

El papel del gemelo digital en la resolución de los problemas medioambientales portuarios

The role of the digital twin in solving port-related environmental problems

O papel do digital twin na solução de problemas ambientais relacionados ao porto

Recebido
Received
Recibido
Jun. 2024

Aceito
Accepted
Aceptado
Nov. 2024

Publicado
Published
Publicado
Jan./Mar. 2025
Ene./Mar. 2025

<https://git.fateczl.edu.br>

e_ISSN
2965-3339

DOI
10.29327/2384439.3.2-5

São Paulo
v. 3 | n. 2
v. 3 | i. 2
e32379
Janeiro-Março
January-March
Enero-Marzo
2025



Ivyn Carvalho dos Santos¹

ivyn.santos@fatec.sp.gov.br

Karina Almeida França¹

karina.almeida3@fatec.sp.gov.br

Diego Bossa Carvalho¹

diego.carvalho7@fatec.sp.gov.br

Alexandre Machado¹

alexandre.machado01@fatec.sp.gov.br

1 – Fatec Rubens Lara

Resumen:

Destacando la importancia de la industria portuaria en el escenario global y destacando los desafíos ambientales asociados con sus operaciones, este artículo presenta el concepto de Gemelo Digital como una herramienta crucial para promover la sostenibilidad portuaria, permitiendo un monitoreo, análisis y simulación detallados en tiempo real. La implementación del Gemelo Digital permite mejoras en la eficiencia energética, reducción de emisiones de carbono y mitigación de impactos ambientales, además de representar una transformación significativa en la forma en que se llevan a cabo las operaciones portuarias. También destaca los beneficios en términos de sostenibilidad ambiental, eficiencia operativa y responsabilidad social que esta tecnología puede ofrecer a la industria portuaria. Para ello, la metodología aplicada fue la revisión analítica de la literatura, con un enfoque cualitativo y prácticas observadas en el mercado, que contribuyen a una mejor comprensión de este estudio.

Palabras clave: Gemelo Digital; Industria Portuaria; Sostenibilidad Ambiental; Eficiencia Operativa, Transformación Digital.

Abstract:

Highlighting the importance of the port industry on the global stage and highlighting the environmental challenges associated with its operations, this article presents the concept of Digital Twin as a crucial tool for promoting port sustainability, enabling detailed monitoring, analysis and simulation in real time. The implementation of Digital Twin enables improvements in energy efficiency, reduction of carbon emissions and mitigation of environmental impacts, in addition to representing a significant transformation in the way port operations are conducted. It also highlights the benefits in terms of environmental sustainability, operational efficiency and social responsibility that this technology can offer the port industry. To this end, the methodology applied was an analytical bibliographic review, with a qualitative approach and practices observed in the market, which contribute to a better understanding of this study.

Keywords: *Digital Twin; Port Industry; Environmental Sustainability; Operational Efficiency; Digital Transformation.*

Resumo:

Destacando a importância da indústria portuária no cenário global e ressaltando os desafios ambientais associados a suas operações, este artigo apresenta o conceito de Digital Twin como uma ferramenta crucial para promover a sustentabilidade portuária, permitindo monitoramento, análise e simulação detalhados em tempo real. A implementação do Digital Twin possibilita melhorias na eficiência energética, redução de emissões de carbono e mitigação de impactos ambientais, além de representar uma transformação significativa na forma como as operações portuárias são conduzidas. Ainda destaca os benefícios em termos de sustentabilidade ambiental, eficiência operacional e responsabilidade social que essa tecnologia pode oferecer à indústria portuária. Para tanto, a metodologia aplicada foi a revisão bibliográfica analítica, com abordagem qualitativa e práticas observadas no mercado, as quais contribuem para um melhor entendimento desse estudo.

Palavras-chave: *Digital Twin; Indústria Portuária; Sustentabilidade Ambiental; Eficiência Operacional; Transformação Digital.*

1. INTRODUCCIÓN

La industria portuaria desempeña un papel crucial en el escenario mundial, impulsando el comercio y el desarrollo económico. Sin embargo, la actividad no está exenta de importantes costes medioambientales. La contaminación del aire es una preocupación principal, y las operaciones portuarias son una fuente considerable de emisiones de contaminantes como óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, partículas y compuestos orgánicos volátiles, lo que afecta negativamente la calidad del aire local y plantea riesgos para la salud respiratoria de las comunidades circundantes. Además, la contaminación del agua es un problema crítico, ya que las descargas de aguas residuales, los derrames de combustible y los productos químicos contaminan los cuerpos de agua adyacentes, dañan la vida marina y comprometen la calidad del agua, lo que representa riesgos para la salud humana.

