

Uso dos gêmeos digitais aplicados no setor portuário no Brasil

Agustin Enrique Cuevas Fernandez (USP – Universidade de São Paulo)
agustin.cuevas@gmail.com

Carlos Eduardo Cugnasca (USP – Universidade de São Paulo)
carlos.cugnasca@usp.br

Resumo

Este estudo analisa a aplicação de Gêmeos Digitais no setor portuário brasileiro, abordando a sua evolução conceitual, experiências internacionais e desafios para a sua adoção no contexto nacional. A pesquisa propõe uma estrutura tecnológica baseada na integração de sensores conectados, sistemas de informação, análise de dados e modelos preditivos, com o objetivo de apoiar a tomada de decisão e aumentar a eficiência operacional. A metodologia adotada caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa, de natureza exploratória, fundamentada em revisão bibliográfica e análise documental, complementada por um estudo de caso em um porto brasileiro de médio porte. Os resultados indicam que, embora a adoção de gêmeos digitais no Brasil ainda seja incipiente — principalmente devido à baixa integração entre sistemas e à limitada capacitação técnica —, a tecnologia apresenta elevado potencial para ganhos em eficiência, previsibilidade operacional e sustentabilidade ambiental. Conclui-se que os Gêmeos Digitais constituem um recurso estratégico para a logística nacional e a modernização do setor portuário nacional, cuja consolidação depende do fortalecimento de políticas públicas, investimentos em infraestrutura digital e cooperação entre instituições públicas e privadas.

Palavras-Chaves: Gêmeos Digitais, Setor Portuário, Logística Portuária, Indústria 4.0, Eficiência Operacional.

Abstract

This study analyzes the application of digital twins in the Brazilian port sector, addressing their conceptual evolution, international experiences, and challenges for adoption in the national context. The research proposes a technological framework based on the integration of connected sensors, information systems, data analysis, and predictive models to support decision-making and improve operational efficiency. The methodology is characterized as

qualitative and exploratory, based on a literature review and documentary analysis, complemented by a case study conducted at a medium-sized Brazilian port. The results indicate that although the adoption of digital twins in Brazil is still incipient — mainly due to limited system integration and technical training — the technology shows significant potential for gains in efficiency, operational predictability, and environmental sustainability. It is concluded that digital twins represent a strategic resource for the modernization of the national port sector, whose consolidation depends on public policies, investments in digital infrastructure, and cooperation between public and private institutions.

Keywords: *Digital Twins, Port Sector, Port Logistics, Industry 4.0, Operational Efficiency.*

1. Introdução

O setor portuário desempenha papel central na economia brasileira, sendo responsável pelo escoamento de cargas e pelo comércio exterior. Constitui um pilar da logística global, dada sua função na movimentação de mercadorias e na integração das cadeias de suprimentos. Diante da crescente complexidade das operações, intensifica-se a demanda por tecnologias que favoreçam eficiência, segurança e sustentabilidade. Nesse contexto, destacam-se os Gêmeos Digitais (DT), capazes de integrar dados em tempo real, simulação e análises preditivas, conforme Madusanka et al. (2023). A implementação dessa tecnologia possibilita monitoramento contínuo e otimização de processos, desde a alocação de cargas até a manutenção preditiva, como demonstram Almeida et al. (2023) e García et al. (2022). Embora sua adoção no Brasil ainda seja incipiente, estudos como Martinelli et al. (2022) apontam desafios de interoperabilidade, capacitação e padronização de dados, além de seu potencial para elevar a competitividade e reduzir custos.

Dessa forma, os Gêmeos Digitais configuram-se como instrumento estratégico para fortalecer a tomada de decisão e promover a modernização logística, dependendo de políticas públicas, investimentos em infraestrutura digital e cooperação entre setores. O setor portuário brasileiro enfrenta desafios como complexidade operacional, congestionamentos e limitações tecnológicas, que comprometem a eficiência. Nesse contexto, os DTs destacam-se ao permitir simulações e monitoramento em tempo real. Diante disso, este estudo busca responder como os Gêmeos Digitais podem ser aplicados ao setor portuário brasileiro e quais fatores condicionam sua adoção.

O objetivo deste estudo é investigar a aplicabilidade e o grau de adoção dos DTs, identificando problemas mitigáveis, benefícios e lacunas. Como objetivos específicos, destacam-se o mapeamento de desafios, a avaliação de métodos, a identificação de barreiras e a proposição de um framework estratégico, visando ampliar a eficiência e a competitividade do setor.

