El Gemelo Digital como herramienta de colaboración Puerto – Ciudad

Introducción

Los puertos de hoy en día son ecosistemas logísticos complejos y tecnológicamente avanzados donde múltiples actores operan en interacción continua en torno al flujo de mercancías a lo largo de la cadena de suministro. Sin embargo, muy a menudo, éstos operan individualmente con sus procesos, información y datos en silos aislados, inhibiendo la optimización y visibilidad de las operaciones.

En las ciudades portuarias, este “aislamiento” se traslada con frecuencia a la interacción de la infraestructura portuaria con la ciudad. El paradigma de los puertos comerciales modernos como entidades que han evolucionado, a distintos niveles, a espaldas de su entorno circundante, se traslada al entorno de la digitalización y el manejo de información relevante para ambas partes.

En este contexto, los Gemelos Digitales emergen como una herramienta habilitadora que permite integrar, procesar y coordinar información histórica y en tiempo real de los diferentes elementos físicos y partes interesadas que interactúan en los Puertos y su entorno, proporcionando beneficios a ambas partes.

Este comportamiento permite aportar valor añadido y cambiar el paradigma de toma de decisiones para todos los *stakeholders*, ahora capaces de visualizar infraestructura, procesos, y flujos en tiempo real (“Live Mirroring”), y generar y probar escenarios en un entorno virtual, libre de riesgo, a través de simulación y emulación. La integración de las tecnologías de Inteligencia Artificial y Machine Learning permiten incorporar inteligencia prescriptiva y predictiva en estos procesos.

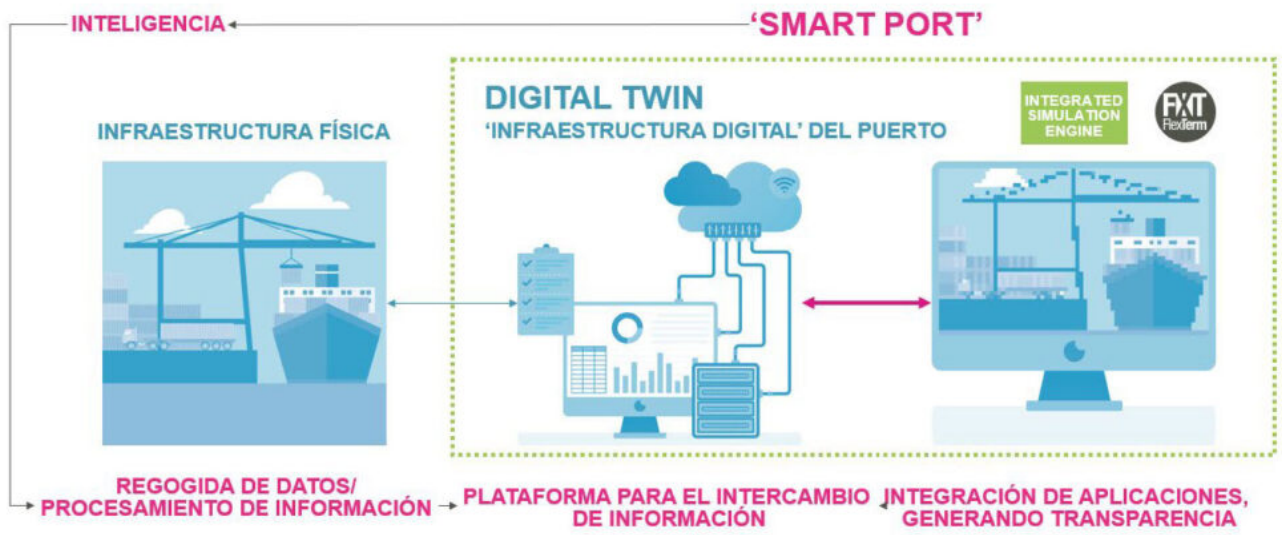
Definición

Para abordar esta cuestión, comenzaremos definiendo el elemento clave de nuestra proposición: ¿Qué es el Gemelo Digital?

Desde las primeras referencias a este término, en la década de 1990, se han planteado diversas definiciones en la literatura, cuyo análisis nos permite definir el Gemelo Digital en torno a tres ideas fundamentales:

- La conceptualización del Gemelo Digital como representación virtual de una realidad física; un sistema conectado a su representación digital, en la que cada uno de sus elementos se encuentra reflejado en su gemelo;
- Ambas realidades, física y digital, se intercomunican de manera constante (“Live Mirroring”), replicando su comportamiento;
- Esta comunicación continua permite a su vez la integración de distintas fuentes de información, tales como planos, modelos BIM, sensores, herramientas IoT, o el “sistema operativo” de los puertos, el TOS.