La construcción de infraestructuras portuarias, como muelles, también puede desencadenar la erosión costera y la alteración de los hábitats naturales, aumentando la vulnerabilidad de las comunidades costeras ante eventos extremos. Por último, el ruido y las vibraciones resultantes de las operaciones portuarias plantean otro desafío ambiental, que afecta negativamente a la vida silvestre, las comunidades locales y la salud de los trabajadores portuarios. Comprender y mitigar estos problemas ambientales es esencial para garantizar la sostenibilidad de la industria portuaria y minimizar sus impactos adversos en los ecosistemas circundantes y la salud humana.

Las tecnologías digitales desempeñan un papel crucial en la promoción de la sostenibilidad al ofrecer soluciones innovadoras para abordar los desafíos ambientales globales. El Internet de las cosas (IoT), el análisis de big data, la inteligencia artificial y las redes inteligentes permiten la monitorización medioambiental en tiempo real, la optimización de recursos, la gestión eficiente de la energía y los residuos, y la planificación urbana sostenible. Estas tecnologías facilitan la transición a las energías renovables, promueven la eficiencia energética, reducen las emisiones de carbono e impulsan prácticas empresariales e industriales más responsables, que son esenciales para lograr un futuro sostenible y resiliente.

Este artículo tiene como objetivo explorar los conceptos del Gemelo Digital y su aplicación en las operaciones portuarias, con el objetivo de comprender cómo actúa esta tecnología en la planificación de cuestiones ambientales vinculadas al puerto, como la emisión de gases contaminantes y la gestión de recursos.

De acuerdo con Gil (2002), el objetivo de la investigación científica es ordenar los hechos que involucran un fenómeno, con el fin de explicarlo de manera objetiva y libre de imprecisiones. Para hacer esto, se requieren uno o más métodos de origen lógico. La metodología utilizada en este estudio consistió en un enfoque cualitativo, con énfasis en la investigación netamente bibliográfica, método descrito por Fonseca (2002) como el proceso de recolección de datos e información de fuentes técnicas, como libros y artículos académicos, para obtener conocimiento previo sobre un problema específico.

El análisis de los datos se basó en una revisión crítica y sistemática de la literatura

pertinente al tema en cuestión, con el objetivo de una comprensión profunda y contextualizada de los fenómenos abordados.

La mejora de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones de carbono son objetivos cruciales en la lucha contra el cambio climático. El gemelo digital, al monitorear el rendimiento energético e identificar áreas de optimización, permite ajustes precisos para reducir el consumo de energía y minimizar las emisiones asociadas con las operaciones industriales. Sus capacidades de modelado y simulación virtual contribuyen a la implementación de estrategias de conservación de energía y evaluación de escenarios alternativos, emergiendo como una poderosa herramienta en la promoción de la sostenibilidad y la eficiencia energética, impulsando la innovación y la transformación digital en diversas industrias. Sus capacidades de monitoreo, análisis y simulación brindan oportunidades sin precedentes para abordar los desafíos ambientales globales y crear un futuro más sostenible y resiliente para el planeta.

2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1 Indústria 4.0 y Gemelo Digital

La Industria 4.0, también conocida como la cuarta revolución industrial, representa una transformación significativa en la forma en que se llevan a cabo las operaciones industriales, impulsada por la interconexión de tecnologías avanzadas, inteligencia artificial y robótica.

Este paradigma busca integrar sistemas autónomos a través de datos analíticos y diagnósticos operativos, creando una red de comunicación que conecte máquinas y transmita grandes volúmenes de datos de diversas fuentes. Esta interconexión forma una "copia" digital de la realidad, como lo describe O'Connell (2019).

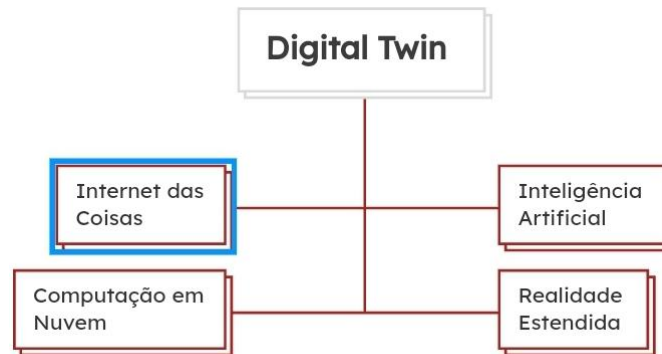
La tecnología de gemelos digitales tiene como objetivo crear una representación digital precisa de objetos, sistemas y entornos físicos, basada en datos recopilados en tiempo real y modelos virtuales, replicando y simulando las características del objeto, permitiendo el análisis y procesamiento de actividades, revolucionando la forma en que las operaciones se realizaban anteriormente de forma manual, reduciendo el riesgo de fallas y proporcionando importantes beneficios a las empresas (Correa, 2019).

