



Georgia Tech Panama
Logistics Innovation & Research Center



Smart Ports: Tecnologías de Automatización, Digitalización y Gobernanza en las Terminales Portuarias Globales

Parte 2: Arquitectura Tecnológica del Puerto Inteligente

Preparado: Melanie Batista y Alvaro Lasso

Centro de Innovación e Investigaciones Logísticas Georgia Tech Panamá

Agosto, 2026

www.gatech.pa | logistics.gatech.pa

© Georgia Tech Panama Foundation, 2026
Centro de Innovación e Investigaciones Logísticas Georgia Tech Panamá, Calle
Marbella Office Plaza, Oficina 5B, Avenida Aquilino de la Guardia, Bella Vista,
Ciudad de Panamá. 2026

Primera edición digital: agosto 2026
ISBN: Pendiente
Preparado por: Melanie Batista, Alvaro Lasso
Editado por: Jorge Barnett
Diseño gráfico: Carlos Santos

Todos los derechos reservados. Está prohibida la reproducción total o parcial de este documento, su recopilación en un sistema informático, su transmisión en cualquier forma o medida, ya sea electrónica, mecánica, por fotocopia, registro o bien por otros medios, sin el previo permiso por escrito de la editorial.



Esta obra está bajo una licencia CC BY-NC-SA 4.0 de Creative Commons.
Para ver una copia de esta licencia, visita:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Recomendación para citación de este documento:

Batista, M., Lasso, A. (2026). *Smart Ports: Tecnologías de Automatización, Digitalización y Gobernanza en las Terminales Portuarias Globales. Parte 2: Arquitectura Tecnológica del Puerto Inteligente*. Centro de Innovación e Investigaciones Logísticas Georgia Tech Panamá. Agosto 2026.

Descargo de responsabilidad:

Este documento es producto de investigación profesional sobre una temática en constante evolución. Las opiniones expresadas son exclusivamente de los autores y no reflejan necesariamente el punto de vista de Georgia Tech Panama Foundation ni de Georgia Institute of Technology. Aunque se ha procurado la exactitud del contenido al momento de su publicación, no se garantiza ni se asume responsabilidad por cambios posteriores, errores u omisiones, ni por daños derivados del uso de esta información.

Cualquier marca, empresa o producto mencionado se incluye con fines ilustrativos y analíticos; su mención no implica aval, patrocinio ni aprobación (explícita o implícita), y su omisión no implica juicio de valor alguno.

Aplican términos adicionales. Para más información visite logistics.gatech.pa/aviso-legal/

Contenido

Introducción	2
1. Infraestructura física y sensorización	3
2. Conectividad y redes industriales	11
3. Plataformas operativas	15
4. Plataformas de datos e integración digital	21
5. Analítica avanzada e Inteligencia Artificial	27
6. Aplicaciones de negocio y simulación	31
Referencias	36

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama con las capas de la arquitectura tecnológica	2
Figura 2. Aplicación de IoT y sensorización en las operaciones portuarias	3
Figura 3. Integración de redes y tecnologías de conectividad en smart ports	11
Figura 4. Funcionamiento de plataformas operativas en terminales portuarias	16
Figura 5. Flujo de datos e integración digital en plataformas portuarias	22
Figura 6. Aplicación de analítica avanzada e inteligencia artificial en operaciones portuarias	27
Figura 7. Herramientas de simulación y análisis para la planificación operativa	31
Figura 8. Diagrama de Interacción de tecnologías en las distintas etapas de la operación portuaria	35

Introducción

La arquitectura tecnológica de los smart ports se puede entender como un sistema estructurado en **múltiples capas interconectadas** que *permiten capturar, transmitir, procesar y analizar datos* para optimizar las operaciones portuarias. Este modelo responde a la evolución hacia el concepto de puerto 4.0, definido por el Banco Mundial como la integración de tecnologías digitales avanzadas (IoT, automatización, analítica, blockchain y sistemas interconectados) para mejorar la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad de los puertos.^[1]

Estas capas no necesariamente se implementan de forma simultánea ni uniforme en todos los puertos, pero en conjunto constituyen la base tecnológica de los ecosistemas portuarios inteligentes.

Figura 1.
Capas de la arquitectura tecnológica



Fuente: Elaboración propia en base a la investigación realizada.

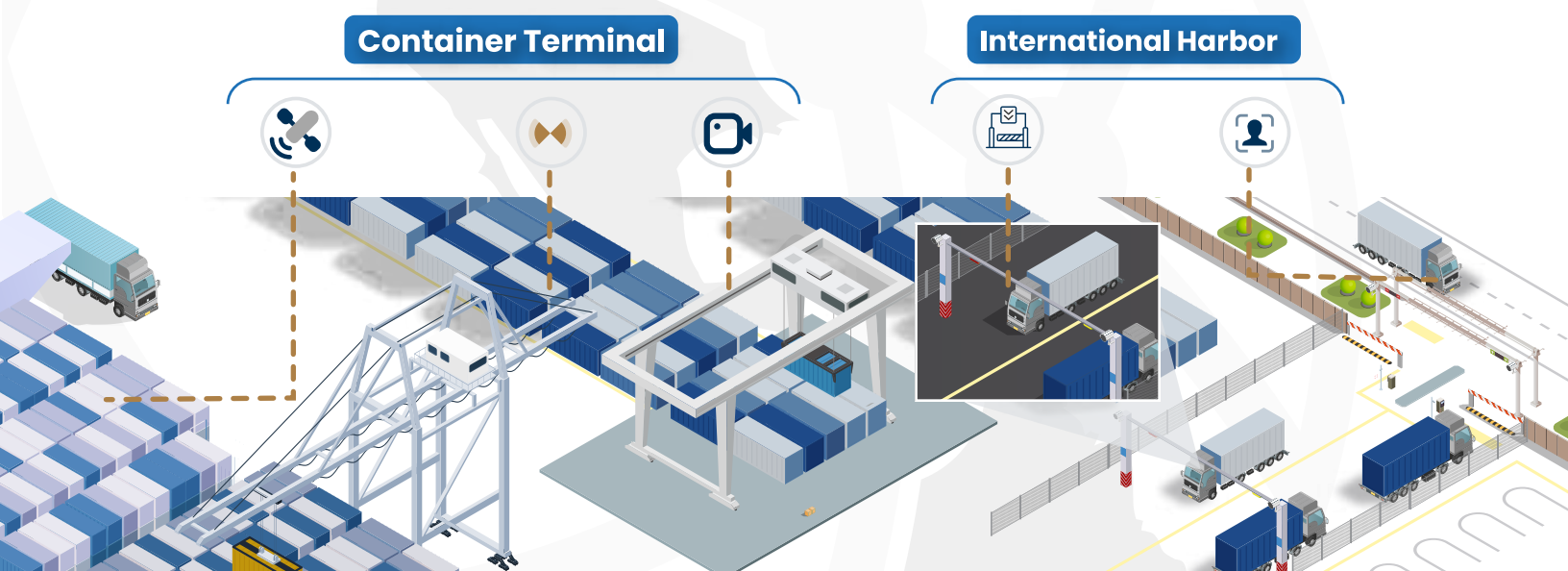
1. Infraestructura física y sensorización

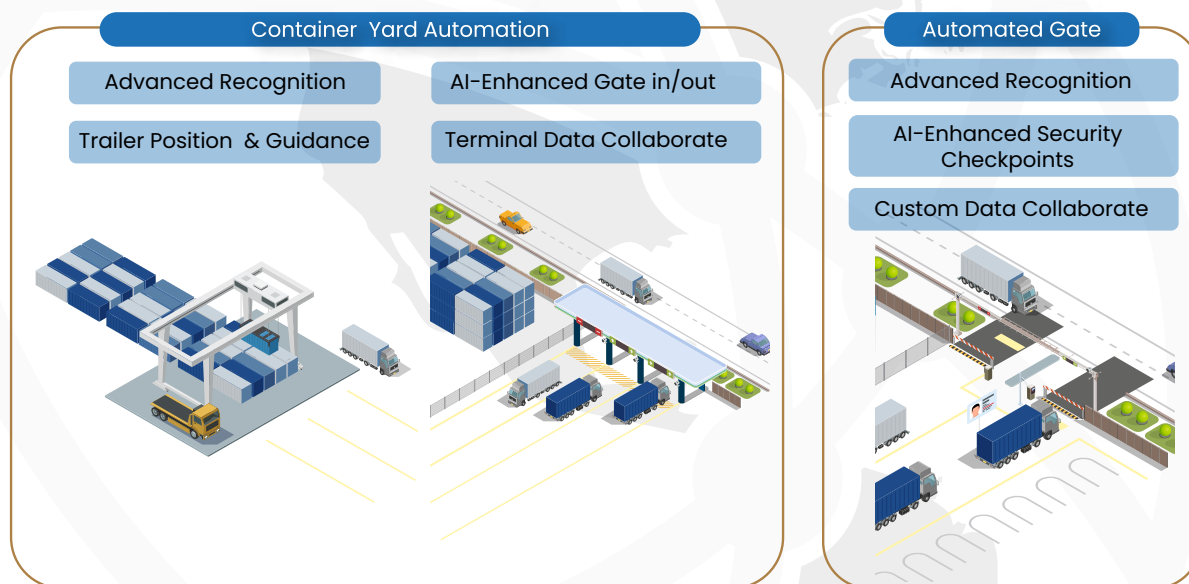
Constituye la capa base de los smart ports. Esta capa corresponde a las tecnologías encargadas de capturar datos del entorno físico en las terminales portuarias, incluyendo dispositivos IoT, sensores en equipos y contenedores, sensores ambientales, cámaras, sistemas OCR, RFID, sensores de peso, drones y herramientas de inspección digital.

■ IoT y sensorización portuaria

La infraestructura física y la sensorización constituyen la base operativa de los smart ports, ya que permiten la captura de datos en tiempo real sobre el estado de los equipos, la carga y las condiciones del entorno portuario. En la práctica, esta tecnología se implementa mediante sensores IoT instalados en diversos equipos como grúas, vehículos, contenedores, puertas de acceso y zonas operativas. Estos sensores registran variables como la posición, los movimientos, los tiempos de operación, la temperatura y las condiciones ambientales.

Figura 2. Aplicación de IoT y sensorización en las operaciones portuarias





Fuente: Chunghwa Telecom (s. f.). Internet of Things Smart Ports.
https://www.chttl.com.tw/en/rd_iot-port.html

En los puertos, estos sensores se integran con los sistemas operativos (como TOS) para monitorear y coordinar actividades clave como la carga y descarga de buques, la gestión de patio y el flujo de camiones. Los sensores ubicados en grúas permiten medir su rendimiento y anticipar fallos, mientras que los sensores instalados en contenedores y equipos facilitan el seguimiento en tiempo real, reduciendo los tiempos de búsqueda y mejorando la eficiencia operativa.