La integración de información y réplica de comportamientos en un entorno virtual elevan el rol del Gemelo Digital desde una herramienta de visualización, dotándola de capacidad de análisis, incrementando exponencialmente el potencial que ofrece para asistir en la toma de decisiones a corto, medio, y largo plazo.



Gemelo Digital como Infraestructura Digital del Puerto. (Fuente: Moffatt & Nichol,

2021).

Basándonos en esta definición, la implementación del Gemelo Digital en entornos reales tendrá que responder a dos cuestiones fundamentales:

- ¿Por qué implementarlo? Es decir, identificar y cuantificar los beneficios de su implementación para las partes involucradas;
- ¿Cómo llevar a cabo esta implementación? Cuáles son las tecnologías y procedimientos disponibles para llevar a cabo la implementación necesaria para obtener los beneficios y utilidades identificados para cada caso específico.

La respuesta a ambas ha de ser satisfactoria en cada caso de uso para los actores involucrados, ofreciendo una implementación sostenible, ofreciendo valor a su caso de uso. En el caso de los puertos que desarrollan su actividad en el entorno de las ciudades esta sostenibilidad adquiere un relieve especialmente importante y tendrá que estar sustentada necesariamente en sus tres pilares:

- Ambiental
- Económico
- Social

Entorno de aplicación: valor añadido de los Gemelos Digitales en el contexto de colaboración Puerto – Ciudad

Para poder entender la forma en que los Gemelos Digitales pueden contribuir a la relación entre Puerto y Ciudad, es necesario partir del hecho de que los puertos, las ciudades, y sus comunidades no solo comparten un entorno físico, sino que histórica, social y económicamente forman parte el uno del otro.

En este contexto, por parte de los actores de decisión en los Puertos se ha de partir de una concienciación de su propia relevancia y del impacto de su actividad, es decir, del alcance de sus decisiones, en tanto que:

- Cómo se planifican los puertos,

- Cómo se construyen,
- Cuáles son los modelos de gestión que se implementan, y bajo qué condiciones,
- Cómo se operan y planifican en el día a día.

Son decisiones que afectan profundamente, a la par que son afectadas, por lo que sucede en la ciudad que los rodea.

Este análisis no solo se ciñe a la dimensión física de los puertos -infraestructura-, sino que se extiende a su rol como nodos clave en la cadena logística.

Esta eficiencia se refiere a sus operaciones del día a día:

- Estando afectadas por la presión del comercio global (incremento de volúmenes, tamaño de los buques y requisitos de las visitas), y su conexión con *hinterland* y *foreland* en cadenas logísticas cada día más largas y sofisticadas;
- Ejerciendo un impacto en las ciudades (incremento del flujo de camiones, la congestión, el ruido y las emisiones en la vialidad circundante a los puertos);
- Atrayendo picos de intensa actividad asociada al tránsito de pasajeros y usos de la infraestructura de la ciudad (terminales de cruceros-transbordadores).

Asimismo, la urgencia por la eficiencia se traslada a la estrategia a largo plazo de los puertos como una necesidad de optimizar los usos del espacio en la interfaz marítimo-terrestre, de alto valor ambas partes (puerto y ciudad), tomando como consideración que la planificación y desarrollo de los puertos tiene que ser sostenible, para lo que ha de ser flexible.

Propuesta de Valor

La propuesta de valor para la implementación del Gemelo Digital en el entorno portuario entronca en su flexibilidad y escalabilidad espacial y temporal, articulándose en torno a cinco aspectos clave:

La **optimización y planificación basada en datos**, apoyando la transición desde una segregación de información en “silos” a una base de datos unificada, que puede ser una Plataforma para el intercambio colaborativo de datos entre el puerto y su ciudad, tales como tráfico, emisiones, ruido, eventos etc. Este análisis dinámico

puede contribuir a distintos niveles a la relación puerto-ciudad, tales como:

- Identificación de cuellos de botella en la interfaz puerto-ciudad;
- Reducción de tiempos de espera y congestión en los accesos al Puerto (y en consecuencia, de las emisiones y consumo de combustible);
- Optimización del espacio portuario, generando espacios disponibles para el uso de la ciudad en su frente marítimo.

La **consolidación de información**, generando una "copia digital" de la infraestructura, precisa y continuamente conectada, trasladando la toma de decisiones de un estado reactivo a un estado proactivo, basado en información en tiempo real, apoyando la **orquestación de procesos**.