Introducido por primera vez en la década de 2000 por Michael Grieves, profesor de la Universidad de Michigan, y según lo descrito por Lv y Xie (2021), el Gemelo Digital se basa en tres aspectos relacionados con el procesamiento de datos utilizado en su funcionamiento: adquisición, modelado y aplicación, que se basan en cuatro tecnologías básicas: Internet de las cosas, Cloud Computing, Inteligencia artificial y realidad extendida (Attaran y Celik, 2023).

El Internet de las Cosas se utiliza como componente principal en cualquier aplicación que involucre tecnología de Gemelo Digital, ya que proporciona una red de conexiones entre sensores, programas e interfaces (entre otros componentes) que permiten la integración involucrando todo lo que compone el

proceso en el que se encuentran (Gillis, 2021).

Figura 1 – Organigrama tecnológico del *gemelo digital*



Fuente: elaboración propia (2024)

La computación en la nube permite el almacenamiento y el procesamiento de grandes cantidades de datos, recopilados por sensores y otra maquinaria de monitoreo. A continuación, la información es procesada por una Inteligencia Artificial de forma rápida y eficaz sin necesidad de intervención directa por parte de ningún usuario o moderador de forma continuada. (Ray, 2018).

Por último, la Realidad Extendida proporciona una presentación visual de la simulación, según Steuer (1992), basada en una experiencia interactiva en la que cada cambio y consecuencia pueden ser probados antes de una decisión final.

Como herramienta, esta tecnología tiene como mayor atractivo la simulación. Ya que la experimentación en un entorno virtual permite un análisis profundo de cualquier cambio propuesto en el entorno que se simula, sin exponer la ubicación o la mano de obra a posibles averías o fatalidades.

2.2 Usos Generales

Actualmente, según Attaran y Celik (2023), los gemelos digitales son ampliamente utilizados en diversos sectores, como la fabricación, la construcción, el transporte, la salud y la energía, y se utilizan para monitorear el rendimiento, predecir fallas, realizar simulaciones y optimizar procesos.

El estudio realizado por Capgemini (2022) apunta a un aumento proyectado del 36% en la adopción de la tecnología Gemelo Digital en los próximos cinco años. Este crecimiento se observa en una variedad de industrias, como la automotriz, aeroespacial, ciencias de la vida, energía y servicios públicos. El impulso detrás de este movimiento se atribuye a las empresas que buscan avanzar en sus iniciativas de transformación digital, con el objetivo de incorporar la inteligencia en cada etapa de la cadena de valor de sus operaciones.

En la industria manufacturera se utilizan para replicar digitalmente procesos de producción, máquinas e incluso productos terminados. Permiten a los fabricantes monitorear el rendimiento en tiempo real de las líneas de producción,

identificar cuellos de botella, optimizar el uso de recursos y anticipar posibles fallas. Además, los gemelos digitales se pueden utilizar para simular diferentes escenarios de producción, probar nuevos diseños de productos y realizar análisis de eficiencia energética (Capgemini, 2022).

En el ámbito sanitario, los gemelos digitales se han aplicado para crear modelos virtuales de pacientes, órganos o sistemas biológicos. Esto permite a los proveedores de atención médica realizar un seguimiento del estado de salud en tiempo real, predecir tendencias y desarrollar planes de tratamiento personalizados. Los gemelos digitales también se utilizan para simular procedimientos quirúrgicos complejos, capacitar a cirujanos y probar nuevas terapias o dispositivos médicos antes de su implementación en el mundo real (Capgemini, 2022).

Los gemelos digitales desempeñan un papel clave en la industria energética, ya que permiten a las empresas monitorear y controlar de forma remota el funcionamiento de activos como turbinas eólicas, paneles solares, redes y centrales eléctricas. Ayudan con la detección temprana de fallas, el mantenimiento predictivo y la optimización del rendimiento, lo que contribuye a la eficiencia operativa y reduce los costos de mantenimiento. Además, los Gemelos Digitales se utilizan para simular escenarios de demanda y suministro de energía, apoyando la planificación estratégica y la toma de decisiones en el sector energético (Capgemini, 2022).