El nivel de adopción de esta tecnología es elevado a escala global, especialmente en terminales de contenedores de gran escala, donde la automatización y el monitoreo en tiempo real son imperativos para mantener la productividad

■ **Sensores en grúas, equipos y contenedores**

Los **sensores instalados en grúas, equipos de manejo de contenedores y unidades de transporte interno** constituyen uno de los principales mecanismos de captura de datos operativos en tiempo real dentro de un puerto. Estos sistemas combinan diversas tecnologías, como **GPS**,

sensores de posición, carga, proximidad y sistemas de identificación (RFID u OCR), que permiten monitorear de manera continua la ubicación, el estado y la actividad de los equipos y de la carga.

En el ámbito de las grúas (STS y RTG), se implementan sensores que **monitorean variables críticas, tales como ciclos de operación, peso de los contenedores, posición del spreader y movimientos tanto verticales como horizontales**. Un elemento clave es la detección automática del momento en que el contenedor es tomado o liberado (pick & drop), lo cual se logra mediante sensores de carga y switches en el spreader que identifican el contacto y la liberación del contenedor. Esta información se transmite en tiempo real al TOS, lo que permite actualizar el estado de la operación sin intervención manual y mejora la trazabilidad de los movimientos.

En equipos de patio como reach stackers, straddle carriers y vehículos autónomos (AGVs), los **sistemas de posicionamiento** permiten ubicar cada unidad dentro del terminal con alta precisión. Estos equipos también incorporan sensores que registran **tiempos de ciclo, rutas recorridas, consumo energético y estado operativo, lo que facilita la optimización de rutas**, la asignación dinámica de tareas y el mantenimiento predictivo.^[2] En lo que respecta a los contenedores, es posible implementar tecnologías como **RFID, sensores de temperatura o dispositivos IoT**, especialmente en carga refrigerada, que permiten monitorear las condiciones de la carga en tiempo real. Por otra parte, los sistemas OCR instalados en puertas y grúas permiten la identificación automática de los contenedores mediante el reconocimiento de caracteres. Esto reduce la intervención manual y minimiza los errores operativos.

La información en cuestión es recabada por los sistemas de control de los equipos (PLC o software embebido), los cuales transmiten los datos a plataformas centrales, tales como el TOS o sistemas analíticos, mediante redes inalámbricas. Este **flujo constante de datos** mejora la visibilidad operativa, reduce los tiempos de operación, optimiza la utilización de activos y fortalece la seguridad en las operaciones

portuarias. El nivel de adopción de estas tecnologías es elevado en terminales modernas, especialmente en puertos automatizados o semiautomáticos, donde la obtención precisa y continua de datos resulta esencial para la coordinación operativa y la integración con sistemas avanzados de planificación y analítica.

■ **Sensores ambientales**

Los sensores ambientales permiten la **monitorización de variables como el viento, la visibilidad, el oleaje, las corrientes y los niveles de agua**, que pueden afectar directamente a la seguridad y eficiencia de las operaciones portuarias.

La implementación de estos sistemas se lleva a cabo en diversas áreas del puerto, tales como muelles, canales de acceso y zonas de fondeo. Estos sistemas recopilan datos en tiempo real, los cuales son utilizados para la toma de decisiones operativas y la planificación de maniobras. Uno de los aspectos más críticos que deben abordarse con la mayor diligencia es la **medición del nivel del agua y las mareas**, ya que estos factores determinan el calado disponible para los buques.

Sensores como mareógrafos permiten monitorear **variaciones en el nivel del mar**, lo que resulta esencial para definir si un buque puede ingresar o salir del puerto de forma segura sin riesgo de encallamiento. Esta información es utilizada por las autoridades portuarias y los pilotos con el propósito de planificar **ventanas de acceso**. Dichas ventanas se utilizan especialmente en puertos con restricciones de profundidad o alta variabilidad de las mareas.

Asimismo, es importante destacar que los sensores de visibilidad, viento y condiciones meteorológicas ejercen una influencia directa en las operaciones marítimas y portuarias. Por ejemplo, condiciones de baja visibilidad pueden afectar la **navegación y el posicionamiento de los buques** durante maniobras de atraque, mientras que velocidades elevadas del viento pueden limitar o detener la operación de grúas, particularmente en terminales automatizadas donde la precisión es

crítica. De igual manera, el monitoreo constante del oleaje y las corrientes permite optimizar las maniobras de los buques y mejorar la seguridad en el canal de acceso.

La integración de estos sensores con plataformas digitales y sistemas operativos permite **optimizar la eficiencia de las operaciones**, especialmente en entornos automatizados. El uso de los datos ambientales permite la optimización en tiempo real de la operación de equipos como grúas automatizadas, vehículos autónomos (AGVs) y sistemas de planificación, evitando interrupciones, reduciendo tiempos de inactividad y mejorando la coordinación general del puerto. En los puertos más avanzados, esta información se integra con **sistemas predictivos** que permiten anticipar condiciones adversas y reprogramar operaciones de manera proactiva, garantizando así la eficiencia y seguridad en las operaciones portuarias.

El nivel de adopción de sensores ambientales es **elevado** en puertos de gran escala, donde la seguridad de la navegación y la eficiencia operativa dependen de la capacidad de monitorear y responder a condiciones ambientales en tiempo real. Estos sistemas son componentes críticos de la infraestructura de los smart ports, ya que permiten reducir riesgos, optimizar el uso de la infraestructura y mejorar la confiabilidad de las operaciones portuarias. ^[3]

■ Automated Gate Systems

Los sistemas de puertas automatizadas (Automated Gate Systems) permiten gestionar de forma eficiente el ingreso y salida de camiones en los terminales portuarios mediante la integración de tecnologías como OCR, RFID y sensores de peso. Estos sistemas se encuentran interconectados con las plataformas operativas del puerto, lo que permite validar en tiempo real la información relacionada con la carga y el transportista antes de autorizar el acceso.

Al llegar un camión al gate, el **sistema OCR** procede a la lectura automática del número de identificación del contenedor y de la placa

del vehículo, mediante la utilización de cámaras. Esta información se comprueba en relación con los datos previamente registrados en el sistema del puerto, verificando si el contenedor tiene una cita asignada, si corresponde al terminal y si cumple con los requisitos de acceso. Simultáneamente, los **sistemas RFID** permiten identificar vehículos o transportistas previamente registrados, agilizando el proceso y reduciendo los tiempos de entrada.

Por otro lado, los **sensores de peso** instalados en las básculas del gate registran el peso del camión tanto al entrar como al salir. Este proceso permite validar la información contenida en la carga, cumplir con las regulaciones vigentes y detectar posibles inconsistencias. Por ejemplo, en caso de que se detecten discrepancias significativas en el peso, el sistema está diseñado para emitir alertas que soliciten una revisión, lo que contribuye a la prevención de errores o irregularidades en el proceso operativo.

La **integración de estas tecnologías** permite automatizar el proceso de acceso, reducir la intervención manual y disminuir los tiempos de espera en los gates. Este sistema tiene un impacto directo en la gestión del flujo de camiones, lo que contribuye a evitar congestionamientos y a mejorar la coordinación entre el puerto y los transportistas.

El nivel de adopción de estos sistemas es alto a nivel global, especialmente en terminales de contenedores con alto volumen de movimiento, donde se requiere rapidez, control y eficiencia en los accesos. ^[4]

■ **Automatización Portuaria: ASCs, ARMG, AGVs, grúas remotas**

La automatización portuaria se fundamenta en la implementación de equipos especializados que posibilitan la optimización en la gestión de contenedores, garantizando la seguridad y el control en todas las operaciones. Entre los principales artefactos se encuentran las grúas

automatizadas de patio (ASC y ARMG), los vehículos autónomos (AGVs) y las grúas operadas de forma remota, cada uno con funciones específicas dentro del flujo operativo del terminal.

Las **grúas tipo ASC (Automated Stacking Cranes) y ARMG (Automated Rail-Mounted Gantry)** se utilizan principalmente en el patio para el apilamiento y movimiento de contenedores. Estas grúas operan de forma automatizada sobre rieles, lo que permite una alta precisión en los movimientos, un mejor aprovechamiento del espacio y una reducción en los tiempos de operación. Su implementación no solo fomenta la reducción de errores humanos, sino que también contribuye a elevar los estándares de seguridad en el manejo de carga.

Por su parte, los **AGVs (Automated Guided Vehicles)** son vehículos autónomos encargados de transportar contenedores entre el muelle y el patio. Su principal ventaja competitiva radica en su capacidad para garantizar un flujo continuo de movimiento sin interrupciones, gracias a su funcionamiento coordinado y a la ausencia de necesidad de un conductor. Esta medida permite reducir los tiempos de traslado, mejorar la sincronización con las grúas y disminuir los riesgos de accidentes en áreas de alta circulación.

En el caso de las **grúas remotas**, estas permiten a los operadores controlar los equipos desde una sala de control en lugar de estar físicamente en la grúa, lo que aumenta la eficiencia y seguridad. Como resultado de lo anteriormente expuesto, se evidencia una mejora en las condiciones laborales, una reducción en la exposición a riesgos operativos y una mayor precisión en la operación, mediante el uso de sistemas de monitoreo y asistencia digital. ^[5]

La **integración de estos equipos** optimiza la gestión de contenedores en el terminal, reduce los tiempos de operación, mejora la seguridad y aumenta la productividad general. Si bien estos sistemas son capaces de operar de manera independiente, es importante destacar que su mayor impacto se logra mediante una estrecha colaboración y

coordinación dentro del entorno operativo del puerto. El nivel de adopción de estas tecnologías es medio-alto a nivel global, siendo más común en terminales de contenedores de gran escala o en procesos de modernización hacia operaciones semi-automatizadas o totalmente automatizadas.

