, cujas oportunidades de expansão permanecem condicionadas à melhoria da conectividade nacional.

De forma paralela, a infraestrutura logística brasileira também enfrenta entraves estruturais. Segundo a Confederação Nacional do Transporte, o país convive com “custos elevados, alta dependência do modal rodoviário e uma infraestrutura portuária e ferroviária insuficiente, o que onera a cadeia de suprimentos nacional” (Cnt, 2022, p. 32). Esses fatores afetam diretamente o desempenho logístico das organizações e reduzem a competitividade do setor frente ao cenário internacional.

Além das limitações físicas, destaca-se um déficit significativo de capital humano qualificado para operar tecnologias digitais emergentes. A maior parte dos trabalhadores ainda não possui formação adequada para lidar com ferramentas avançadas de análise de dados, sistemas ciberfísicos ou arquiteturas digitais integradas. Nesse sentido, é fundamental que “a capacitação e o desenvolvimento de competências digitais avancem em conjunto com a tecnologia, sob o risco de o

investimento em infraestrutura digital não alcançar os retornos esperados em produtividade” (Brito; Silva, 2020, p. 118). Assim, torna-se necessário um esforço coordenado entre governo, setor privado e instituições de ensino para superar essa barreira e viabilizar a adoção plena de soluções digitais no país.

O presente estudo adota uma abordagem metodológica de natureza exploratória, conforme proposto por Gil (2002), cujo objetivo é proporcionar maior familiaridade com o problema a partir de um levantamento sistemático de referências teóricas. Quanto aos procedimentos técnicos, empregou-se o método bibliográfico, que se fundamenta exclusivamente na análise de materiais já publicados, como livros e artigos científicos. Uma das principais vantagens desse procedimento é permitir a investigação ampla e atualizada das contribuições existentes, sem a necessidade de contato direto com os fenômenos estudados (Gil, 2002).

A seleção das referências foi realizada por meio de buscas estruturadas com o uso de palavras-chave, tais como digital twins, supply chain 4.0 e reinforcement learning, consultando-se bases de dados como Google Scholar e SciELO. A leitura dos estudos identificados permitiu mapear as obras de maior relevância sobre o tema, incluindo artigos majoritariamente publicados em língua inglesa. Quando necessário, os textos foram traduzidos para fins de compreensão e análise, preservando-se a estrutura conceitual das obras originais.

Após a identificação dos referenciais fundamentais para a compreensão do conceito de Gêmeos Digitais, realizou-se uma etapa complementar de refinamento da busca, incorporando palavras-chave mais específicas, como supply chain 4.0 and digital twins, digital twins na logística, logística 4.0 e Internet das Coisas, aplicação de gêmeos digitais na logística e logística integrada e digital twins. Esse processo possibilitou aprofundar a investigação na área de logística e cadeias de suprimentos, alinhando o referencial teórico aos objetivos do estudo.

5. CONCLUSÃO

O presente estudo evidenciou que os Gêmeos Digitais (Digital Twins – DTs) constituem uma das tecnologias mais promissoras no contexto da Indústria 4.0, especialmente no que se refere ao aprimoramento da cadeia de suprimentos. A

revisão bibliográfica permitiu identificar que sua principal contribuição reside na integração contínua entre dados físicos e virtuais, possibilitando monitoramento em tempo real, simulações de cenários e análises preditivas capazes de ampliar a eficiência operacional e a assertividade das decisões (Grieves, 2014; Crespi; Drobt; Minerva, 2023).

A análise da arquitetura RAMI 4.0 demonstrou que a padronização da comunicação entre sistemas, aliada à integração entre diferentes níveis hierárquicos, constitui elemento central para a adoção eficaz dos DTs. Considerando seu enfoque em interoperabilidade, ciclo de vida do produto e integração vertical e horizontal, essa estrutura fornece bases robustas para aplicações logísticas orientadas por dados e alinhadas a processos de melhoria contínua (Mendonça et al., 2022; Kritzinger et al., 2018; Le; Fan, 2023).