A modernização do setor ainda é limitada por gargalos operacionais, e os DTs surgem como alternativa estratégica para ampliar eficiência, reduzir custos e fortalecer a sustentabilidade.

A investigação adotou abordagem qualitativa e exploratória, com revisão sistemática da literatura e estudo de caso, analisando o estado da arte entre 2020 e 2025. A triangulação dos achados permitiu consolidar o conhecimento e identificar lacunas.

A implementação de DTs em terminais portuários brasileiros será composta por quatro fases. A primeira fase, de aquisição e integração de dados, foca na convergência de fontes heterogêneas para alimentar o modelo virtual, integrando sensores IoT, sistemas de rastreamento, sistemas legados e dados geoespaciais. A segunda fase envolve a criação da réplica virtual do terminal, representando infraestrutura, ativos e fluxos logísticos.

Na fase de análise preditiva e otimização, o DT atuará como laboratório virtual. Serão aplicados algoritmos de *Machine Learning* e heurísticas de otimização para alocar recursos, programar operações críticas (movimentação de cargas, *berthing*) e apoiar a manutenção preditiva, ampliando o *throughput*.

A fase final envolve validação, avaliação de desempenho e iteração contínua. O sistema será testado por indicadores de gestão (KPIs) do setor, simulações de estresse e *feedback* de operadores. Essa etapa assegura confiabilidade, suporte efetivo à decisão e ajustes sucessivos que fortalecem eficiência, resiliência e sustentabilidade dos terminais.

O artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a revisão da literatura; a Seção 3 descreve a metodologia; a Seção 4 discute os resultados e o estudo de caso; e a Seção 5 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Referencial Teórico

De forma geral, os DTs podem ser compreendidos como uma representação virtual dinâmica de um sistema físico continuamente atualizada por fluxos bidirecionais de dados

(TAO et al., 2018). Diferentemente de modelos digitais estáticos, incorpora dados operacionais em tempo real, permitindo monitoramento, simulação e previsão.

A literatura converge na identificação de três elementos fundamentais do DT; 1) a entidade física, 2) sua representação virtual e 3) o fluxo contínuo de dados entre ambas (BOSCHERT; ROSEN, 2016; Fuller et al, 2020). Tal integração viabiliza análises preditivas e prescritivas, ampliando o suporte à tomada de decisão em ambientes operacionais complexos.

A aplicação de DTs no setor portuário envolve quatro tipologias de desafios: operacionais, infraestrutura e planejamento, ambientais e sustentabilidade e organizacionais e integração tecnológica. Essa classificação, amplamente discutida na literatura recente, permite compreender o caráter multidimensional e estratégico da tecnologia.

Os desafios operacionais tratam da otimização tática em tempo real, incluindo alocação dinâmica de berços (Smith et al., 2021), agendamento de guindastes (García et al., 2022) e coordenação de ativos móveis (Garcia et al., 2023). Destaca-se também a manutenção preditiva, com antecipação de falhas (Chen et al., 2020) e detecção de anomalias (Bianchi et al., 2023). Essas aplicações reduzem *dwell time* e elevam o *throughput* dos terminais.

Os desafios de infraestrutura e planejamento abrangem decisões de médio e longo prazo, como expansão de terminais e avaliação de investimentos. Os DTs apoiam modelagem multifidelidade (Ribeiro et al., 2022), análise de risco em projetos (Gonçalves et al., 2024) e comissionamento virtual de sistemas automatizados (Li et al., 2020), reduzindo incertezas e custos.

A dimensão ambiental e de sustentabilidade está ligada ao cumprimento de metas ESG. DTs otimizam o uso de *shore power* (Klein et al., 2022), reduzem consumo de combustível em manobras (Singh et al., 2021), monitoram indicadores ambientais (Pereira et al., 2023) e simulam impactos climáticos extremos (Hassan et al., 2022). Assim, tornam-se ferramentas centrais para portos inteligentes e resilientes.

Os desafios organizacionais e de integração tecnológica incluem interoperabilidade de sistemas (Koskela et al., 2021), padronização de dados (Alvarez et al., 2024) e adoção de arquiteturas de microsserviços (Larsen et al., 2023). Barreiras institucionais e de capacitação também influenciam a adoção (Martinelli et al., 2022), assim como riscos de governança de dados (Serra et al., 2022).