■ Drones y tecnologías inmersivas

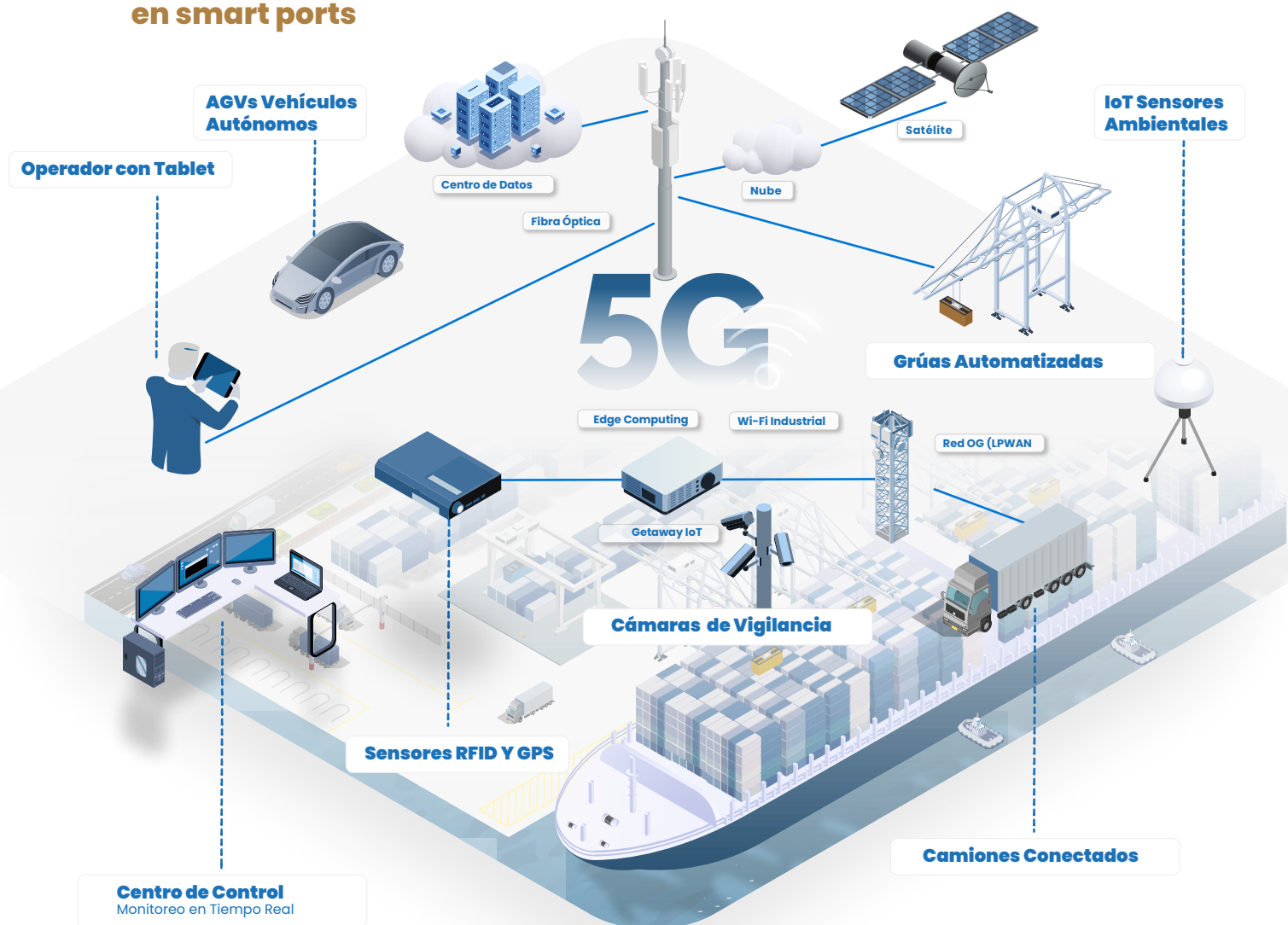
La implementación de tecnología avanzada, como **drones y soluciones inmersivas (realidad virtual y aumentada)**, se ha integrado en los puertos para optimizar la supervisión operativa, reforzar la seguridad y facilitar el mantenimiento de las infraestructuras. Estas tecnologías permiten la captura de información del entorno en tiempo real y su análisis sin necesidad de intervención directa en zonas de riesgo. En el contexto de los **drones**, su uso se concentra primordialmente en la evaluación de equipos e instalaciones, tales como grúas, muelles y áreas de almacenamiento. Asimismo, se utilizan para la vigilancia de la seguridad y el monitoreo de operaciones. Además, permiten generar modelos 3D del puerto mediante levantamientos aéreos, facilitando así la planificación de espacios y la identificación de posibles riesgos operativos. Por otro lado, es importante destacar que las tecnologías **de realidad aumentada y virtual** se utilizan para apoyar procesos de capacitación, mantenimiento y operación. Por ejemplo, permiten a los operadores visualizar información en tiempo real sobre equipos, recibir asistencia remota o simular escenarios operativos para entrenamiento, reduciendo errores y mejorando la toma de decisiones en campo.

Estas tecnologías **no requieren una integración completa** con todos los sistemas del puerto para generar valor, ya que pueden implementarse de forma puntual en áreas específicas como seguridad, mantenimiento o inspección. Su adopción a nivel global es moderada, con un crecimiento progresivo a medida que los puertos avanzan en sus procesos de digitalización.^[6]

2. Conectividad y redes industriales

Esta capa corresponde a la infraestructura que permite transmitir datos en tiempo real. La conectividad en los smart ports se basa en tecnologías como la **fibra óptica**, el **Wi-Fi industrial** y las **comunicaciones máquina a máquina**, que permiten garantizar la transmisión continua y fiable de datos entre los distintos componentes del sistema portuario.

Figura 3. Integración de redes y tecnologías de conectividad en smart ports



Fuente: Ilustración elaborada para fines explicativos.

■ Redes privadas 5G

Las redes privadas 5G facilitan la implementación de comunicaciones *de baja latencia, velocidad y alta confiabilidad entre equipos y sistemas dentro del puerto*. Esta funcionalidad resulta fundamental en operaciones donde la coordinación en tiempo real es crítica, como en el movimiento de contenedores mediante equipos automatizados. Esta tecnología permite a los vehículos y grúas recibir y ejecutar instrucciones de manera inmediata, adaptando rutas y tareas según el estado operativo del terminal.

Su implementación ha permitido optimizar la continuidad de las operaciones, *reducir interrupciones y aumentar la precisión en la ejecución de movimientos*. Su nivel de adopción puede considerarse medio a nivel global, ya que su implementación se concentra principalmente en terminales de gran escala y en puertos líderes que requieren conectar **AGVs, grúas automatizadas y sistemas de control** en tiempo real. Aunque su uso viene en aumento, todavía no constituye una tecnología de despliegue generalizado en todo el sector portuario.^[7]

■ Wi-Fi industrial

El Wi-Fi industrial se utiliza para **conectar equipos, sensores y sistemas dentro del entorno portuario**, especialmente en zonas de patio, gates y áreas operativas. A diferencia del Wi-Fi convencional, está diseñado para soportar condiciones exigentes, movilidad constante y múltiples dispositivos conectados simultáneamente.

En operación, permite la transmisión inmediata de datos como movimientos de contenedores, estado de equipos y eventos operativos, lo que mejora la visibilidad y la coordinación entre procesos. En términos de madurez, su adopción es mayor que la del **5G**, ya que responde a necesidades operativas y de supervisión ya consolidadas. Esta medida contribuye a la reducción de errores, la prevención de retrasos y la optimización del flujo de trabajo. Su nivel de adopción es elevado,

situándose como una de las tecnologías más implementadas en el ámbito portuario en la actualidad.^[8]

■ Redes de fibra óptica

El uso de soluciones de acceso fijas, como el **ADSL o la fibra óptica**, está muy extendido en el entorno portuario para dar acceso a Internet e implementar redes de área local y extendida que interconectan servidores y equipos informáticos. Gracias a estas tecnologías, los equipos pueden disfrutar de un ancho de banda y una calidad de servicio aceptables para el envío de todo tipo de información: voz, datos, vídeo, etc.

Su utilización resulta imperativa para la operatividad de sistemas críticos, la transmisión de vídeo en tiempo real y la comunicación entre las distintas áreas del puerto. Esta medida garantiza la continuidad operativa, optimiza el monitoreo y asegura una respuesta eficiente ante eventos operativos. Su nivel de adopción es sumamente elevado, consolidándose como un estándar en puertos de gran tamaño.^[1]

■ Red 0G

La red 0G, integrada en el **ecosistema Sigfox/UnaBiz**, es una tecnología LPWAN diseñada para el IoT masivo que destaca por su bajo consumo energético y la transmisión eficiente de datos ligeros. En el ámbito portuario, su aplicación es fundamental para la supervisión de activos *distribuidos y variables ambientales, facilitando tareas como el rastreo de contenedores no motorizados, la gestión de inventarios y la seguridad perimetral en tiempo real.*

A diferencia del 5G, orientado a la automatización de alta velocidad, la tecnología 0G se especializa en ofrecer una conectividad masiva, económica y de larga duración para la sensorización. Pese a sus ventajas, su adopción actual es selectiva, consolidándose principalmente como una solución complementaria que permite ampliar la cobertura de monitoreo allí donde las redes convencionales no resultan rentables o técnicamente viables.^[9]

■ Edge computing

El edge computing, o computación en la nube cercana, permite procesar los datos cerca del punto donde se generan, reduciendo la latencia y mejorando la velocidad de respuesta en operaciones críticas. Esta capacidad se vuelve especialmente relevante en contextos que requieren respuestas inmediatas, tales como el control de equipos automatizados o la detección de eventos en tiempo real. Al procesar la información de manera local, se evitan los retrasos asociados al envío de datos a sistemas centrales, lo que mejora la continuidad operativa y reduce los riesgos asociados. Su nivel de adopción es medio, con un crecimiento notable en puertos más avanzados. ^[10]

■ Gateways IoT

Los gateways IoT cumplen una función de enlace entre sensores, equipos industriales y plataformas superiores de gestión de datos. Su función principal es la recopilación de señales de diversos dispositivos, la traducción de protocolos, la agregación de información y su transmisión a sistemas operativos o analíticos. En el ámbito de la arquitectura portuaria, esta tecnología adquiere una relevancia significativa debido a que numerosos activos operan con distintos protocolos y niveles de digitalización. En este contexto, el **gateway** se erige como un facilitador de la interoperabilidad gradual entre los sistemas existentes y las nuevas plataformas inteligentes. ^[11]

■ Comunicaciones máquina-máquina (M2M)

Las comunicaciones M2M posibilitan *el intercambio automático de información entre equipos, sensores y sistemas sin necesidad de intervención humana*, lo cual resulta esencial en operaciones portuarias automatizadas.

En el entorno portuario, esto se manifiesta en la coordinación de activos móviles, sistemas de gate, sensores, plataformas operativas y soluciones de monitoreo.

Su valor radica en habilitar la automatización, trazabilidad y ejecución más rápida de decisiones operativas, especialmente cuando se integran con el **IoT y plataformas TOS** o de control.