El análisis de estos datos y sistemas en un entorno virtual mediante **simulación y emulación** permite reducir el impacto de la operación de los puertos en su entorno, informando la toma de decisiones en corto, medio, y largo plazo, evaluando sus efectos en un entorno libre de riesgo.

Este escenario de toma de decisiones proactivo, informado y testeado permitirá contribuir a la **sostenibilidad ambiental en el entorno de las ciudades portuarias**, en la medida en que se optimizan las operaciones y procesos, reduciendo emisiones y consumo de combustible y permitiendo, medir, trazar, y predecir el efecto de distintas decisiones en el desempeño ambiental, analizando el cumplimiento de regulaciones y apoyando a la agenda de descarbonización.

Implementación del Gemelo Digital

En este artículo, se presenta la implementación del Gemelo Digital a través de la Plataforma FlexTerm, de análisis de sistemas logísticos complejos que expande el concepto más tradicional del Gemelo Digital como amalgama de herramientas de visualización, evolucionando hacia una plataforma abierta con una potente capacidad de procesamiento que permite considerar las características y comportamiento real de la infraestructura, superestructura, equipamiento y sistemas.

La escalabilidad en su implementación, adaptando su desarrollo a las necesidades

de cada caso de uso se articula en torno a tres posibles fases o etapas:

- Simulación, o análisis dinámico de un sistema real, del que se crea un Modelo digital que sirve de “campo de pruebas virtual” de distintos escenarios, permitiendo visualizarlos en 3D, y obteniendo métricas que se pueden analizar y comparar;
- Emulación, donde este modelo digital se integra con los sistemas de control (TOS) reales, replicando su comportamiento;
- Plataforma integrada, abierta a todo tipo de datos e interfaces en el ecosistema portuario y su entorno, mejorando sus capacidades de visualización y análisis para soporte de toma de decisiones en sistemas complejos, integrando datos a tiempo real (“Live Mirroring”) y permitiendo la integración de IA/ML como una capa de inteligencia predictiva y prescriptiva.

Esta tecnología se ha implementado internacionalmente en instalaciones de distintas características, con distinto alcance de evaluación, apoyando la toma de decisiones a lo largo del ciclo de vida de los puertos y su entorno.

Casos de Uso

A continuación, se muestran algunos casos de uso.

Puerto Coronel, Chile

En Puerto Coronel (Chile), se ha desarrollado una herramienta estratégica para la toma de decisiones en un sistema portuario multipropósito en el entorno urbano con tráfico de contenedores, mercancía general y graneles.

Los elementos analizados incluyeron los componentes del entorno portuario y la red de accesos terrestres pública y privada. Mediante el uso de herramientas de simulación se ha evaluado el entorno portuario (interacción entre modos de transporte y tipos de carga), desarrollando una herramienta intuitiva para el uso del personal, incluyendo un modelo coste-beneficio, visualización de alternativas, identificación de cuellos de botella en distintos puntos del entorno, integrando otras herramientas de análisis (SAP, Excel).

Simulación del proceso de embarque en terminal de cruceros

En este caso, se ha llevado a cabo un estudio de simulación en el Puerto de Cartagena (Colombia), contribuyendo a la preparación de las instalaciones de embarque para acomodar más de 500 escalas y 1 millón de pasajeros al año.

El modelo se empleó para analizar la capacidad de las distintas estaciones de procesamiento, así como los tiempos de espera de los pasajeros durante el embarque y desembarque determinando el número óptimo de estaciones y el tamaño de las áreas de espera, y optimizando la distribución interna de las instalaciones.

En el entorno de los terminales de cruceros es posible diseñar, optimizar y monitorear la infraestructura para reducir el impacto en la ciudad del alto flujo de pasajeros.

Estación intermodal en el Este de Europa

En este caso, el uso de un modelo de simulación permitió validar del modelo de negocio para distintas configuraciones de la Plataforma ferroviaria en la planificación de una Terminal Intermodal en el Este de Europa, definiendo en un entorno libre de riesgo la capacidad y el potencial de cumplimiento de los horarios de los servicios ferroviarios asociados.

Como resultado, se optimizó el coste de desarrollo (CAPEX), así como los recursos y huella de carbono del Proyecto (requisitos de equipamiento), y el espacio requerido, permitiendo incrementar el espacio disponible para otros usos.

