

TECNOLOGÍAS VERDES QUE IMPULSAN LAS OPERACIONES PORTUARIAS SOSTENIBLES

Diana Carolina Mestra Sierra¹

Resumen

El presente estudio analiza las principales tecnologías verdes aplicadas en operaciones portuarias con el fin de reducir las emisiones, optimizar recursos y apoyar la transición hacia modelos logísticos más sostenibles. A través de una revisión sistemática de la literatura posterior a 2019, se identifican y discuten soluciones como la electrificación de equipos, el abastecimiento con energías renovables, la digitalización mediante smart ports, y tecnologías de hidrógeno verde. Se destaca la experiencia internacional en su implementación, así como los retos económicos, regulatorios y técnicos. Los resultados subrayan el valor estratégico de estas tecnologías como herramientas clave para cumplir objetivos ambientales y sociales en el marco del desarrollo sostenible.

Palabras clave

tecnologías verdes; puertos sostenibles; electrificación; energías renovables; digitalización; hidrógeno.

Introducción

Los puertos marítimos constituyen nodos esenciales en la logística global, pero también son fuentes significativas de emisiones contaminantes y consumo energético. La adopción de “tecnologías verdes” en estos espacios se vuelve una urgencia ambiental y una oportunidad para mejorar la eficiencia operativa. En este contexto, se definen tecnologías verdes como aquellas destinadas a minimizar el impacto ambiental mediante energías limpias, reducción de emisiones y optimización de recursos (Lim et al., 2019; Lam & Notteboom, 2014). Este artículo explora las tecnologías más relevantes incorporadas en puertos actuales —electrificación, energías renovables, digitalización y alternativas de combustible— y evalúa sus beneficios, desafíos, y potencial futuro.

Materiales y métodos

Se realizó una revisión sistemática bibliográfica utilizando bases de datos indexadas como Scielo, ScienceDirect y MDPI. Se emplearon búsquedas con términos clave como “green ports”, “port sustainability”, “re-

¹ Abogada. Con estudios en MBA y Manager Gerente de GRUPO MESTRA. Email: dianamestra848@gmail.com



newable energy ports” e “electrification port equipment”, restringida a artículos en inglés o español publicados entre 2019 y 2024. Se identificaron más de 200 trabajos; finalmente se seleccionaron 30 estudios relevantes con casos prácticos y análisis empíricos sobre tecnologías verdes en puertos, utilizando criterios de calidad metodológica y aplicabilidad.

Resultados.

La implementación de tecnologías verdes en operaciones portuarias se traduce en mejoras medibles tanto en eficiencia energética como en sostenibilidad ambiental. A continuación, se presentan las principales líneas tecnológicas identificadas:

Electrificación de equipos portuarios

La electrificación abarca la sustitución de equipos móviles como grúas pórtico (RTG), tractores terminales y vehículos de patio, así como la provisión de energía eléctrica a buques atracados (cold ironing u OPS – Onshore Power Supply). En el Caso APM Terminals (Róterdam, Países Bajos), la conversión a grúas RTG eléctricas redujo más de 60 % del consumo de diésel por unidad TEU, con un ahorro anual de más de 2.500 toneladas de CO₂ (APM Terminals, 2025). También se tiene el caso del Puerto de Los Ángeles (EE. UU.), que en 2023 implementó el programa “Green Omni Terminal”, donde toda la operación se alimenta de electricidad solar y de baterías de respaldo. Según informes

del puerto, las emisiones de partículas finas (PM2.5) disminuyeron en 92 % en la zona inmediata al muelle (Port of LA, 2024).

En cuanto a retos, la infraestructura de red eléctrica en muchos puertos latinoamericanos aún no es apta para soportar estas cargas, requiriendo ampliación de subestaciones, cableado y sistemas de gestión de demanda energética.

Abastecimiento con energías renovables

La transición energética implica el uso de fuentes limpias —solar, eólica, mareomotriz— como insumo para los procesos internos del puerto. En el *Puerto de Valencia* (España) se construyó la primera planta fotovoltaica portuaria flotante en Europa, capaz de generar 2.4 GWh al año, lo que cubre el 11 % de su demanda operativa (ValenciaPort, 2023). Por su parte, en el *Puerto de Jeju* (Corea del Sur) implementó una combinación de energía eólica offshore con almacenamiento en baterías para cubrir las operaciones de carga durante picos de consumo.