Su nivel de adopción es medio-alto, especialmente en terminales con mayor nivel de automatización, donde la comunicación constante entre equipos es fundamental para mantener la eficiencia operativa. ^[12]

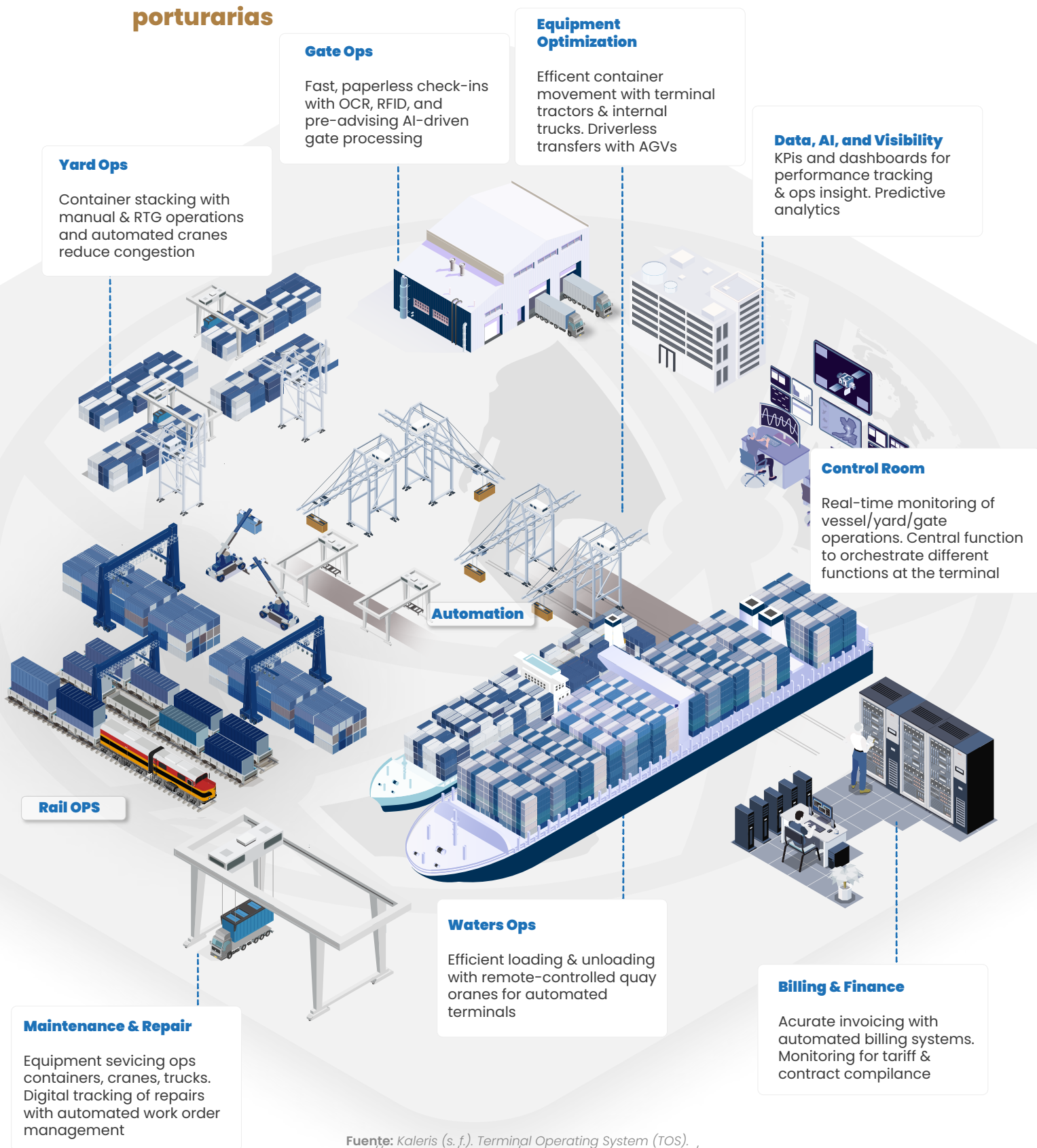
■ Integración de tecnologías

Estas comunicaciones no dependen de una sola red, sino que normalmente se apoyan en una **combinación de tecnologías de conectividad dentro del mismo terminal, según el tipo de operación y los requisitos de cada sistema**. Por ejemplo, el **Wi-Fi industrial** se utiliza comúnmente para la comunicación entre equipos dentro del patio y la terminal, las **redes 5G** privadas permiten una conexión más robusta y de baja latencia para equipos críticos o automatizados, y tecnologías como **4G o LPWAN** se emplean para sensores de bajo consumo que transmiten datos de forma periódica, como los de monitoreo ambiental o de activos. Esta combinación garantiza la cobertura, la fiabilidad y la eficiencia en la transmisión de datos entre los distintos componentes del sistema portuario.

3. Plataformas operativas

Las plataformas operativas en smart ports integran el uso de tecnologías avanzadas para optimizar la eficiencia y gestión portuaria en tiempo real. Estas soluciones automatizan procesos, mejoran la seguridad y sostenibilidad, y conectan a los actores logísticos (navieras, terminales, aduanas) para aumentar la eficiencia y reducir costos.

Figura 4. Funcionamiento de plataformas operativas en terminales portuarias



■ Terminal Operating Systems (TOS)

Constituye el **eje central de la operación portuaria moderna**, ya que centraliza la planificación, ejecución y control de las actividades dentro de la terminal. En la práctica, el **TOS** no solo registra las operaciones, sino que también *traduce la planificación logística en instrucciones operativas, asigna recursos, define ubicaciones en el patio y coordina los flujos entre el muelle, el patio y la puerta de salida*. Su implementación implica la integración con equipos, sistemas externos y procesos internos, y se convierte en la base sobre la que se construye la digitalización de la terminal. ^[13]

El TOS articula tres funciones principales: **planificación, ejecución y control**. En la fase de planificación, se define la asignación de recursos y la secuencia de operaciones; *en la de ejecución, estas decisiones se traducen en instrucciones operativas; y en la de control, se actualiza en tiempo real el estado de la operación y los indicadores de rendimiento*. Este enfoque integrado permite reducir la fragmentación operativa y mejorar la coordinación entre las distintas áreas del terminal.

La **planificación** de buques es una función crítica del TOS, ya que afecta directamente a la productividad del muelle y a la eficiencia global de la operación. A través de esta función, el sistema organiza la secuencia de carga y descarga, asigna recursos y optimiza el uso de grúas para evitar congestiones y reducir los tiempos de estancia.

La mejora en la planificación de buques ha demostrado un incremento de la productividad operativa.

Un ejemplo claro de planificación de buques mediante sistemas TOS se observa en la terminal *APM Terminals Valencia*, donde se utiliza el sistema **Navis N4** para gestionar de forma integral las operaciones portuarias. Este sistema *permite planificar la asignación de atraques, coordinar las secuencias de carga y descarga, y optimizar el uso de grúas y recursos del patio en función de la programación de arribos de los buques*. ^[14]

La **coordinación** de grúas se basa en la sincronización entre la planificación del buque y la disponibilidad de recursos operativos. El TOS permite *secuenciar movimientos, evitar interferencias y maximizar la productividad de las grúas, lo que reduce los tiempos muertos y mejora el flujo operativo.* ^[15]

La **gestión del patio** es uno de los componentes más importantes del TOS, ya que determina la ubicación de los contenedores y la secuencia de movimientos dentro del terminal. Una gestión eficiente permite reducir manipulaciones innecesarias, optimizar el uso del espacio y mejorar la productividad de los equipos. En implementaciones como *Transnet*, el TOS asigna automáticamente posiciones de patio desde la entrada del contenedor, lo que facilita su carga posterior en el buque y reduce movimientos innecesarios. ^[16]

En terminales automatizadas, el TOS se **integra** con los sistemas de control de equipos para coordinar las operaciones entre grúas automatizadas, vehículos de guiado automático (AGV, por sus siglas en inglés) y otros activos. Esta integración permite ejecutar operaciones con mayor precisión, reducir la intervención humana y mejorar la eficiencia operativa.

En implementaciones como la de Qinzhou, el TOS **coordina** directamente los equipos automatizados, optimiza la secuencia de movimientos y reduce los tiempos operativos. ^[17]

La integración del TOS con sistemas logísticos como **ERP, OCR, RFID, PCS y plataformas analíticas** permite crear un **ecosistema digital unificado**. Esta interoperabilidad mejora la calidad de los datos, reduce las duplicidades y permite tomar decisiones de manera más rápida y precisa. En terminales como la Manzanillo International Terminal, la integración de múltiples sistemas ha permitido aumentar la eficiencia operativa, reducir los tiempos de procesamiento y mejorar la visibilidad de la operación en tiempo real. ^[18]

De igual forma, el TOS se integra con los **sistemas de gestión de tráfico marítimo (VTMS)** gestionan el tráfico marítimo en las zonas de acceso al puerto, lo que mejora la seguridad y la eficiencia de la navegación.

Estos sistemas utilizan tecnologías de supervisión y analítica para coordinar el movimiento de las embarcaciones.

En Singapur, el desarrollo del *Next Generation VTMS* incorpora analítica avanzada y aprendizaje automático para identificar riesgos, optimizar el tráfico y reducir la probabilidad de colisiones. ^[19]

Por último, el TOS se complementa con **sistemas especializados para la gestión de puertas de entrada y salida**, patio y coordinación logística. Estas plataformas permiten *optimizar el flujo de camiones, mejorar la trazabilidad de la carga y facilitar la interacción con clientes y otros agentes externos*.

En implementaciones como la del puerto de Port Everglades, la integración de múltiples sistemas ha permitido mejorar la visibilidad operativa, automatizar procesos y optimizar la coordinación entre las distintas áreas del terminal. ^[20]

A continuación, se presentan las principales plataformas utilizadas en entornos portuarios y el papel que desempeñan dentro del ecosistema operativo:

■ **Navis N4**

Navis N4 es uno de los sistemas **TOS más utilizados a nivel mundial**, especialmente en terminales de contenedores que buscan estandarizar procesos y mejorar la eficiencia operativa. Su implementación permite integrar módulos de planificación, *ejecución y visibilidad, así como conectarse con sistemas externos y plataformas analíticas*. En una situación real de operación, su valor se refleja en la **reducción de los tiempos operativos, un mayor control sobre la carga y una mejora en la toma de decisiones**.

Como caso destacado, se encuentra su implementación en *APM Terminals Valencia, donde ha permitido optimizar la gestión de las operaciones portuarias mediante una planificación de actividades mejorada, mayor visibilidad operativa y un uso más eficiente de los recursos del terminal*. Esta iniciativa se traduce en una mejora en la productividad, una mayor eficiencia en la asignación de equipos y

una operación más coordinada, consolidando al puerto como un referente logístico en la región del Mediterráneo. ^[21]

■ Tideworks

Tideworks, a través de su sistema **Mainsail**, ofrece una solución TOS orientada a terminales que requieren **flexibilidad operativa y capacidad de adaptación**. Su implementación no se limita al software, sino que incluye *servicios de configuración, integración, formación y asistencia, lo que resulta determinante para garantizar una transición efectiva desde los sistemas tradicionales hasta las plataformas digitales*.

Este sistema permite mejorar la visibilidad de las operaciones en tiempo real, optimizar la asignación de recursos y fortalecer la toma de decisiones operativas, especialmente en entornos donde la variabilidad de los flujos logísticos exige soluciones adaptables.