Caso de Estudio: Operación Paso del Estrecho

M&N ha participado recientemente en el desarrollo de una plataforma de gestión del interfaz marítimo-terrestre en el entorno puerto-ciudad, usando como caso de estudio la Operación Paso del Estrecho, en el Puerto de Algeciras (España).

Este presenta una gran complejidad, concentrando en el periodo de dos meses hasta 8,500 visitas de buque, 3,3 millones de pasajeros y 750 mil vehículos, con picos de demanda de hasta 11 rotaciones/atraque/día. En este contexto, los cambios en la planificación y ejecución afectan al resto de la operación portuaria,

los usuarios y el entorno urbano, generando congestión, incertidumbre y estrés.



Uso de Simulación en Planificación y Conceptualización: Planificación de Terminal Intermodal y Terminal de Pasajeros. (Fuente: Moffatt & Nichol, 2021).

En este proceso se han conectado los procesos a través de la puesta en conjunto de los datos de lado mar y tierra, conectándolos de manera holística, incluyendo datos del AIS-PMS del lado mar que se reproducen a tiempo real. Asimismo, la herramienta recoge datos históricos y de prognosis en el lado tierra. El uso de modelos predictivos permite alertar de conflictos en el atraque, y prescribir posibles soluciones a estos conflictos.

A su vez, la integración de herramientas de simulación permite testear escenarios “y si”, basados en estas acciones recomendadas, en un entorno libre de riesgo. Este caso de uso refleja la conexión de la información y decisiones en las interfaces Mar y Tierra, asistiendo a la Toma de Decisiones basada en Datos.

Caso de Estudio: Ro-Pax



Aplicaciones de la tecnología de Gemelo Digital en ciudades portuarias: la operación Paso del Estrecho en Algeciras, España. (Fuente: Moffatt & Nichol, 2023).

Conclusiones

El Gemelo Digital tiene el potencial de convertirse en una herramienta de uso común en el entorno compartido entre puertos y ciudades, aportando valor en este ámbito de alto valor y sensibilidad por su importancia económica, ambiental, y social. Esta colaboración, basada en el uso eficiente e inteligente de la información disponible, permitirá optimizar recursos y procesos reportando beneficios que tendrán un impacto patente y medible a distintas escalas temporales y espaciales.

Como en toda tecnología en desarrollo, su puesta en práctica en entornos reales requiere del establecimiento casos de uso viables. En este sentido, es clave que sea escalable, tanto a nivel de detalle como en ámbito de aplicación. Para ello, se plantea una implementación en distintos niveles o fases (simulación, emulación, plataforma integrada).

Este nuevo paradigma en el uso conjunto de información reduciendo el uso de recursos y mitigando el riesgo en la toma de decisiones abre un amplio campo de posibilidades en la colaboración entre puertos y ciudades. Su potencial alcance, usos y beneficios, permitirá generar sinergias en los que el Gemelo Digital sea el eje vertebrador de una transformación digital que les permita contribuir conjuntamente a desarrollar entornos sostenibles, eficientes, y económicamente prósperos para sus comunidades.

IMAGEN INICIAL | *Uso de la Simulación en la Planificación de Terminales Intermodales. (Fuente: Moffatt y Nichol, 2021).*

REFERENCIAS

Blauert, C., Díaz Fraile, S., López Castejón, E., et.al. (2021). “Las tecnologías exponenciales y su impacto en los puertos y sus cadenas logísticas”, Santander: Autoridad Portuaria de Santander. I.S.B.N.: 978-84-121144-8-5.

Cordeiro, J., Zhang, Y. (Alan), Aguilar, R., Y Meza, S., “Simulation as a Tool for Strategic Decision-making at a Multipurpose Port Complex (Propuesta de artículo),” 2021.

De Los Santos, F. (2021), “Port Call Optimisation: A Port Authority’s Point Of View,” Port Technology, pp. 17–18. (5).

Digital Container Shipping Association (DCSA) (2021), “Initiatives: Data & Interfaces”, https://dcsa.org/initiatives/data-and-interfaces/.

Gelernter, D. (1991). Mirror Worlds: Or the Day Software Puts the Universe in a Shoebox...How It Will Happen and What It Will Mean. Oxford University Press.

Ivanov, D. y Dolgui, A. (2021). “A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0,” in Prod. Plan. Control, vol. 32, no. 9, pp. 775–788, DOi: 10.1080/09537287.2020.1768450. 13.

Yao, H., Wang, D., Su, M. y Qi, Y. (2021). “Application of Digital Twins in Port System”, in J. Phys. Conf. Ser., vol. 1846, no. 1, doi: 10.1088/1742-6596/1846/1/012008.