O conceito de Gêmeos Digitais consolidou-se como inovação central da Indústria 4.0, permitindo representar virtualmente, em tempo real, objetos, processos e sistemas físicos

(Madusanka et al., 2023). Essa integração contínua entre domínios físico e digital depende de IoT, IA, Machine Learning e computação em nuvem, que viabilizam análises de grandes volumes de dados com baixa latência (Holland et al., 2024). Diferentemente de simulações estáticas, os DTs utilizam ciclos permanentes de retroalimentação, assegurando sincronização com sensores e sistemas físicos para monitoramento, previsão de falhas e otimização operacional (Chen et al., 2020; Bianchi et al., 2023; Liu et al., 2024).

A taxonomia resultante — operacional, infraestrutura/planejamento, ambiental e organizacional — constitui o arcabouço central para análises e aplicações futuras. A Tabela 1 apresenta a estrutura de classificação taxonômica.

Tabela 1 – Classificação taxonômica da tipologia

Eixo	Nível de Intervenção	Foco Principal	Valor Agregado (Acadêmico)
Eixo 1 - Operacional	Tático (Curto Prazo)	Eficiência e Manutenção em Tempo Real	Maximização do <i>Throughput</i> e Confiabilidade de Ativos
Eixo 2 - Infraestrutura e Planejamento	Estratégico (Longo Prazo)	Decisões de Capital e Expansão	Redução do Risco de Investimento e Modelagem de Cenários
Eixo 3 - Ambiental e Sustentabilidade	Tático/Estratégico (ESG)	Monitoramento e Mitigação de Impactos	Conformidade Regulatória e Resiliência Climática
Eixo 4 - Organizacional e Integração	Institucional/Tecnológico	Governança, Padrões e Interoperabilidade	Escalabilidade da Solução e Adoção Institucional

Fonte: Produção dos próprios autores (2026)

No setor portuário, os DTs expandiram seu escopo ao possibilitar otimização de atracações, fluxos logísticos, consumo energético e planejamento de infraestrutura (Oliveira et al., 2024; Alvarez et al., 2024). O ciclo de vida do DT acompanha todo o sistema físico, do projeto à desativação (Ng et al., 2020; Peters et al., 2022), favorecendo decisões baseadas em cenários simulados, além de integrar subsistemas por meio de plataformas unificadas (Ali et al., 2024). O avanço de padrões de interoperabilidade e do modelo *Digital Twin-as-a-Service* (DT-as-a-Service) reforça sua escalabilidade (Alvarez et al., 2024; Larsen et al., 2023).

Ainda assim, persistem desafios técnicos e institucionais, incluindo heterogeneidade de dados (Almeida et al., 2023), governança e privacidade (Serra et al., 2022) e limitações organizacionais (Martinelli et al., 2022). A manutenção preditiva é fortalecida por IA e redes neurais (Patel et al., 2022), enquanto sensores ambientais permitem avaliar emissões e eficiência energética (Singh et al., 2021; Pereira et al., 2023). Em contextos emergentes, a

adoção enfrenta restrições de infraestrutura, maturidade digital e integração sistêmica (Martinelli et al., 2022; Rodrigues et al., 2024).

Os pré-requisitos para DTs abrangem infraestrutura de dados e fusão de informações heterogêneas (Almeida et al., 2023), padronização e interoperabilidade semântica (Koskela et al., 2021; Larsen et al., 2023), computação híbrida em nuvem e borda (Momoh et al., 2021; Holland et al., 2024) e modelagem de alta fidelidade com BIM e CAD (Hakimi et al., 2025; Martins et al., 2021). Governança robusta, políticas de segurança e maturidade organizacional são igualmente essenciais (Serra et al., 2022; Peters et al., 2022; Martinelli et al., 2022). A definição clara de objetivos e KPIs reforça o valor decisório dos modelos (Duarte et al., 2022), enquanto ecossistemas colaborativos e plataformas abertas impulsionam redes interportos (Ali et al., 2024; Vasquez et al., 2024).

Por fim, os recursos necessários incluem infraestrutura digital, conectividade avançada (Martins et al., 2021; Momoh et al., 2021), escalabilidade computacional e dados confiáveis (Almeida et al., 2023). A integração de IA potencializa previsões logísticas (Patel et al., 2022; Bianchi et al., 2023). Competências humanas, governança e investimento estratégico sustentam a adoção (Martinelli et al., 2022; Rodrigues et al., 2024; Gonçalves et al., 2024). Assim, DTs tornam-se pilares de eficiência, sustentabilidade e resiliência nas cadeias portuárias, consolidando uma ponte inteligente entre o físico e o digital (Liu et al., 2024).