En el caso de *Manzanillo International Terminal (Panamá)*, la implementación de Mainsail ha permitido **optimizar el acceso a la información operativa en tiempo real, mejorar la toma de decisiones y reducir los costos operativos**. Posteriormente, la integración con la plataforma Insight facilitó la consolidación de datos provenientes del TOS, sistemas empresariales y otras fuentes, permitiendo generar reportes en tiempo casi real y mejorando la precisión de la información utilizada en la gestión operativa. ^[18]

■ OPUS

OPUS Terminal, desarrollado por *CyberLogitec*, es una plataforma para la **gestión integral de terminales de contenedores** que abarca los procesos de *carga, descarga, almacenamiento y clasificación*. Su implementación incorpora **algoritmos de optimización** que permiten **mejorar la asignación de recursos y la eficiencia operativa**.

En entornos altamente automatizados, OPUS se ha implementado en terminales como el *Qinzhou Automated Container Terminal*, donde se integra con sistemas de automatización, como vehículos de guiado automático (**AGV**), **grúas automatizadas y equipos de muelle**. En este tipo de configuración, el TOS no solo coordina operaciones, sino que también interactúa directamente con sistemas autónomos para

optimizar la secuencia de movimientos y reducir los tiempos operativos. Su implementación junto con las plataformas complementarias *Terminal Logistics Controller* y *OPUS DigiPort* ha permitido integrar equipos, sistemas IoT y plataformas de gestión, lo que ha incrementado la productividad y la seguridad en las operaciones. ^[22]

■ TBA

TBA, a través de su sistema **Autostore TOS**, ofrece una **plataforma modular para la gestión de operaciones en terminales marítimas e interiores**. Su implementación se caracteriza por su capacidad de integración con sistemas ya existentes, lo que facilita la modernización progresiva sin necesidad de reemplazar por completo la infraestructura tecnológica.

Su funcionalidad *permite un control en tiempo real de los movimientos de contenedores, activos y recursos humanos, así como una optimización de la planificación del patio mediante una asignación más eficiente de posiciones y equipos*. Esta medida contribuye a la **reducción de movimientos innecesarios**, a una mayor utilización de recursos y a la disminución de los tiempos operativos.

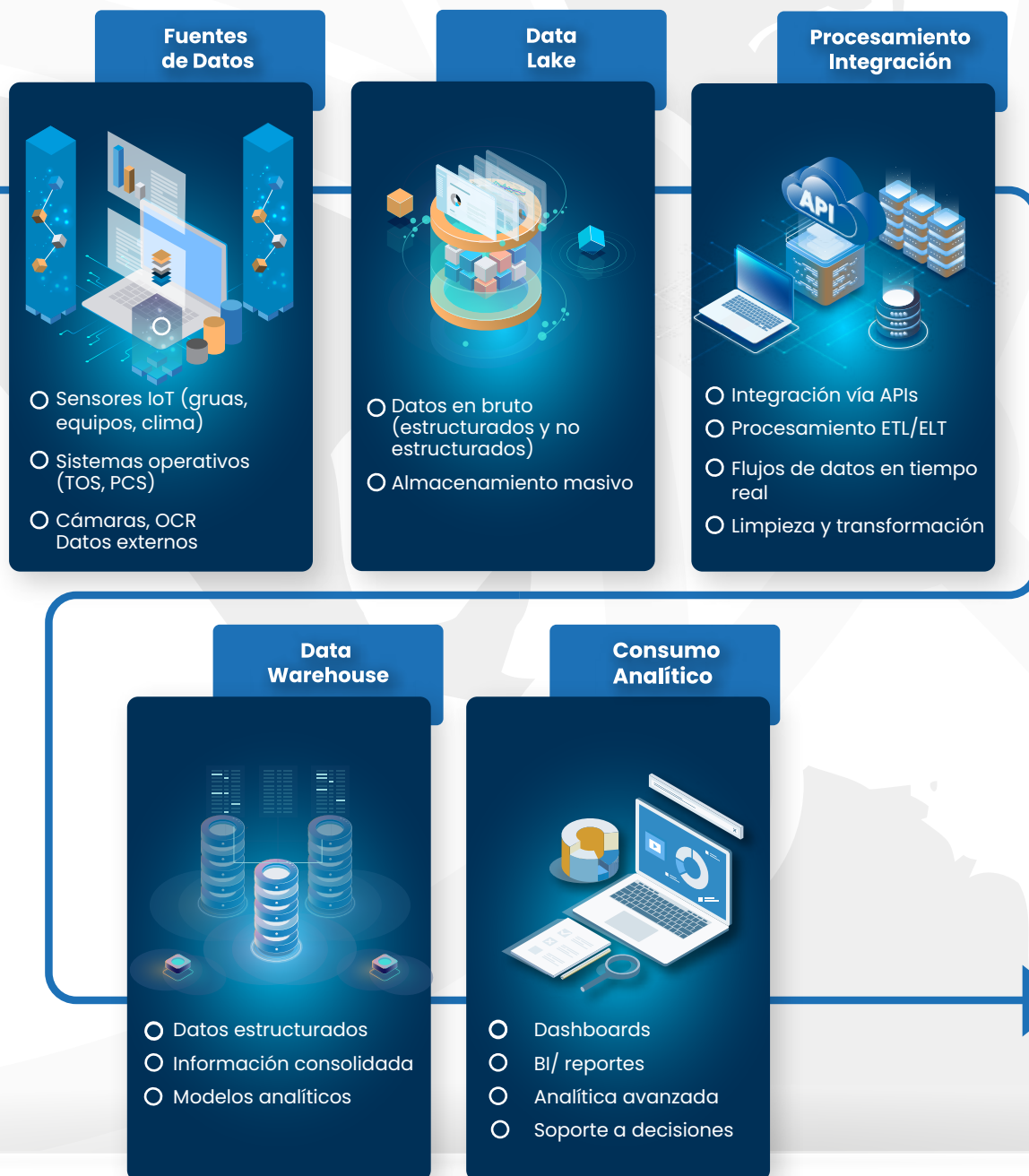
Adicionalmente, es pertinente mencionar que este tipo de soluciones **permite automatizar procesos** *que anteriormente se llevaban a cabo de manera manual, mejorar la coordinación entre áreas operativas y aumentar la capacidad de procesamiento del terminal*. Como resultado, se logra una reducción en la carga operativa, un incremento en la eficiencia general y una mejora en la capacidad de respuesta ante variaciones en la demanda. ^[23]

4. Plataformas de datos e integración digital

Las plataformas de datos e integración digital son el **núcleo de los smart ports**, ya que permiten la **conectividad entre sistemas** (IoT, IA, 5G) para **optimizar las operaciones en tiempo real, mejorar la eficiencia logística y reducir el impacto medioambiental**.

Estas soluciones **integran** a los agentes portuarios, **reducen los cuellos de botella y automatizan los procesos**, lo que transforma los puertos tradicionales en nodos logísticos competitivos y sostenibles.

Figura 5. Flujo de datos e integración digital en plataformas portuarias



Fuente: Ilustración creada para fines explicativos

Gestión de datos portuarios

Las plataformas de gestión de datos constituyen la base para **consolidar** la información generada por las operaciones portuarias. Operativamente, los puertos implementan **data lakes** *para almacenar grandes volúmenes de datos estructurados y no estructurados procedentes de sensores, sistemas de gestión portuaria (TOS), sistemas de control de acceso (gate), equipos y actores externos.* Sobre esta base, los almacenes de datos permiten organizar la información para su análisis, la generación de informes y el apoyo a la toma de decisiones.

La implementación de estas plataformas permite **romper los silos de información, centralizar los datos operativos y habilitar capacidades analíticas avanzadas.** En entornos portuarios, esto se traduce en una mayor **visibilidad, trazabilidad y capacidad de respuesta a eventos operativos.** ^[24]

Las **plataformas de datos operativos** en smart ports constituyen ecosistemas digitales integrados e impulsados por la inteligencia artificial. Su función primordial es *la recopilación, el análisis y la compartición en tiempo real de datos procedentes de sensores del Internet de las cosas (IoT), maquinaria automatizada y las partes interesadas de la comunidad portuaria.* La información obtenida de los datos brutos se transforma en datos útiles para aumentar la eficiencia, la sostenibilidad y la seguridad. Esto se logra mediante la conexión de activos diversos, como grúas, vehículos y buques, en un entorno de tecnología operativa (OT) centralizado, frecuentemente basado en la nube. ^[25]

Integración de sistemas

El **middleware** actúa como **intermediario** *para permitir la comunicación entre diferentes sistemas dentro del ecosistema portuario.* En la práctica, a nivel operativo, los puertos utilizan múltiples plataformas **(TOS, ERP, sistemas de puertas, VTMS y PCS)**, muchas de ellas con diferentes protocolos y arquitecturas.

La implementación del middleware permite estandarizar *la comunicación, facilitar la integración progresiva de nuevas tecnologías y reducir la complejidad operativa.* Esto es fundamental en los procesos

de transformación digital, ya que no es posible reemplazar todos los sistemas existentes de forma simultánea. ^[15]

APIs e interoperabilidad entre sistemas

Las API permiten **la conexión directa entre sistemas internos y externos, lo que facilita el intercambio de datos en tiempo real entre los actores del ecosistema logístico.** En la implementación, las API *se utilizan para conectar terminales con navieras, transportistas, autoridades y plataformas externas.*

La interoperabilidad hace que la información **fluya automáticamente entre sistemas**, lo que reduce los errores manuales y mejora la eficiencia operativa. Este enfoque es esencial para lograr una operación integrada y orientada a los datos. ^[26]

Ecosistemas de intercambio de datos

El intercambio documental digital sustituye los procesos tradicionales en papel y permite la gestión electrónica de documentos como los conocimientos de embarque, las órdenes de entrega y la documentación aduanera.

En la práctica, esta digitalización reduce los errores, los tiempos de procesamiento y los costos operativos, y mejora la trazabilidad y la transparencia de las operaciones. Su implementación suele ser uno de los primeros pasos en la transformación digital de los puertos. ^[24]

■ Port Community Systems (PCS)

El Port Community System es una de las plataformas más importantes en la digitalización portuaria, ya que permite el **intercambio de información entre todos los agentes de la comunidad portuaria: autoridades, terminales, navieras, agentes, transportistas y aduanas.**

En una implementación real, el **PCS** centraliza procesos como el intercambio documental, la coordinación logística, la gestión de citas y el seguimiento de la carga. **Su adopción permite reducir los tiempos de operación, mejorar la coordinación y aumentar la transparencia en la cadena logística.**

Las pruebas indican que la implementación del **PCS** y de los **sistemas de ventanilla** única está directamente asociada a **mejoras en la eficiencia portuaria y a una reducción de los tiempos de liberación de las mercancías.** ^[26]

Las plataformas de colaboración permiten **coordinar operaciones entre diferentes agentes logísticos mediante el intercambio de información en tiempo real.** Estas plataformas *facilitan la planificación conjunta, la gestión de recursos y la sincronización de actividades dentro del ecosistema portuario.*

En puertos avanzados, estas soluciones permiten coordinar las operaciones entre terminales, transportistas y clientes, lo que mejora la eficiencia global de la cadena logística. ^[27]

■ **Tecnologías de confianza y trazabilidad**

El uso de la tecnología **blockchain** en puertos se centra principalmente en *mejorar la seguridad y la trazabilidad del intercambio de información, especialmente de los documentos logísticos.* Esta tecnología permite registrar las transacciones de forma inmutable, lo que reduce el riesgo de fraude y errores.