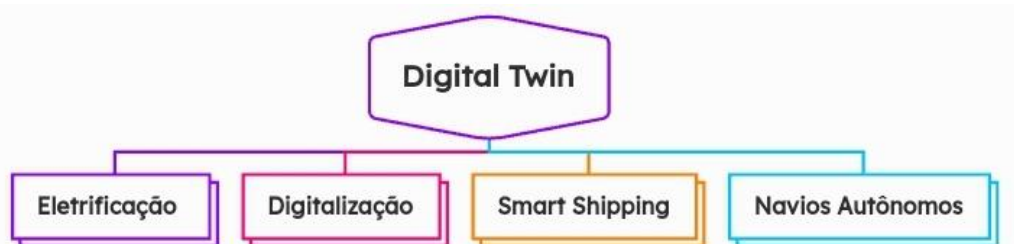
3. MÉTODO

3.1 La idoneidad del gemelo digital en los puertos

De acuerdo con Lind et al. (2020), en la industria portuaria se utiliza el concepto de Gemelo Digital para realizar análisis orientados a optimizar las operaciones y el monitoreo eficiente de la flota y la carga. El modelo permite una simulación y monitorización precisas de las actividades portuarias, contribuyendo a la mejora continua de los procesos y al aumento de la eficiencia operativa.

Según Madusanka et al. (2023), la industria de la construcción naval ha seguido un proceso lógico de adaptación de la tecnología en buques y puertos.

Figura 2. Pasos en el proceso de adaptación del buque



Fuente: elaboración propia (2024)

La electrificación de los buques más modernos se centra en el sistema de

propulsión, con el fin de sustituir el combustible derivado del petróleo (Diesel) por un sistema de propulsión 100% eléctrico, con el fin de resolver el problema de las emisiones de gases nocivos a la atmósfera terrestre (Sulligoi et al, 2022).

En los puertos, según Gasparotti et al (2023), al ser la mejor solución para optimizar las operaciones, la digitalización es un factor crítico para alcanzar los objetivos relacionados con la competitividad de la industria portuaria. Sus principales objetivos son la mayor eficacia y eficiencia de las cadenas logísticas y la reducción de los impactos ambientales de la industria en su conjunto, desde la transmisión de información en tiempo real a todas las partes interesadas y a los centros de análisis y procesamiento de datos para su automatización.

El *Smart Shipping* consiste básicamente en una red digital interconectada por sensores y centros de procesamiento de datos que utilizan la arquitectura de conexión de la tecnología 5G (Bányai et al, 2022), entre sus aplicaciones, según Ahn et al, se encuentra el monitoreo en tiempo real de la carga portuaria en una ruta marítima, proporcionando ubicación, y lecturas de las condiciones físicas de la carga como la temperatura, humedad, niveles de oxígeno u otros componentes químicos dentro del contenedor (Sikorski et al, 2017). Esta tecnología no solo se implementa en contenedores y carga, los buques autónomos, conocidos como MASS (*Maritime Autonomous Surface Ships*) también utilizan esta infraestructura digital, en conjunto con herramientas como GPS (localización y triangulación de rutas), radares, sonares y AIS (Sistema de Identificación Automática), con el objetivo de proporcionar y recopilar datos de navegación para la planificación de rutas y previsiones de llegadas y arribajos a puertos (Blanke et al, 2020).

La idoneidad de la industria marítima para el uso de herramientas digitales en sus operaciones se centra en la implementación de normas relacionadas con la sostenibilidad ambiental y sus impactos en la competitividad portuaria en relación con los competidores, amenaza de pérdida de clientela si no están sujetos a cambios y posibles incidentes diplomáticos en el mercado internacional.

3.2 Gemelo digital y Sostenibilidad Ambiental

El sector marítimo, uno de los mayores emisores de CO₂ y GEI (*Gases de Efecto Invernadero*) en la actualidad, tiene como uno de sus principales objetivos implementar soluciones a corto, mediano y largo plazo para reducir las emisiones de gases nocivos, ya que la OMI (*Organización Marítima Internacional*) ha estipulado el objetivo de cero emisiones para 2050 (Mavrakos et al, 2024).

Una de estas soluciones es la aplicación de la tecnología Gemelo Digital en puertos y buques con el fin de evitar tiempos de espera en las entradas de las terminales de forma que se redunde en un ahorro de combustible para los buques y de energía en las terminales. Con un menor consumo de combustible, alternativo o no, una rutina de operación más dinámica reduce las emisiones resultantes de la actividad naval.

Según Ünal y Albayrak (2023), debido a su característica de optimización de operaciones, el Gemelo Digital es una herramienta viable para la implementación

de procesos avanzados de conectividad entre todos los involucrados en una cadena logística, de manera que el uso de los recursos se produce sin desperdicio ya que los pedidos y procesos de fabricación tienen previsiones basadas en la demanda.

El análisis predictivo de esta tecnología ayuda a prevenir cualquier factor que pueda provocar anomalías y desperdicios en los procesos en los que se implementa, reduciendo los costos de mantenimiento, deteniendo retrasos y demoras en las operaciones, mejorando la gestión de riesgos de los procedimientos analizados, resultando en ahorros de capital y energía y menores emisiones o eliminación de materiales no reutilizables (Agrawal, 2023).