Embora a literatura tenha crescido significativamente, persistem limitações relevantes, especialmente no que se refere à aplicação em ambientes operacionais complexos como terminais portuários. Grande parte dos estudos concentra-se na manufatura, restringindo a generalização para contextos logísticos caracterizados por elevada variabilidade operacional (TAO et al., 2018).

Observa-se ainda limitada evidência empírica em ambientes reais e escassez de estudos sobre integração entre DTs e sistemas existentes, especialmente TOS. Além disso, a maior parte das evidências concentra-se em portos europeus e asiáticos, havendo lacunas relevantes no contexto latino-americano.

3. Metodologia

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa de natureza exploratória, baseada em revisão bibliográfica de artigos científicos, relatórios técnicos e documentos

institucionais sobre gêmeos digitais no setor portuário, além de análise documental de dados públicos.

Adicionalmente, realizou-se um estudo de caso em um porto brasileiro de médio porte, visando avaliar a viabilidade da aplicação dessa tecnologia em contexto real, dada a relevância econômica do setor e seu potencial de ganhos operacionais com a digitalização.

A implantação de Gêmeos Digitais em portos exige um processo iterativo que integra planejamento estratégico, governança de dados e gestão do ciclo de vida do sistema. A execução deve ser gradual, validando conceitos e garantindo interoperabilidade entre componentes físicos e digitais (Ali et al., 2024).

A fase 1, de concepção estratégica, define objetivos, escopo e requisitos do DT, incluindo funções críticas, KPIs e ativos a representar (Duarte et al., 2022). Essa clareza inicial sustenta modelos escaláveis como *DT-as-a-Service* (Ali et al., 2024).

A fase 2, de integração e governança de dados, consolida a base informacional por meio de mapeamento e fusão de dados heterogêneos (sensores IoT, AIS, meteorologia) (Almeida et al., 2023), uso de ontologias e padrões para interoperabilidade (Koskela et al., 2021; Alvarez et al., 2024) e protocolos de qualidade e confiabilidade.

Na fase 3, de modelagem e arquitetura, constrói-se o modelo digital utilizando arquiteturas modulares (Hakimi et al., 2025), além de ferramentas BIM e CAD para representar aspectos físicos e funcionais (Martins et al., 2021).

A fase 4, de sincronização e validação, conecta o DT ao sistema físico com transmissão contínua de dados. Tecnologias como 5G, *edge computing* e IA distribuída reduzem a latência (Holland et al., 2024; Momoh et al., 2021). Testes operacionais calibram o modelo com base em métricas de acurácia e confiabilidade (Hussain et al., 2023).

A fase 5 libera o potencial analítico do DT, aplicando modelos de previsão para manutenção (Bianchi et al., 2023) e demanda logística (Patel et al., 2022), além de simulação de cenários para decisões estratégicas (Gonçalves et al., 2024; Ribeiro et al., 2022). *Dashboards* apoiam tomada de decisão em tempo real (Duarte et al., 2022).

A fase 6 estabelece a operação contínua por meio de ciclos permanentes de retroalimentação (Ng et al., 2020), programas de capacitação e uso de RA (Martinelli et al., 2022; Fernández et al., 2021; Hernández et al., 2022), além de mecanismos robustos de governança e cibersegurança (Peters et al., 2022; Serra et al., 2022).

4. Resultados e Discussão

A análise da literatura e do estudo de caso evidencia que a aplicação de gêmeos digitais no setor portuário pode proporcionar melhorias significativas na previsibilidade operacional, na gestão de ativos e na redução de custos. Observou-se que a integração de sensores e sistemas de informação permite o monitoramento contínuo das operações, possibilitando a identificação antecipada de falhas e gargalos.

No curto prazo, destacam-se melhorias de eficiência, previsibilidade e controle operacional em tempo real. Plataformas *DT-as-a-Service* integram dados náuticos, sensores IoT e vigilância, elevando a coordenação operacional (Ali et al., 2024). O monitoramento contínuo de equipamentos viabiliza manutenção preditiva e redução de paradas (Chen et al., 2020), enquanto técnicas de *Machine Learning* otimizam a produtividade (Bianchi et al., 2023; Hao et al., 2021). A simulação integrada melhora fluxos entre pátio e berço (Duarte et al., 2022; Oliveira et al., 2024) e reduz o *vessel dwell time*. Em segurança e sustentabilidade, os DTs antecipam riscos marítimos (Brown et al., 2022) e apoiam controle energético e emissões (Pereira et al., 2023; Klein et al., 2022).