A nivel operativo, el puerto de *Rotterdam* ha desarrollado soluciones basadas en blockchain para **digitalizar procesos logísticos y mejorar la trazabilidad de la carga,** mientras que otros puertos han utilizado esta tecnología para gestionar de manera segura los **documentos electrónicos.** ^[28]

■ **Smart contracts**

Los smart contracts permiten automatizar procesos mediante **reglas predefinidas que se ejecutan automáticamente cuando se cumplen ciertas condiciones.** En el entorno portuario, *pueden utilizarse para automatizar pagos, liberación de carga o validación documental.* Su implementación contribuye a *reducir tiempos, eliminar intermediarios y mejorar la eficiencia en procesos logísticos.*

Sin embargo, su adopción aún es limitada y depende del nivel de digitalización del ecosistema portuario. ^[29]

La **trazabilidad** documental permite seguir el **ciclo de vida** de los **documentos logísticos** desde su emisión hasta su uso final, lo que garantiza la **transparencia y el control**. En entornos digitales, esta trazabilidad se consigue mediante plataformas integradas y tecnologías como el blockchain.

Esto resulta fundamental para reducir disputas, optimizar los procesos y garantizar la integridad de la información dentro de la cadena logística. ^[26]

■ **Gobernanza de datos**

Los **estándares de datos portuarios** son esenciales para garantizar la interoperabilidad entre los diferentes sistemas y agentes del ecosistema logístico. En la ejecución, estos estándares definen la estructura, la denominación y la transmisión de los datos relacionados con contenedores, buques, eventos operativos y documentación. Sin un lenguaje común, la integración entre sistemas como **TOS, PCS, aduanas y plataformas externas** se vuelve compleja y propensa a errores. La adopción de estándares **reduce las fricciones** en el intercambio de información, **facilita la automatización de procesos y mejora la coordinación logística**. ^[30]

La **calidad de los datos** es un factor crítico para el funcionamiento eficiente de un puerto digitalizado. En entornos operativos, los datos incorrectos, incompletos o duplicados pueden provocar errores en la planificación, retrasos en las operaciones y decisiones ineficaces. Por este motivo, en la práctica se implementan **mecanismos de validación automática, controles en la introducción de datos** (por ejemplo, mediante OCR o sensores) y procesos de limpieza y supervisión continua. Una alta calidad de los datos permite mejorar la precisión de los análisis, optimizar la asignación de recursos y reducir los riesgos operativos. ^[31]

■ Ciberseguridad y protección de información

La ciberseguridad es un **componente estratégico de la gobernanza de datos**, especialmente en puertos altamente digitalizados, donde están interconectados múltiples sistemas. En situaciones reales, esto implica *implementar controles de acceso, encriptación de datos, supervisión de amenazas y políticas de seguridad que protejan tanto la información operativa como los sistemas críticos*. La creciente digitalización aumenta **la exposición a los riesgos cibernéticos**, por lo que **proteger** la información es fundamental para **garantizar la continuidad operativa, evitar interrupciones y mantener la confianza** entre los participantes del ecosistema portuario. ^[31]

5. Analítica avanzada e Inteligencia Artificial

Esta capa comprende las tecnologías que **transforman datos en decisiones**. La analítica avanzada y la inteligencia artificial permiten transformar grandes volúmenes de datos generados en las operaciones portuarias en **información útil para la toma de decisiones**. A través del uso de **modelos predictivos, aprendizaje automático y análisis en tiempo real**, estas tecnologías facilitan la optimización de procesos, la anticipación de eventos operativos y una gestión más eficiente de los recursos, aportando mayor precisión y capacidad de respuesta en entornos portuarios cada vez más dinámicos.

Figura 6. Aplicación de analítica avanzada e inteligencia artificial en operaciones portuarias



Fuente: Prosertek. (s.f.). La inteligencia artificial transformando la seguridad en los puertos: Innovaciones y beneficios. <https://prosertek.com/es/blog/la-inteligencia-artificial-transformando-la-seguridad-en-los-puertos/>

■ Inteligencia Artificial

La analítica avanzada y la inteligencia artificial permiten **transformar los datos operativos en decisiones aplicables en el entorno portuario**. En términos operativos, estas tecnologías se implementan a partir de los datos generados por el TOS, sensores IoT, sistemas de tráfico y plataformas logísticas, lo que *permite modelar patrones, predecir comportamientos y optimizar procesos*.^[31]

Un ejemplo de aplicación real es el uso del **aprendizaje automático** en plataformas como **Port Optimizer**, en el *puerto de Los Ángeles*, donde se integran datos del ecosistema portuario para **mejorar la planificación, la utilización de activos y la coordinación logística entre los diferentes agentes implicados**.^[27]

■ Computer vision y análisis de imágenes

La computer vision permite el análisis de imágenes y vídeos en tiempo real mediante el uso de modelos de inteligencia artificial, con el objetivo de **identificar patrones, detectar eventos y generar información útil para la toma de decisiones**. A diferencia de su aplicación en la captura de datos (como la lectura de contenedores o placas, abordada en la sección 2.1), en este caso su valor radica en la interpretación automatizada de la información visual.

En el ámbito portuario, esta tecnología se emplea para *supervisar operaciones, identificar anomalías y fortalecer la seguridad operacional*. Por ejemplo, permite identificar comportamientos inusuales en equipos, detectar riesgos en el patio o validar que los procesos se estén ejecutando correctamente, generando **alertas en tiempo real** que facilitan una respuesta más rápida y precisa.

Un caso práctico interesante al respecto es el de *Piraeus Container Terminal (PCT)* en Grecia. Este puerto utiliza cámaras con inteligencia artificial integrada para comprobar si los cierres de los contenedores están intactos. *El sistema captura imágenes de la parte frontal de cada contenedor durante la carga o la descarga*. A continuación, se aplica la *detección de objetos a las imágenes para localizar los cierres de los*

contenedores. Si falta un cierre o está dañado, se activa una **alerta** que avisa a las autoridades portuarias para que investiguen el asunto. ^[32]

La implementación de este sistema se basa en **modelos de análisis, como algoritmos de machine learning y visión artificial**, que procesan grandes volúmenes de datos provenientes de cámaras distribuidas en el puerto. Esta funcionalidad permite transformar información visual en datos utilizables, lo que a su vez optimiza la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta ante eventos.



OCR avanzado

El OCR avanzado es una aplicación de la **computer vision** que utiliza **modelos de inteligencia artificial** para reconocer **caracteres en imágenes** y procesar esa información dentro de flujos operativos más amplios. En este entorno, su función se centra en la validación, el análisis y el soporte para la toma de decisiones.

En el ámbito de las operaciones portuarias, el OCR avanzado posibilita la *realización de una comparación automática de la información capturada con registros existentes, la detección de inconsistencias y la validación de procesos en tiempo real*. Por ejemplo, puede identificar discrepancias entre el contenedor registrado y el físicamente presente, o verificar la correcta asignación de unidades dentro del sistema. Al integrarse con otras herramientas de analítica, el **OCR** contribuye a la automatización completa de los procesos, la mejora de la calidad de los datos y la reducción de los errores operativos, lo que fortalece la trazabilidad y el control dentro del puerto. ^[33]

Detección de daños en contenedores

La detección de daños en contenedores mediante el **análisis de imágenes** es una aplicación en auge de la inteligencia artificial en los puertos. En la práctica, esta tecnología utiliza **modelos de visión computacional** para detectar deformaciones, golpes u otras anomalías en la estructura de los contenedores mientras se encuentran en el terminal. Su implementación reduce la dependencia de las inspecciones manuales, aumenta la precisión en la identificación de daños y genera pruebas visuales para los procesos de reclamación. Aunque su adopción aún es limitada, supone una importante evolución hacia operaciones más automatizadas y basadas en datos. ^[34]

Análisis de vídeo en operaciones portuarias

El análisis de vídeo posibilita la **supervisión y optimización de las operaciones** mediante el empleo de modelos de inteligencia artificial que **procesan imágenes capturadas en tiempo real**. A diferencia de la simple captura de vídeo, esta tecnología se enfoca en la **interpretación automática de la información visual** para generar **alertas, identificar patrones y apoyar la toma de decisiones**.

En los puertos, esta tecnología se utiliza para analizar el *movimiento de equipos, detectar comportamientos anómalos, identificar riesgos operativos y evaluar los flujos de operación*. Por ejemplo, es capaz de identificar situaciones de congestión en el patio, uso ineficiente de equipos o situaciones de riesgo, generando alertas sin necesidad de supervisión humana constante.