Os resultados permitem concluir que, embora os Gêmeos Digitais apresentem vantagens expressivas — como otimização de processos, simulação de cenários complexos, maior confiabilidade operacional e visibilidade ampliada —, sua implementação na cadeia de suprimentos ainda é limitada. Entre os principais entraves destacam-se os elevados custos de implantação, a necessidade de infraestrutura tecnológica avançada, a baixa maturidade digital das organizações e a escassez de profissionais qualificados para operar modelos dessa natureza (Quinalha, 2018; Grieves, 2002). Tais fatores explicam a adoção mais consolidada da tecnologia em ambientes industriais quando comparada às operações logísticas.

Diante desse cenário, conclui-se que os Gêmeos Digitais possuem potencial significativo para elevar a competitividade logística, contribuindo para redes mais inteligentes, resilientes e responsivas. Contudo, sua adoção demanda investimentos estruturais, planejamento estratégico adequado e desenvolvimento contínuo de competências tecnológicas. Recomenda-se que estudos futuros avancem na análise de aplicações práticas no contexto brasileiro, investigando modelos que reduzam barreiras econômicas e tornem a tecnologia acessível a cadeias de suprimentos de diferentes portes.

Assim, o trabalho cumpre seu objetivo ao apresentar uma análise fundamentada sobre a aplicação dos Digital Twins na cadeia de suprimentos, destacando oportunidades, limitações e perspectivas, e contribuindo para a reflexão sobre o futuro da logística na Indústria 4.0.

6. REFERÊNCIAS

ANATEL – AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. **Relatório de acompanhamento da implantação do 5G no Brasil**. Brasília, 2022.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BARBOSA, C. R. et al. **Digital Twin for Project Scheduling: A Model-Based Approach**. *Journal of Project Management*, v. 15, n. 2, p. 45-60, 2022.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. **Gestão logística da cadeia de suprimentos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

BRITO, M. A. F.; SILVA, L. C. **A qualificação profissional para a indústria 4.0: desafios para o Brasil**. *Revista Brasileira de Inovação*, v. 19, p. 103-126, 2020.

CÂMARA, Fernando José Gonçalves Osório Bianchi da. **A digitalização e a descentralização da produção na Indústria 4.0**. 2023. Dissertação (Mestrado) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2023.

CÉSAR, A. S. et al. **Desigualdades regionais no acesso à banda larga e seus impactos no desenvolvimento socioeconômico**. *Revista de Economia Contemporânea*, v. 25, n. 2, p. 1-25, 2021.

CHEN, Y.; LIU, X. A knowledge and simulation-based optimization framework for aircraft maintenance using Digital Twins. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 19, n. 3, p. 1-15, 2022.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gestão da cadeia de suprimentos: estratégia, planejamento e operações**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

CHRISTOPHER, M. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: estratégias para redução de custos e melhoria dos serviços**. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. **Logística: gestão da cadeia de suprimentos**. Porto Alegre: Bookman, 2009.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2022**. Brasília: CNT, 2022.

CRESPI, N.; DROBT, A. T.; MINERVA, R. **The Digital Twin: Bringing the Physical and Virtual Worlds Together**. *IEEE Future Directions*, 2023.