No longo prazo, os DTs influenciam decisões de capital, resiliência climática e integração sistêmica. Modelos multifidelidade embasam investimentos em infraestrutura (Gonçalves et al., 2024; Ribeiro et al., 2022). Simulações climáticas fortalecem a adaptação a eventos extremos (Moreira et al., 2023) e apoiam metas de descarbonização (Singh et al., 2021). A padronização e interoperabilidade possibilitam redes digitais entre portos (Alvarez et al., 2024; Koskela et al., 2021), enquanto ciclos contínuos de retroalimentação criam sistemas cognitivos portuários (Momoh et al., 2021). Assim, os DTs evoluem de ganhos operacionais a motores de transformação da gestão (Gonçalves et al., 2024).

Em países emergentes, a fragmentação institucional exige capacitação, modernização informacional e marcos de interoperabilidade (Martinelli et al., 2022; Alvarez et al., 2024). A integração entre DTs e *Port Community Systems* demanda coordenação entre governo e operadores, permitindo redes interportuárias orientadas a dados (Vasquez et al., 2024).

Os DTs também apoiam políticas climáticas (Moreira et al., 2023), estratégias de portos verdes (Pereira et al., 2023) e decisões baseadas em simulação e evidências, fortalecendo a competitividade e o planejamento público (Gonçalves et al., 2024; Rodrigues et al., 2024).

Assim, portos passam a atuar como nós cognitivos de redes digitais globais (Madusanka et al., 2023), exigindo políticas que garantam interoperabilidade, segurança e acesso equitativo.

4.1 Passos seguintes após a implantação

Após criar o modelo virtual e integrar as fontes principais de dados, inicia-se a fase de pós-implantação, dedicada ao aperfeiçoamento e expansão do ecossistema digital. Essa etapa transforma o gêmeo em um sistema dinâmico, capaz de aprendizado, adaptação e suporte inteligente à decisão. Em portos, essa maturidade depende da integração contínua de dados, interoperabilidade e novas camadas analíticas de IA e aprendizado de máquina (Ali et al., 2024; Madusanka et al., 2023), permitindo a transição de modelos descritivos para capacidades preditivas e prescritivas. Portos que avançam nesse estágio alcançam maior eficiência e sustentabilidade (Gonçalves et al., 2024; Vasquez et al., 2024), reforçando o caráter estratégico dos DTs na inovação e competitividade do setor.

A pós-implantação envolve calibração do modelo e validação por KPIs (Ali et al., 2024; Alvarez et al., 2024), seguida pela expansão da interoperabilidade e padronização semântica (Almeida et al., 2023; Koskela et al., 2021). Em seguida, algoritmos de *Machine Learning* refinam previsões e operações (Bianchi et al., 2023), enquanto arquiteturas em borda e nuvem sustentam escalabilidade e baixa latência (Holland et al., 2024). Estudos destacam, ainda, a análise de retorno sobre investimento (Gonçalves et al., 2024; Rodrigues et al., 2024) e a formação de redes interportuárias (Vasquez et al., 2024). Governança, privacidade e cibersegurança tornam-se eixos estruturantes (Peters et al., 2022; Serra et al., 2022). Assim, a pós-implantação inaugura um ciclo permanente de aprendizado e otimização, consolidando os DTs como pilares da transformação digital dos portos.

A evolução dos DTs exige um ecossistema tecnológico integrado. A fusão de dados oriundos de IoT, AIS e satélites garantem representações atualizadas (Almeida et al., 2023; Martins et al., 2021), enquanto conectividade avançada e computação em nuvem/borda asseguram processamento contínuo (Momoh et al., 2021; Holland et al., 2024). IA e aprendizado de máquina sustentam análises preditivas (Chen et al., 2020; Patel et al., 2022), e ferramentas imersivas apoiam treinamento e manutenção (Hernández et al., 2022). A interoperabilidade permanece essencial (Alvarez et al., 2024; Koskela et al., 2021).