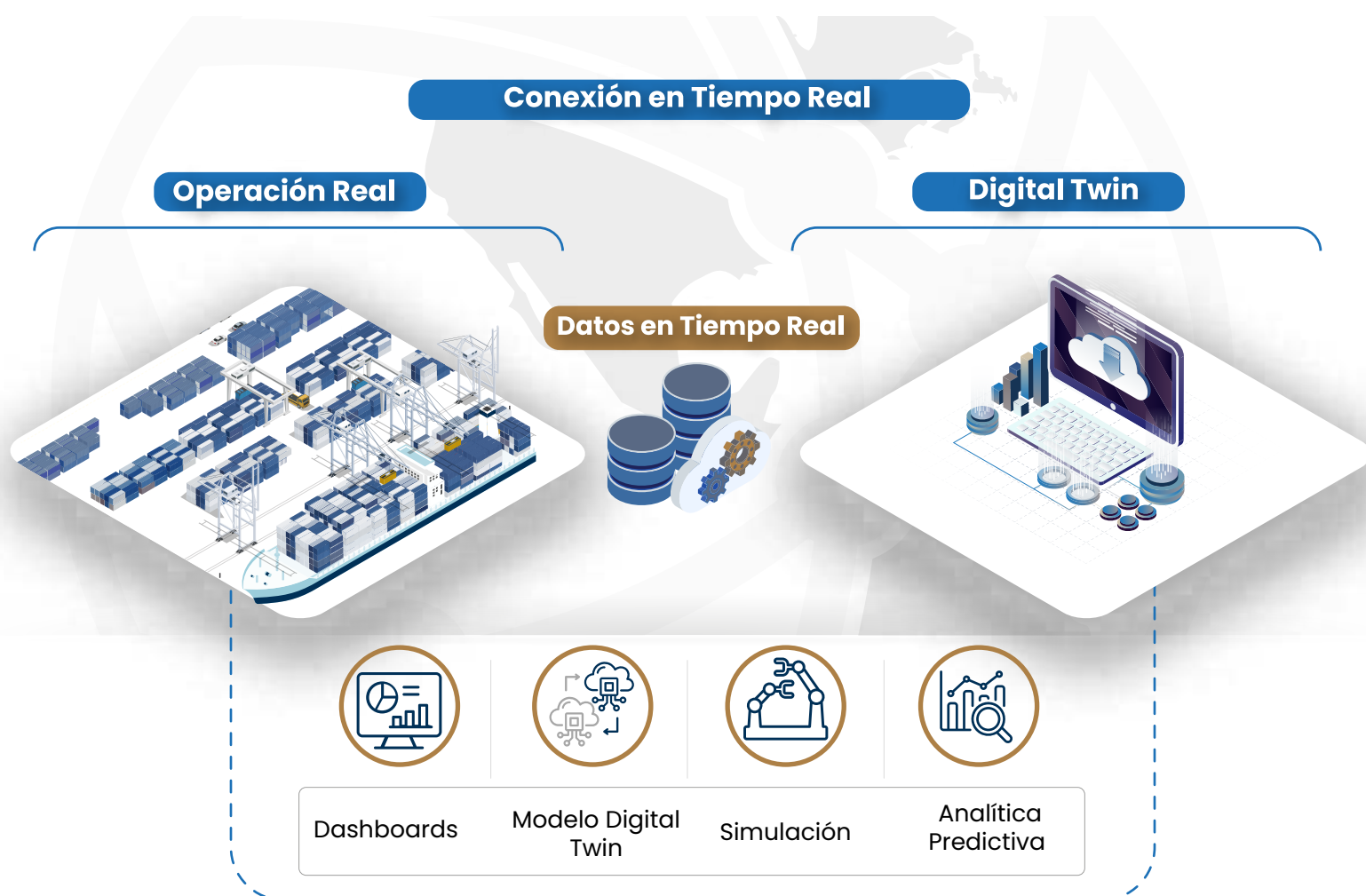
En su implementación, el análisis de vídeo se integra con plataformas analíticas y sistemas de control, utilizando modelos de machine learning y visión artificial para procesar grandes volúmenes de datos visuales. Este procedimiento posibilita la identificación de ineficiencias operativas, el

perfeccionamiento de la seguridad y la optimización de la gestión de recursos en entornos complejos donde resulta limitada la supervisión manual.^[24]

6. Aplicaciones de negocio y simulación

Esta capa involucra tecnologías que usan inteligencia para planificación estratégica.

Figura 7. Herramientas de simulación y análisis para la planificación operativa



Fuente: Ilustración creada para fines explicativos.

■ Dashboards operativos

Los dashboards operativos permiten **visualizar en tiempo real el rendimiento de las operaciones portuarias** a través de indicadores clave, como la productividad de las grúas, los tiempos de atención, la ocupación del patio y el flujo de camiones. Operativamente, estos cuadros de mando se alimentan de datos procedentes del **TOS, sensores IoT y plataformas de integración**, y consolidan la información en interfaces accesibles para los operadores y los responsables de la toma de decisiones. Su implementación presenta un alto nivel de adopción a nivel global debido a su relativa facilidad de integración y bajo nivel de complejidad técnica. Estas herramientas permiten mejorar la visibilidad operativa, reducir tiempos de análisis y facilitar la identificación de cuellos de botella. Plataformas como Tideworks Insight permiten generar reportes en tiempo casi real, contribuyendo a mejorar KPIs como tiempo de ciclo, utilización de activos y throughput del terminal. ^[35]

■ Sistemas de soporte a decisiones

Los sistemas de apoyo a la toma de decisiones permiten **analizar información operativa y generar recomendaciones para optimizar procesos**. A diferencia de los dashboards, que muestran información, los sistemas de apoyo a la toma de decisiones (DSS, por sus siglas en inglés) *incorporan lógica analítica para sugerir acciones, como la asignación de recursos, la priorización de movimientos o ajustes en la operación.*

En la práctica, estos sistemas se integran con el **TOS y con plataformas analíticas** para apoyar la toma de decisiones en tiempo real o en la planificación operativa. Su nivel de adopción es medio, ya que se requiere de una mayor madurez en la gestión de datos y capacidades analíticas dentro del puerto. En algunos casos, se implementan como módulos adicionales en plataformas existentes, lo que permite su adopción progresiva sin necesidad de rediseñar toda la arquitectura tecnológica. ^[36]

Algunas aplicaciones de los sistemas de soporte a decisiones son:

Planificación de capacidad

La planificación de la capacidad permite estimar y gestionar el uso de recursos como **grúas, espacio en patio, muelles y equipos** con el fin de evitar congestiones y maximizar la eficiencia operativa. En la práctica, se basa en el *análisis de datos históricos y proyecciones de la demanda para anticipar escenarios de carga*.

Su nivel de adopción es medio-alto, ya que muchas terminales ya realizan este tipo de análisis, aunque no siempre utilizan herramientas avanzadas. En entornos más desarrollados, esta planificación se apoya en modelos analíticos y herramientas digitales que permiten ajustar la capacidad función de las variaciones de la demanda o de las condiciones operativas. ^[37]

Simulación de operaciones portuarias

La simulación de operaciones permite **modelar el comportamiento del puerto** en diferentes escenarios operativos y evaluar el impacto de cambios en la infraestructura, los procesos o la demanda. En la práctica, se utilizan modelos que replican el flujo de contenedores, los movimientos de los equipos y las operaciones logísticas para analizar posibles mejoras.

Su adopción es media, sobre todo en las fases de planificación o diseño de terminales, aunque cada vez se utiliza más también en operaciones para evaluar escenarios específicos. Estas herramientas permiten reducir los riesgos antes de implementar cambios reales y mejorar la adopción de decisiones estratégicas. ^[31]

Optimización logística basada en simulación

La optimización basada en simulación combina **modelos de simulación con algoritmos de optimización** para identificar la mejor configuración operativa posible. En la práctica, esto se traduce en una mejor asignación de recursos, *una reducción de los tiempos de operación y una minimización de los costos logísticos*.

Su nivel de adopción es medio-bajo, ya que requiere capacidades técnicas avanzadas y una base de datos sólida. Sin embargo, su valor es

alto en entornos complejos en los que múltiples variables afectan a la operación. Estas soluciones suelen implementarse de forma puntual en procesos específicos, como la planificación de patios o la asignación de equipos, sin necesidad de transformar por completo el sistema portuario.

■ Digital Twins

Los gemelos digitales son una de las **aplicaciones más avanzadas** de esta categoría, ya que *permiten crear una réplica virtual del puerto que se alimenta de datos en tiempo real*. En la práctica, estos modelos permiten **simular escenarios, supervisar operaciones y optimizar la adopción de decisiones estratégicas**.

El **puerto de Rotterdam** ha desarrollado iniciativas de gemelos digitales para mejorar la **gestión de la infraestructura y las operaciones**, integrando datos en tiempo real para optimizar la planificación y el mantenimiento.

Esta implementación permite anticipar problemas, evaluar escenarios futuros y mejorar la eficiencia operativa.

Sin embargo, su nivel de adopción es aún bajo a escala mundial debido a su complejidad técnica, a los requerimientos de integración de datos y a la inversión necesaria. A pesar de ello, se trata de una tendencia clara en la evolución hacia smart ports y altamente digitalizados. ^[38]

Integración y adopción progresiva

Es importante destacar que las tecnologías antes mencionadas no requieren implementarse de manera simultánea para generar valor. En la práctica, los puertos adoptan estas soluciones de forma progresiva, comenzando por herramientas de mayor madurez como dashboards operativos y avanzando hacia soluciones más complejas como simulación y **Digital Twins**.

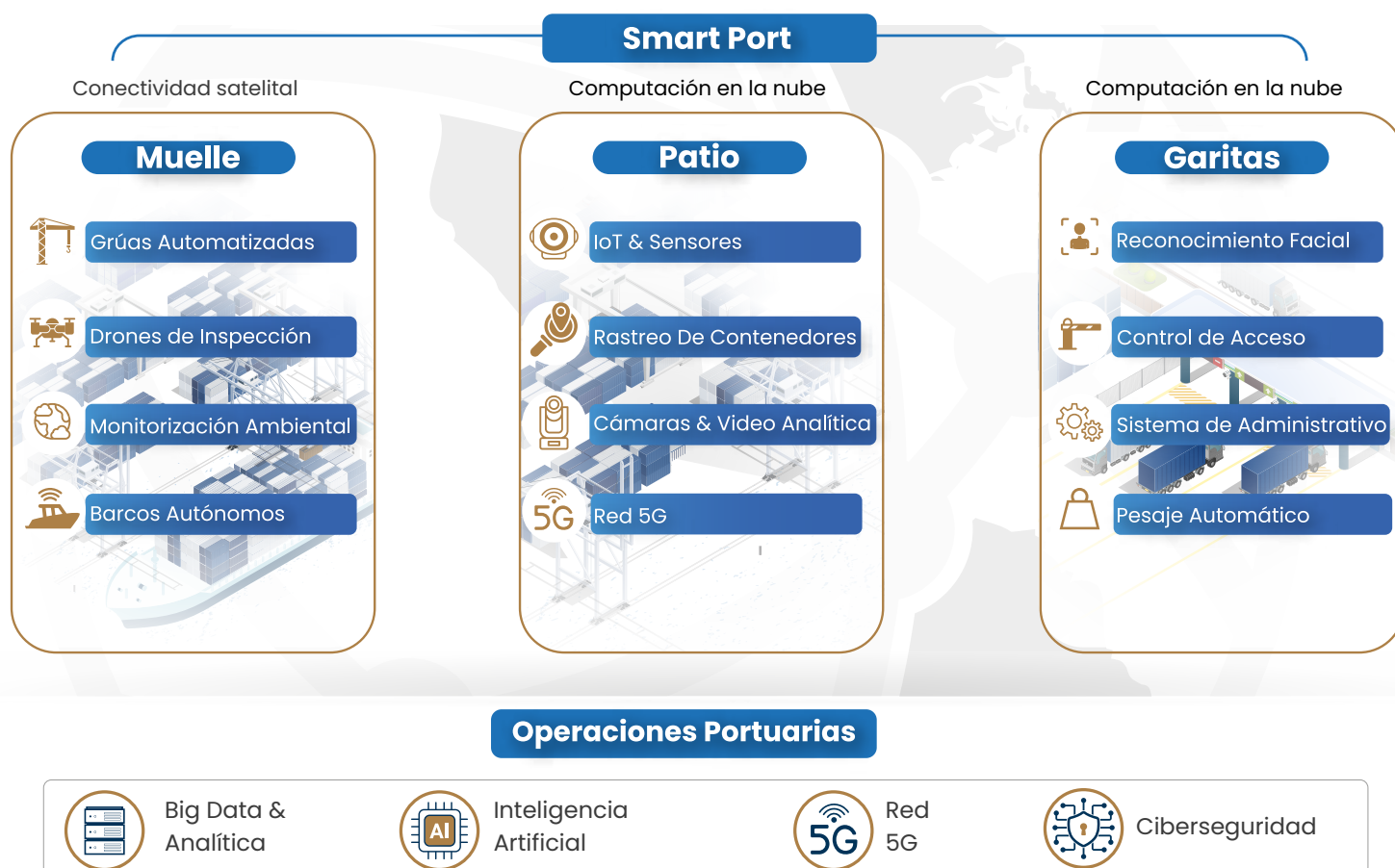
Por ejemplo, un puerto puede implementar dashboards, sistemas de citas o analítica avanzada en procesos específicos sin contar

necesariamente con un **Port Community System** completo. De igual forma, es posible aplicar algoritmos de optimización en áreas puntuales sin haber digitalizado toda la operación.