- DONEDA, D.; MENDES, L. S. **Da proteção de dados ao data-driven: a LGPD e o futuro dos negócios no Brasil**. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2021.
- FULLER, A. et al. **Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research**. IEEE Access, v. 8, p. 108952-108971, 2020.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GRIEVES, M. **Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication**. White Paper, 2014.
- GRIEVES, M. **Digital Twins: Past, Present, and Future**. In: ASME. Manufacturing Leadership Council, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>. Acesso em: 22 maio 2025.
- GRIEVES, M. **Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking**. New York: McGraw-Hill, 2002.
- GRIEVES, M.; VICKERS, J. **Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems**. In: KAHN, F. J. (org.). **Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems**. Cham: Springer, 2017. p. 85-113.
- HANNAH, A. L.; FRENCH, D. P.; BROOKS, J. M. Optimising the value of the Critical Appraisal Skills Programme (CASP) tool for quality appraisal in qualitative evidence synthesis. **Research Methods in Medicine & Health Sciences**, v. 1, n. 1, p. 31-42, 2020.
- IBGE. **Normas de apresentação tabular**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993.
- IBM. **Food Trust: Improving Food Safety with Blockchain**. 2019. Disponível em: <https://www.ibm.com/blockchain/solutions/food-trust>. Acesso em: 7 jul. 2025.
- KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group**. Frankfurt: Acatech, 2013.
- KRITZINGER, W. et al. **Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification**. IFAC-PapersOnLine, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.
- LI, H. et al. **A Digital Twin-driven approach for smart hospital management: A case study in Singapore**. Health Systems, v. 11, n. 1, p. 78-92, 2022.
- LU, Y. **Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues**. Journal of Industrial Information Integration, v. 6, p. 1–10, 2017. DOI: 10.1016/j.jii.2017.04.005.
- MARTINS, P. G.; ALT, P. R. C. **Administração de materiais e recursos patrimoniais**. São Paulo: Saraiva Educação, 2017.

MEHRABI, M. G. et al. **Transforming Industrial Processes with Digital Twins: A Review.** *Journal of Manufacturing Systems*, v. 60, p. 1-15, 2021.

MENDONÇA, M. G. S. et al. **Gêmeos Digitais na Indústria 4.0:** arquitetura, desafios e oportunidades. *Revista Produção Online*, v. 22, n. 3, p. 931–953, 2022. DOI: 10.14488/1676-1901.v22i3.4374.

MOURA, R. P. et al. Logistics Digital Twin and Machine Learning for OEE Improvement in Beverage Industry. **International Journal of Production Research**, v. 61, n. 8, p. 2675-2690, 2023.

NEGRI, E.; FUMAGALLI, L.; MACCHI, M. A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 939-948, 2017.

PURSSELL, E. Can the Critical Appraisal Skills Programme (CASP) checklists be used alongside GRADE to improve transparency and decision making? **Journal of Advanced Nursing**, v. 76, n. 4, p. 1082-1089, 2020. DOI: 10.1111/jan.14303.

QUINALHA, E. **Gêmeos digitais, o futuro da indústria 4.1:** estudo de caso. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA) – Fundação Getulio Vargas, São Paulo, 2018.

MENDONÇA, Rafael S. et al. **Avaliação de modelo de maturidade RAMI de Indústria 4.0:** Estudo de caso de um sistema de alocação de recursos. In: XXIV Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2022. Sociedade Brasileira de Automática, 2022.

SEGOVIA, V. R.; THEORIN, A. **History of control:** History of PLC and DCS. 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/266140652>. Acesso em: 2 jun. 2025.

SILVA, D. F.; OLIVEIRA, P. R. Logística 4.0 e os impactos da Indústria 4.0 na cadeia de suprimentos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 3, n. 10, p. 95–112, 2018.

SMITH, J.; JOHNSON, A. B. Machine Learning for demand forecasting in cosmetic supply chains: A Digital Twin approach. **Journal of Business Logistics**, v. 44, n. 1, p. 112-128, 2023.

TAO, F.; QI, Q.; LIU, A.; KUSIAK, A. Digital twin in industry: state-of-the-art. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 15, n. 4, p. 2405–2415, 2019. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.

THO, V. Le; FAN, R. **Digital Twins for logistics and supply chain systems:** Literature review, conceptual framework, research potential, and practical challenges. Purdue University, 2023.

VICKERS, J. **NASA's Modeling, Simulation and Analysis for Digital Twin Concepts.** NASA, 2010.