A eficácia dos gêmeos depende de camadas articuladas: aquisição multissensorial (Almeida et al., 2023), arquiteturas híbridas escaláveis (Momoh et al., 2021), modelos

preditivos e prescritivos (Chen et al., 2020), transferência de aprendizado (Bianchi et al., 2023) e geração de dados sintéticos (Riyaz et al., 2021). Métodos híbridos de simulação validam cenários operacionais e climáticos (Hassan et al., 2022). BIM, GIS, AR e visualização 3D fortalecem a adoção operacional (Martins et al., 2021), enquanto automação e robótica integram o DT ao controle físico (Garcia et al., 2023; Hao et al., 2021). Sistemas de energia coordenados via DT reduzem emissões (Klein et al., 2022). Governança, cibersegurança e privacidade continuam fundamentais (Peters et al., 2022; Serra et al., 2022), assim como padrões e ontologias (Koskela et al., 2021; Larsen et al., 2023). A integração com PCS e cadeias logísticas amplia a visibilidade e colaboração interportuária (Vasquez et al., 2024). Em síntese, a orquestração dessas tecnologias consolida o gêmeo digital como ferramenta estratégica para eficiência, segurança e sustentabilidade (Madusanka et al., 2023; Moreira et al., 2023).

4.2 Estudo de caso

Este estudo de caso analisa a aplicação de Gêmeos Digitais no setor portuário brasileiro, a partir da literatura recente e de experiências piloto nacionais. O sistema portuário brasileiro enfrenta desafios estruturais tais como complexidade operacional, gargalos logísticos, infraestrutura limitada e pressões ambientais, que exigem tecnologias que ampliem controle, previsibilidade e eficiência.

A implantação de DTs ocorre em seis fases: (1) concepção e planejamento; (2) integração e governança de dados; (3) modelagem arquitetural; (4) sincronização e validação em tempo real; (5) análise preditiva e apoio à decisão; e (6) operação contínua e sustentabilidade. Cada etapa demanda alinhamento entre tecnologia, governança e capacitação. A eficácia depende de infraestrutura digital robusta, padrões de dados, interoperabilidade, conectividade avançada (5G, nuvem, edge), políticas de governança e equipes qualificadas.

O ecossistema dos DTs envolve IoT, AIS, satélites, IA, aprendizado de máquina e plataformas *DT-as-a-Service*, permitindo simulações avançadas, manutenção preditiva e planejamento operacional orientado por dados. Os resultados esperados incluem, no curto prazo, maior eficiência, redução de esperas, melhor alocação de recursos e previsibilidade; e, no médio e longo prazo, suporte estratégico, ganhos ambientais e integração logística.

A adoção nacional requer um marco regulatório de interoperabilidade e governança de dados, além de políticas públicas que promovam redes interportos de DTs e integração com *Port Community Systems*.

A Tabela 2, contém um cronograma proposto para a implantação dos gêmeos digitais:

Tabela 2 – Cronograma de implantação de gêmeos digitais em um porto

Cronograma de atividades		Meses											
Etapa / Atividade	Descrição	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Diagnóstico inicial	Levantamento de requisitos, mapeamento e análise												
Plano estratégico	Definição de objetivo do DT e escopo												
Governança e padrões de dados	Criação de políticas de dados e critérios de interoperabilidade												
Infraestrutura digital	Expansão ou instalação de conectividade (5G, fibra), infraestrutura												
Sensoriamento e instrumentação	Instalação de sensores IoT, integração AIS, câmeras												
Integração de sistemas	Conexão com PCS, ERP, criação de APIs e <i>pipelines</i> de dados												
Modelagem do gêmeo digital	Construção do modelo virtual do porto: atracação, pátio, <i>gate</i>												
Sincronização em tempo real	Implementação de data <i>streaming</i> , <i>dashboards</i> e testes												
Simulações e cenários	Desenvolvimento de simulações de ocupação de berços, congestionamento, falhas, clima e consumo energético												
Análise preditiva	Aplicação de IA/ML para manutenção preditiva, previsão de filas												
Validação operacional	Testes com operadores, ajustes, validação com KPIs												
Operação contínua e expansão	Entradas em produção, treinamento e integração interportos												

Fonte: Produção dos autores (2026)

Assim, os DTs configuram uma inovação estratégica para o setor portuário brasileiro, fortalecendo eficiência, resiliência e sustentabilidade. O avanço depende da ampliação das políticas de transformação digital, da interoperabilidade tecnológica e da consolidação de uma gestão orientada por dados.

Uma proposta de implantação de um sistema de Gêmeo Digital em outro porto do Sudeste do Brasil pode seguir um processo progressivo e modular. Inicialmente, estabelece-se um núcleo de integração de dados conectando sensores IoT, AIS e sistemas de tráfego marítimo. Em seguida, desenvolve-se a modelagem digital da infraestrutura e operação do porto, permitindo simulações de atracação e fluxos logísticos.