Según García Cano (2023), la industria del petróleo y el gas, en los últimos años, ha estado utilizando el Gemelo Digital en sus instalaciones para identificar puntos de emisión excesiva de carbono y optimizar procesos y operaciones mientras recopila y proporciona detalles sobre ellos en tiempo real.

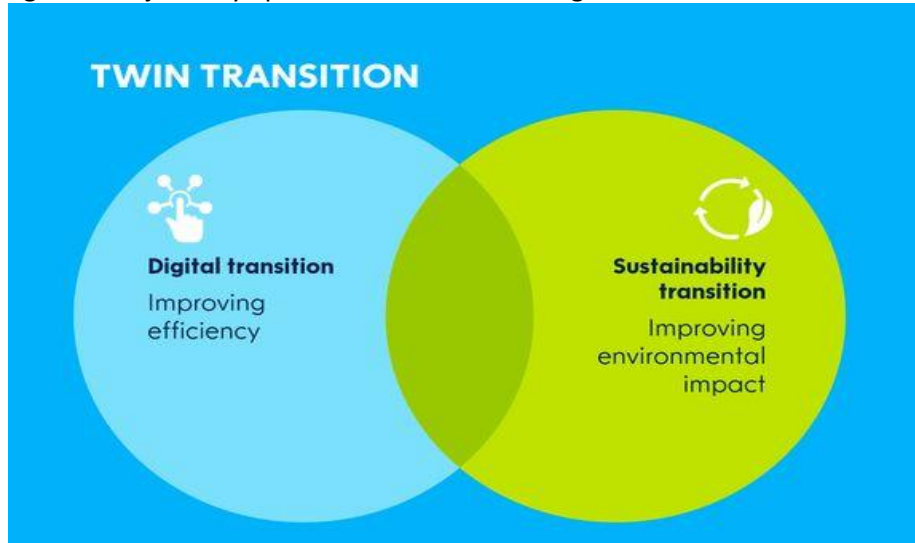
El Gemelo Digital ofrece un potencial para las operaciones realizadas en la modalidad "Just in time" (En el momento adecuado – Modalidad sin tiempo de espera, excepto en presencia de imprevistos), cuando se utiliza en los puertos, el sistema detecta la llegada y salida de los buques, transmitiendo la lista de horarios a la autoridad portuaria para la mejora en la programación de las operaciones en el puerto. En los buques, una vez integrados en una red, los avisos sobre retrasos, retrasos y posibles avances promovidos por las operaciones rápidas pueden ayudar a controlar el uso de recursos como el combustible, ayudando en el objetivo de reducir las emisiones.

4. RESULTADOS E DISCUSIÓN

4.1 Mini estudio de caso: Rotterdam

El Puerto de Rotterdam, en los Países Bajos, es el pionero en el uso del Gemelo Digital en sus operaciones, según la Autoridad Portuaria de Róterdam, el Puerto invierte en digitalización y automatización en conjunto con promover la transición al uso de combustibles alternativos con el fin de alcanzar el objetivo establecido por la OMI (*Organización Marítima Internacional*) de cero emisiones de carbono en un plazo de 30 años.

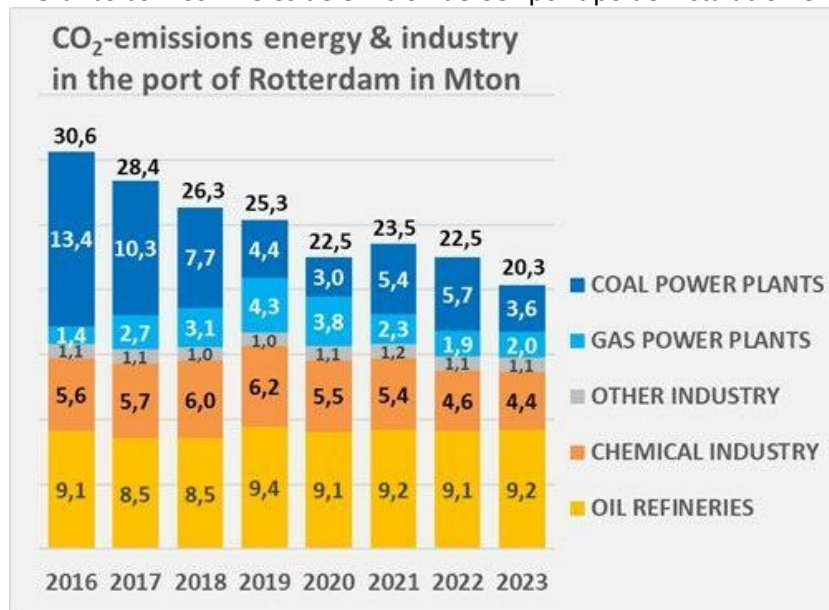
Figura 3. Objetivos y aplicaciones del Gemelo Digital en el Puerto de Róterdam



Fuente: Puerto de Rotterdam (2023)

En 2023, la autoridad portuaria de Rotterdam informó de una disminución del 10% en las emisiones de CO² en comparación con el año anterior y de alrededor del 32% en comparación con 2016.