Este enfoque modular permite reducir barreras de entrada, generar beneficios tempranos y construir gradualmente una arquitectura tecnológica más avanzada, alineada con las capacidades y necesidades del puerto.

A continuación, se muestra un diagrama de un smart port aplicando múltiples tecnologías simultáneamente: (incluir diagrama de operaciones portuarias e identificar las tecnologías en muelle, patio, garitas, equipos, etc.)

Figura 8 . Diagrama de Interacción de tecnologías en las distintas etapas de la operación portuaria



Fuente: Ilustración creada para fines explicativos.

Referencias

- [1] Fundación Valenciaport. (2020). Manual de puertos inteligentes: Estrategia y hoja de ruta (K. Lucenti, Ed.). Banco Interamericano de Desarrollo.
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Manual-de-puertos-inteligentes-Estrategia-y-hoja-de-ruta.pdf>
- [2] International Transport Forum. (2021). Container port automation: Impacts and implications [Informe técnico]. OECD/ITF.
<https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/container-port-automation.pdf>
- [3] Envira. (2024, 21 de mayo). Sensores para medir la contaminación del aire en los puertos. <https://envira.es/sensores-medida-contaminacion-aire-puerto/> Deep Insight. Monitorización marítima y portuaria: Soluciones de inteligencia artificial para la optimización operativa.
<https://www.deep-insight.es/monitorizacion-maritima-y-portuaria>
- [4] Lu, M., & Zhou, Y. (2025). Digital economy and high-quality development of marine economy: Influence mechanism and spatial effect. *Regional Studies in Marine Science*, 81, Artículo 103901.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302504962X>
- [5] Bryfors, U., Cederqvist, H., Henriksson, B., & Spink, A. (2006). Grúas inteligentes: Ingenio en movimiento. *Revista ABB*.
https://library.e.abb.com/public/e7e2cbd72087cf11c12571dc003e329c/56-59%203M652_SPA72dpi.pdf
- [6] UMILES Group. (29 de mayo de 2025). Innovación en el sector náutico portuario: El impacto de los drones.
<https://umilesgroup.com/innovacion-en-el-sector-nautico-portuario-el-impacto-de-los-drones/>
- [7] Navalís University. (2024, 6 de febrero). 5G privado en puertos: Casos de uso reales y beneficios. <https://navalis.university/5g-privado-en-puertos-casos-de-uso-reales-y/>

[8] Mecalux. (2024, 15 de enero). ¿Qué es el wifi industrial y cómo potencia el centro logístico? <https://www.mecalux.com.ar/blog/wifi-industrial>
 PUSR. (2024, diciembre 19). ¿Cuál es el rango máximo de WiFi de los routers industriales? Recuperado de <https://www.pusr.com/blog/Cua-l-es-el-rango-ma-ximo-de-WiFi-de-los-routers-industriales>

[9] Sigfox. IoT solutions for supply chain & logistics.
<https://www.sigfox.com/use-cases/supply-chain-logistics/>

[10] Corvalent. (2023, 27 de junio). Ports and logistics hubs use edge computing to tackle congestion.
<https://corvalent.com/news/ports-and-logistics-hubs-use-edge-computing-to-tackle-congestion/>

[11] Arsys. (2022, 10 de marzo). ¿Qué es un Gateway IoT y cómo funciona?
<https://www.arsys.es/blog/gateway-iot>

[12] OECD. (2012). Machine-to-machine communications: Connecting billions of devices (OECD Digital Economy Papers No. 192). OECD Publishing.
<https://doi.org/10.1787/5k9gsh2gp043-en>

[13] Kaleris. Terminal Operating System (TOS) solutions for marine and intermodal terminals.
<https://kaleris.com/solutions/terminal-operating-system/>

[14] APM Terminals. APM Terminals Valencia.
<https://www.apmterminals.com/es/valencia>

[15] Motilde. (2023, 27 de junio). Supervisar un Terminal Operating System (TOS) en tiempo real. <https://motilde.com/es/supervisar-terminal-operating-system-tos-en-tiempo-real/>

[16] Kaleris. Transnet case study: Modernizing terminal operations across South Africa. <https://kaleris.com/case-study/transnet-case-study/>

[17] Container News Team. (6 de diciembre de 2022). CyberLogitec's OPUS Terminal implemented at Qinzhou Automated Container Terminal.

[18] Tideworks Technology. (2021, 23 de febrero). Tideworks Technology introduces Mainsail 10 and announces go-live at MIT. <https://www.tideworks.com/tideworks-technology-introduces-mainsail-10-and-announces-go-live-at-mit/>

[19] Maritime and Port Authority of Singapore. (2019, 9 de abril). Annex: Maritime Innovation Lab Launch [Folleto informativo]. https://www.mpa.gov.sg/docs/mpalibraries/media-releases/older/annex---maritime-innovation-lab-launch_9-apr.pdf.

[20] Tideworks Technology. Crowley case study: Modernizing terminal operations with Tideworks' TOS. <https://info.tideworks.com/crowley-case-study>

[21] Naucher Global. (2025, 15 de mayo). APM Terminals culmina en Valencia la implantación del sistema operativo Navis N4. <https://www.naucher.com/apm-terminals-culmina-en-valencia-la-implantacion-del-sistema-operativo-navis-n4/>

[22] CyberLogitec. (2019, enero). CyberLogitec & PIL: Strategic partnership for operational efficiency [Caso de estudio]. https://www.cyberlogitec.com/wp-content/uploads/2019/01/CyberLogitec_PIL_4pp_CaseStudy_Web.pdf

[23] TBA Group. Autostore Terminal Operating System (TOS) for small to medium-sized terminals. <https://tba.group/software/autostore-terminal-operating-system>

[24] World Bank. (2023). Port Community Systems: Lessons from global experience (Conference Edition). World Bank Group. <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/68e8007a36a64995a1d299069ffd7852-0430012023/original/Port-Community-System-Conference-Edition.pdf>

[25] Moilanen, J. (2024, 15 de marzo). The modern data stack is collapsing: ODPS 4.0 might be the lifeboat. Medium. <https://medium.com/@dr.jarkko.moilanen/the-modern-data-stack-is-collapsing-odps-4-0-might-be-the-lifeboat-86497d0e5868>

[26] UNCTAD. (2025). Review of Maritime Transport 2025 (Sales No. E.25.II.D.1). United Nations.
https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2025_en.pdf

[27] Port of Los Angeles. Port Optimizer™: Digitizing the supply chain for enhanced visibility and efficiency.
<https://portoflosangeles.org/business/supply-chain/port-optimizer%E2%84%A2>

[28] Port of Rotterdam. (2021, 16 de diciembre). Digital Quay Connect service makes export to the UK cheaper and more efficient.
<https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/digital-quay-connect-service-makes-export-to-the-uk-cheaper-and-more>

[29] UniAthena. (2024, 18 de marzo). Revolutionising supply chains with blockchain technology: Automated verification through smart contracts.
<https://uniathena.com/revolutionising-supply-chains-with-blockchain-technology>

[30] UNCTAD. Trade facilitation: Enhancing efficiency and transparency in global logistics.
<https://unctad.org/topic/transport-and-trade-logistics/trade-facilitation>

[31] World Bank. (2024). The Container Port Performance Index 2023: A comparable assessment of container port efficiency (Report No. PI76624). World Bank Group.
<https://documents1.worldbank.org/curated/en/099073025114520809/pdf/PI76624-a344f438-24ae-4721-bd90-9bef51983f0b.pdf>

[32] Ultralytics. (2023, 14 de agosto). Optimizing maritime trade with computer vision in ports.
<https://www.ultralytics.com/blog/optimizing-maritime-trade-with-computer-vision-in-ports>

[33] MOBOTIX. (2025, 27 de enero). Guía de soluciones OCR: Automatización y seguridad mediante el reconocimiento de caracteres [E-book].
https://www.mobotix.com/sites/default/files/2025-01/MOBOTIX_E-book_OCR_Guide_es_250127_web.pdf

[34] AllRead. (2022, 19 de octubre). Cómo el Computer Vision está haciendo más seguras las inspecciones de contenedores en puertos.
<https://www.allread.ai/es/como-el-computer-vision-esta-haciendo-mas-seguras-las-inspecciones-de-contenedores-en-puertos/>

[35] Tideworks Technology. Insight: Data platform for terminal operations and logistics analytics. <https://tideworks.com/insight-data-platform/>

[36] Kizilay, D., & Eliiyi, D. T. (2021). A comprehensive review and classification of the gate-to-gate container terminal operations. Decision Support Systems, 143, 113498. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113498>

[37] UNCTAD. (2023). Review of Maritime Transport 2023: Towards a green and digital future (Sales No. E.23.II.D.18). United Nations.
https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2023_en.pdf

[38] DITTO. A digital twin for the Port of Rotterdam by Esri. Digital Twins of the Ocean.
<https://ditto-oceandecade.org/use-cases/a-digital-twin-for-the-port-of-rotterdam-by-esri/>

En la siguiente parte de esta serie de documentos, se abordará **los casos internacionales de éxito en la implementación de puertos inteligentes**, para más información sobre las publicaciones de Georgia Tech Panamá puede visitar

<https://www.gatech.pa/working-papers>.

Descubre más...



gatech.pa





Georgia Tech **Panama**

Logistics Innovation & Research Center

Un centro de innovación



CONTÁCTANOS

(+507) 395-3030

georgiatechpanama@gatech.pa



gatechpanama