Com a maturidade do sistema, o porto pode integrar-se a outros terminais brasileiros, formando uma rede interportos colaborativa baseada em interoperabilidade que permite gestão

preventiva de riscos e otimização de rotas e capacidades. A partir desse estágio, o modelo pode evoluir para um sistema prescritivo, com IA distribuída e análises em tempo real, reduzindo custos, ampliando a segurança e fortalecendo a sustentabilidade.

5. Considerações Finais

Em síntese, os Gêmeos Digitais (DTs) apresentam-se não apenas como uma inovação tecnológica emergente, mas como um instrumento estruturante para a competitividade e sustentabilidade do setor portuário brasileiro, cuja consolidação dependerá da articulação entre inovação tecnológica, governança de dados e políticas públicas orientadas à transformação digital.

A análise apresentada evidencia que a implantação de Gêmeos Digitais (DTs) no setor portuário brasileiro representa uma estratégia promissora para ampliar eficiência operacional, previsibilidade e sustentabilidade. O estudo demonstra, contudo, que a adoção dessa tecnologia ainda é incipiente, enfrentando barreiras estruturais e organizacionais, especialmente relacionadas à interoperabilidade entre sistemas e à qualificação dos recursos humanos. Os resultados indicam que a digitalização apoiada em DTs contribui para a redução de tempos operacionais, a antecipação de falhas e a otimização do uso de recursos. A integração em tempo real entre ativos físicos e modelos virtuais estabelece um novo paradigma de gestão orientada por dados e análises preditivas, fortalecendo a tomada de decisão em ambientes portuários complexos. Dessa forma, conclui-se que o objetivo deste estudo foi atingido, ao analisar a aplicabilidade, o grau de adoção, os benefícios e as barreiras associadas aos Gêmeos Digitais no setor portuário brasileiro.

No âmbito institucional, destaca-se a necessidade de políticas públicas voltadas à transformação digital, bem como de marcos regulatórios que promovam a interoperabilidade e incentivem parcerias entre universidades, autoridades portuárias e o setor privado. A formação de um ecossistema colaborativo é essencial para o desenvolvimento de soluções alinhadas ao contexto brasileiro e às melhores práticas internacionais. Nesse sentido, os DTs configuram-se como um vetor estratégico de modernização e competitividade, cuja efetividade depende da integração entre inovação, governança e sustentabilidade.

A adoção dessa tecnologia no Brasil ainda se encontra em estágio inicial, sobretudo em função de desafios estruturais relacionados à interoperabilidade entre sistemas, à heterogeneidade de dados, à maturidade digital das organizações e à qualificação técnica das

equipes. Assim, o avanço dos DTs no contexto nacional dependerá não apenas do desenvolvimento tecnológico, mas também da consolidação de um ecossistema institucional colaborativo que integre universidades, operadores portuários, autoridades públicas e fornecedores de tecnologia.

Quanto às perspectivas futuras, recomenda-se o avanço de pesquisas focadas na implementação prática e na avaliação quantitativa dos DTs em portos de diferentes perfis, regiões e escalas, explorando a integração entre simulação, Internet das Coisas (IoT) e Inteligência Artificial (IA). Sugere-se ainda o desenvolvimento de um modelo nacional de referência, com padronização de arquiteturas, protocolos e indicadores de desempenho, além da investigação de eixos como maturidade digital, interoperabilidade, modelos econômicos e validação de investimentos, conforme discutido por Martinelli et al. (2022), Alvarez et al. (2024) e Gonçalves et al. (2024), considerando as especificidades do contexto latino-americano.

REFERÊNCIAS

ALI, F.; et al. **Digital Twin-as-a-Service: commercial platforms for port digital twins and their evaluation.** *Journal of Digital Platform Studies*, 2024.

ALMEIDA, P.; et al. **Data fusion techniques for port digital twins: AIS, sensors and satellite data.** *Remote Sensing for Maritime*, 2023.

ALVAREZ, M.; et al. **Standardization needs for port digital twins: a cross-case analysis.** *Standards in Maritime Systems*, 2024.

BIANCHI, F.; et al. **Transfer learning in digital twins for port equipment anomaly detection.** *Neural Computing & Applications*, 2023.

BOSCHERT, Stefan; ROSEN, Roland. **Digital twin—the simulation aspect.** In: *Mechatronic Futures*. Cham: Springer, 2016.

BROWN, K.; et al. **Digital twins for port security and surveillance analytics.** *Security Informatics*, 2022.