Figura 4. Gráfico con los niveles de emisión de CO² por tipo de instalación energética



Fuente: Puerto de Rotterdam (2023)

La digitalización se centra en promover una red de comunicación rápida sin necesidad de documentación física, y en monitorizar la infraestructura para identificar los puntos de emisiones excesivas que necesitan reparación y mantenimiento.

En abril de 2024, la Autoridad Portuaria de Rotterdam anuncia el inicio de la fase de prueba de una integración digital entre los puertos fluviales de los Países Bajos que operan en el río Reno y el Puerto de Rotterdam, el objetivo de este proyecto

es crear un "pasillo digital" para el intercambio de información entre los buques que navegan entre estos puertos, y sus terminales, haciendo posible un flujo de datos en tiempo real en esta red, que alimenta los sistemas digitales que gobiernan los puntos autónomos de operaciones, y también se puede utilizar para agilizar la escala portuaria, reduciendo la duración de la estancia de los buques y sus emisiones de gases nocivos.

La optimización del proceso de entrada y salida de buques (*Port Call Optimization*), el puerto de Rotterdam prevé que la eficiencia del procedimiento permitirá realizar operaciones en la modalidad "Just In Time" (donde el puerto está siempre disponible para el atraque), reduciendo el consumo de combustible hasta en un 14% en los buques portacontenedores. Este proceso será factible a partir de la recopilación y transferencia de datos en tiempo real entre buques, terminales y puertos para la integración satisfactoria de las operaciones de racionalización (Puerto de Rotterdam, 2023).

En Rotterdam, el Gemelo Digital, todavía en sus primeras etapas, aunque avanzado en comparación con el resto del mundo, tiene como foco principal ser utilizado como herramienta para la creación de una red única entre puertos, donde la transmisión rápida de datos permite un flujo continuo de operaciones realizadas sin retrasos, ni demoras, y la comunicación inmediata de imprevistos para que el sistema se autorregule con la ayuda de la tecnología de análisis y simulación Gemelo Digital.

5. CONCLUSIÓN

La industria portuaria, como pieza clave del escenario mundial, desempeña un papel crucial en la promoción del comercio y el desarrollo económico. Sin embargo, esta actividad no se lleva a cabo sin importantes costos ambientales. La contaminación del aire y el agua, la erosión costera, la alteración de los hábitats naturales y el ruido son solo algunos de los desafíos ecológicos que enfrentan los puertos, afectando negativamente el medio ambiente y la salud de las comunidades circundantes.

Sin embargo, las tecnologías digitales emergen como aliadas en la búsqueda de soluciones sostenibles a estos desafíos ambientales. A través de la implementación de herramientas como el Gemelo Digital, los puertos pueden mejorar significativamente su gestión ambiental y reducir su impacto en el medio ambiente. Esta tecnología permite el monitoreo en tiempo real de los parámetros ambientales, la simulación de escenarios y la identificación de oportunidades para la optimización de recursos.

El presente estudio exploró los conceptos del Gemelo Digital y su aplicación en la industria portuaria, destacando su potencial para abordar problemas ambientales complejos. Al analizar los beneficios y desafíos asociados a la implementación del Gemelo Digital en los puertos, se pudo entender cómo esta tecnología puede contribuir a una gestión más sostenible y eficiente de las operaciones portuarias.

Además, la metodología utilizada en este estudio, basada en un enfoque

qualitativo y en la investigación bibliográfica, proporcionó una comprensión profunda y contextualizada de los fenómenos abordados. El análisis crítico de la literatura pertinente al tema permitió una evaluación rigurosa de los aspectos teóricos y prácticos del Gemelo Digital en la industria portuaria.

La sostenibilidad en puertos y terminales no es solo una opción ética, sino también una necesidad estratégica. A medida que abordamos los desafíos urgentes del cambio climático, la degradación ambiental y la escasez de recursos, es imperativo que se adopten prácticas que promuevan la prosperidad económica, la equidad social y la salud del planeta. Los puertos y las terminales tienen un papel crucial que desempeñar en este esfuerzo colectivo, y es fundamental que se trabaje juntos para construir un futuro más sostenible y resiliente para todos.