DUARTE, V.; et al. **Digital twin-enabled KPI dashboard for terminal operators.** *Journal of Port Management*, 2022.

FULLER, Aidan; et al. **Digital twin: enabling technologies, challenges and open research.** *IEEE Access*, v. 8, 2020.

GARCÍA, A.; et al. **Digital Twin-based optimization of quay crane scheduling in container terminals.** *Journal of Maritime Operations*, 2022.

GARCIA, S.; et al. **Digital twin for automated guided vehicle (AGV) coordination in terminals.** *Robotics and Autonomous Systems*, 2023.

GONÇALVES, A.; et al. **Digital twin-based scenario analysis for port infrastructure investment.** *Transport Reviews*, 2024.



HAKIMI, F.; KHALED, T.; et al. **Towards a Digital Twin Modeling Method for Container Terminal.** *arXiv preprint*, 2025.

HAO, L.; et al. **Digital twin for crane motion planning and collision avoidance.** *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2021.

HASSAN, M.; et al. **Digital twins for storm surge and tide impact modelling in ports.** *Coastal Engineering*, 2022.

HERNÁNDEZ, J.; et al. **Augmented reality and digital twin integration for port maintenance training.** *Virtual Reality & Training*, 2022.

HUSSAIN, K.; et al. **Benchmarking digital twin performance in container terminals.** *Performance Measurement and Metrics*, 2023.

KLEIN, T.; et al. **Digital twin for shore power scheduling and emissions control.** *Energy Policy for Ports*, 2022.

KOSKELA, M.; et al. **Ontology-driven digital twins for interoperability in port systems.** *Information Systems for Logistics*, 2021.

LARSEN, O.; et al. **Semantic interoperability in port digital twins: a microservices implementation.** *Software: Practice & Experience*, 2023.

LI, P.; et al. **Virtual commissioning of automated terminals using digital twin technology.** *Control Engineering Practice*, 2020.

LIU, Y.; et al. **Unveiling the potential of digital twins in logistics and supply chains: A systematic literature review.** *Logistics & Digitalization Review*, 2024.

MADUSANKA, N. S.; et al. **Digital Twin in the Maritime Domain: A Review and Roadmap.** *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 11, n. 5, p. 1021, Maio 2023.

MARTINELLI, P.; et al. **Digital twin adoption barriers in developing-country ports: a Brazilian case study.** *Journal of Transport & Development*, 2022.

MARTINS, R.; et al. **Integration of IoT, BIM and Digital Twins for terminal yard operations.** *Automation in Construction*, 2021.

MOMOH, J.; et al. **Cloud-edge architectures for scalable port digital twins.** *IEEE Cloud Computing*, 2021.

MOREIRA, G.; et al. **Digital twin framework for port resilience under extreme weather events.** *Climate Resilience in Transport*, 2023.

NG, A.; et al. **Asset lifecycle digital twins for port cranes: from design to decommissioning.** *Procedia Engineering*, 2020.

OLIVEIRA, R.; et al. **Digital twin-assisted berth and yard co-optimization for container terminals.** *European Journal of Operational Research*, 2024.

PATEL, S.; et al. **Machine learning models in digital twins for port demand forecasting.** *Applied AI in Transportation*, 2022.

PEREIRA, T.; et al. **Port digital twins for environmental monitoring and emissions reduction.** *Marine Pollution Bulletin*, 2023.

PETERS, H.; et al. **Cybersecurity considerations for port digital twins.** *Maritime Cybersecurity Review*, 2022.

RIBEIRO, L.; et al. **A multi-fidelity digital twin approach for terminal expansion planning.** *Journal of Infrastructure Systems*, 2022.



RIYAZ, A.; et al. **Synthetic data generation for training port digital twins under rare events.** *Data-Centric AI in Transport*, 2021.

RODRIGUES, A.; et al. **Economic evaluation of digital twin investments in container terminals.** *Transport Economics*, 2024.

SERRA, P.; et al. **Data governance and privacy in port digital twins.** *Information & Management in Transport*, 2022.

SINGH, R.; et al. **Digital twin-driven green port initiatives: reducing fuel consumption in vessel maneuvers.** *Journal of Sustainable Shipping*, 2021.

SMITH, L.; et al. **Real-time digital twin for berth allocation and vessel scheduling.** *Transportation Research Procedia*, 2021.

TAO, Fei et al. **Digital twin-driven product design, manufacturing and service.** *CIRP Annals*, 2018.

VASQUEZ, M.; et al. **Cross-port digital twin networks for supply chain visibility.** *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 2024.