La implementación de *gemelos digitales* en puertos y terminales marítimas ofrece una serie de beneficios significativos. Al proporcionar una representación virtual precisa de los activos y procesos, el *gemelo digital* permite una gestión más eficiente e inteligente de las operaciones portuarias. Esto se traduce en una serie de ventajas, como la optimización del flujo de carga, la prevención de la congestión, la mejora de la seguridad y la reducción de los costes operativos. Sin embargo, es importante reconocer que la implementación de *gemelos digitales* en puertos y terminales también presenta desafíos e inconvenientes. Uno de los principales retos es la integración de los sistemas y la recopilación de datos en un entorno portuario a menudo complejo y heterogéneo.

En definitiva, la implementación de *gemelos digitales* en puertos y terminales marítimas surge como una estrategia viable y prometedora para promover la sostenibilidad en estas infraestructuras vitales. Si bien ofrece una serie de beneficios tangibles, como una mayor eficiencia operativa y una reducción de costos, también presenta desafíos significativos, especialmente en términos de integración de sistemas y recopilación de datos. Sin embargo, dada la urgencia de las cuestiones ambientales y la necesidad de promover prácticas sostenibles, es imperativo superar estos obstáculos. Por lo tanto, la adopción de *gemelos digitales* representa no solo una oportunidad para optimizar las operaciones, sino también un paso crucial hacia un futuro más resistente y ecológico para los puertos y terminales marítimas.

Ante los retos medioambientales cada vez más acuciantes, la implementación del Gemelo Digital surge como una estrategia prometedora para promover la sostenibilidad y la eficiencia operativa de los puertos. Al aprovechar el potencial de esta tecnología innovadora, los puertos pueden avanzar hacia un futuro más sostenible y resiliente, beneficiando no solo al medio ambiente, sino también a las comunidades locales y a la economía mundial en su conjunto.

REFERENCIAS

AGRAWAL, V. Council. **Decarbonization in the Industrial Sector: How Digital Twins Can Support Sustainability Efforts.** 2023. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2023/12/04/decarbonization-in-the->

[industrial-sector-how-digital-twins-can-support-sustainability-efforts/?sh=4da4efe635bf](#). Acesso em: 5 mai. 2024.

AGUIAR, C., Leonardo de. **Método Para Formulação De Pacotes De Trabalho Para Obras Repetitivas Com O Uso Do BIM 4D**. 2019.

AHN, Y.-G. et al. **A Study on the Development Priority of Smart Shipping Items** - Focusing on the Expert Survey. Sustainability, v. 14, n. 11, p. 6892, 5 jun. 2022.

ATTARAN, M.; CELIK, B. G. **Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and Opportunities**. Decision Analytics Journal, v. 6, p. 100165, jan. 2023.

BALCOMBE, P. et al. **How to Decarbonise International shipping**: Options for fuels, Technologies and policies. Energy Conversion and Management, v. 182, p. 72–88, fev. 2019.

BÁNYAI, T.; BÁNYAI, Á.; KACZMAR, I. **Supply Chain**: Recent Advances and New Perspectives in the Industry 4.0 Era. [s.l.] BoD – Books on Demand, 2022.

BATALDEN, B.; LEIKANGER, P.; WIDE, P. **Towards Autonomous Maritime Operations**. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7995339>. Acesso em: 4 mai. 2024.

BLANKE, M.; HENRIQUES, M.; BANG, J. **A pre-analysis on Autonomous ShipsDanish Maritime Authority**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: https://www.dma.dk/Media/637745503398246035/Autonomie%20skibe_DTU_rapport_UK.pdf. Acesso em: 4 mai. 2024.

BRASIL, N. U. **Empresas Se Juntam À ONU Para Acelerarem Ações Pela Sustentabilidade**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/152389-empresas-se-juntam-%C3%A0-onu-para-acelerarem-a%C3%A7%C3%B5es-pela-sustentabilidade>. Acesso em: 5 abr. 2024.

FONSECA, J. J. S. **METODOLOGIA DA PESQUISA CIENTÍFICA**. [s.l.] UEC - Universidade Estadual do Ceará, 2002. Disponível em: <http://www.ia.ufrj.br/ppgea/conteudo/conteudo-2012-1/1SF/Sandra/apostilaMetodologia.pdf>. Acesso em: 9 abr. 2024.

GARCIA CANO, L. R. **How Digital Twins Can Make Decarbonization a Reality in the Oil and Gas Industry**. Disponível em: <https://www.iotworldtoday.com/iiot/how-digital-twins-can-make-decarbonization-a-reality-in-the-oil-and-gas-industry-#close-modal>. Acesso em: 5 mai. 2024.

GASPAROTTI, C. et al. **Ports Digitization-A Challenge for Sustainable**. Development Romanian Journal of Economic Forecasting -XXVI (2) 2023 PORTS DIGITIZATION - A CHALLENGE FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT Romanian Journal of Economic Forecasting. [s.l: s.n.]. Disponível em: https://ipe.ro/rjef/rjef2_2023/rjef2_2023p143-160.pdf. Acesso em: 4 mai. 2024.

GIL, A. A. C. **Como Elaborar Projetos De pesquisa**. [s.l.] Éditeur: São Paulo: Atlas, 2010.

GILLIS, A. **What Is IoT (Internet of Things) and How Does It Work?** Disponível em: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Internet-of-Things-IoT>. Acesso em: 28 mar. 2024.

GRIEVES, M. W. **Virtually Intelligent Product Systems: Digital and Physical Twins**. Complex Systems Engineering: Theory and Practice, p. 175–200, jan. 2019.

IBM. **IBM**. United States. Disponível em: <https://www.ibm.com/us-en>. Acesso em: 4 jan. 2024.

IMO. **Autonomous Shipping**. International Maritime Organization, 2024. Disponível em: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>. Acesso em: 11 abr. 2024.

LIND, M. et al. **Digital Twins for the Maritime Sector**. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Mikael-Lind/publication/343382513_Digital_twins_for_the_maritime_sector/links/5f26ab96a6fdcccc43a2d7b1/Digital-twins-for-the-maritime-sector.pdf. Acesso em: 10 abr. 2024.

LV, Z.; XIE, S. **Artificial intelligence in the digital twins: State of the art, challenges, and future research topics**. Digital Twin, v. 1, p. 12, 24 dez. 2021.

MACEDO, C. **60% Das Organizações Adota Tecnologia Digital Twins Para Alcançar Objetivos De Sustentabilidade**. Disponível em: <https://www.ambientemagazine.com/60-das-organizacoes-adota-tecnologia-digital-twins-para-alcancar-objetivos-de-sustentabilidade/>. Acesso em: 4 abr. 2024.

MADUSANKA, N. S. et al. **Digital Twin in the Maritime Domain: A Review and Emerging Trends**. Journal of Marine Science and Engineering, v. 11, n. 5, p. 1021, 1 maio 2023.

MAVRAKOS, A. S. et al. **A Digital Twin Approach for Selection and Deployment of Decarbonization Solutions for the Maritime Sector**. Disponível em: <https://www.igi-global.com/chapter/a-digital-twin-approach-for-selection-and-deployment-of-decarbonization-solutions-for-the-maritime-sector/344076>. Acesso em: 5 mai. 2024.

NEDERLANDSE EMISSIEAUTORITEIT. **About the NEa** - Dutch Emissions Authority. Disponível em: <https://www.emissionsauthority.nl/about-the-nea>. Acesso em: 4 maio. 2024.

O'CONNELL, E. et al. **Digital Twins: Enabling Interoperability in Smart Manufacturing Networks**. Telecom, v. 4, n. 2, p. 265–278, 1 jun. 2023.

PORT OF ROTTERDAM . **10% decrease in port of Rotterdam CO2 emissions in 2023** | Port of Rotterdam. Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/10-decrease-port-rotterdam-co2-emissions-2023>. Acesso em: 10 mai. 2024.

PORT OF ROTTERDAM. **Testing for digital sea and inland port networking has commenced** | Port of Rotterdam. Disponível em: <https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/testing-digital-sea-and-inland-port-networking-has-commenced>. Acesso em: 10 mai. 2024.

RAY, P. P. **An Introduction to Dew Computing: Definition, Concept and Implications**. IEEE Access, v. 6, p. 723–737, 2018.

SIKORSKI, J. J.; HAUGHTON, J.; KRAFT, M. **Blockchain Technology in the Chemical industry: Machine-to-machine Electricity Market**. Applied Energy, v. 195, n. 195, p. 234–246, jun. 2017.

STEUER, J. **Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence**. Journal of Communication, v. 42, n. 4, p. 73–93, dez. 1992.

SULLIGOI, G.; VICENZUTTI, A.; MENIS, R. **All-Electric Ship Design: from Electrical Propulsion to Integrated Electrical and Electronic Power Systems** | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7530867>. Acesso em: 10 abr. 2024.

ÜNAL, A. F.; ALBAYRAK, Ö.; ÜNAL, P. **Impact of Digital Twin Technology Utilization in Manufacturing on Sustainability: an Industrial Case Study** | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10216885>. Acesso em: 5 mai. 2024.

ZAVVOS, E. et al. **Digital Twins for Synchronized Port-Centric Optimization Enabling Shipping Emissions Reduction**. Disponível em: <https://www.igi-global.com/chapter/digital-twins-for-synchronized-port-centric-optimization-enabling-shipping-emissions-reduction/344081>. Acesso em: 5 mai. 2024.