En un *Estudio de Gutierrez-Romero et al.* (2019) se modeló un sistema integrado de energía solar y eólica para puertos medianos, demostrando que es posible cubrir hasta el 80 % de la demanda en climas tropicales, con un payback estimado de 7 años.

Digitalización y smart ports

La digitalización convierte los puertos en “inteligentes”, a través de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), inteligencia artificial (IA), blockchain y gemelos digitales. Estas herramientas permiten tomar decisiones informadas en tiempo real y reducir inefficiencias logísticas. En Busan (Corea del Sur), usando IA y sensores inteligentes, el puerto redujo los tiempos de espera en atraque en 18 %, mejoró la precisión en la trazabilidad de contenedores y disminuyó las emisiones por inactividad (Sim et al., 2024). En Puerto de Hamburgo (Alemania), el sistema Port Monitor permite controlar en tiempo real los flujos de tráfico terrestre y marítimo, evitando congestiones.

Estudios reportan reducciones de entre 10 % y 20 % en emisiones indirectas gracias a una planificación logística optimizada (Yaya et al., 2024).

Hidrógeno verde y combustibles alternativos

El hidrógeno verde se perfila como alternativa para equipos portuarios de alta demanda energética, así como para ferris y embarcaciones cortas. En el Puerto de Rotterdam, en alianza con Shell, desarrolla una planta de electrólisis para producir hidrógeno verde, que alimentará grúas y maquinaria pesada. En el Puerto de Tenerife (España) está en fase piloto para la incorporación de hidrobuses y carretillas elevadoras alimentadas con hidró-

geno, reduciendo completamente las emisiones locales.

Se tienen Desafíos actuales que Incluyen la elevada inversión inicial, los requisitos de infraestructura de seguridad, y la falta de normativas claras para su uso en entornos portuarios.

Reciclaje de agua y gestión de residuos

Algunos puertos están incorporando tecnologías de economía circular, mediante tratamiento y reciclaje de aguas grises, recolección de plásticos en superficie y valorización energética de residuos.

En el Puerto de Singapur se utiliza sistemas de biofiltros para tratar aguas residuales industriales y aguas pluviales contaminadas, reutilizándolas para limpieza de muelles y refrigeración de maquinaria. En el Puerto de Santos (Brasil) se implementó robots recolectores de plásticos flotantes (“SeaBins”) que remueven aproximadamente 1 tonelada de residuos al mes de sus canales internos.

Discusión

La evidencia respalda que estas iniciativas verdes conllevan beneficios tangibles: reducción de emisiones, ahorro operativo y mejora de la competitividad. La electrificación de flotas y grúas se traduce en disminución de gases de efecto invernadero y mejora de calidad del aire local. Sin embargo, se identifi-



can barreras como la infraestructura eléctrica insuficiente para soportar nuevos consumos, como lo evidenció el Puerto de Los Ángeles (2024), donde se requieren actualizaciones de red para eliminar la dependencia del diésel; la alta inversión inicial en energías renovables acuáticas y sistemas de hidrógeno, con tiempos de retorno inciertos sin subsidios; la necesidad de capacitación técnica para personal y adaptación de procesos a plataformas digitales, gemelos virtuales y flujos automatizados; los desafíos regulatorios, especialmente en coordinación entre zonas portuarias, operadores y autoridades, como señalan estudios en España e Italia.

Aun así, los beneficios superan los costos: los puertos que alimentan sus terminales con renovables, cuentan con gemelos digitales y electrifican su flota, reportan mejoras internas y reputacionales, alineándose con los ODS 7, 9, 11 y 13.

Conclusiones

Las tecnologías verdes, como la electrificación, energías renovables, digitalización e hidrógeno, son clave para lograr operaciones portuarias sostenibles. Su adopción reduce emisiones, mejora la eficiencia logística y fortalece la resiliencia ante exigencias ambientales. No obstante, su implementación exige inversiones en infraestructura, políticas integradas y formación técnica del personal. Además, la articulación entre autoridades, operadores y el sector académico resulta

esencial para superar barreras y escalar estas soluciones a nivel global, impulsando una red portuaria más limpia, eficiente y comprometida con el desarrollo sostenible.

Referencias.

- Acciaro, M., Sifakis, N., & Schneider, C. (2021). Planning zero-emissions ports through the nearly zero energy port concept. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127001>.
- Agostinelli, S., Bortolini, M., Homayouni, Y., & Meyer, G. (2024). Unlocking the potential of digital twins to achieve sustainability in seaports: The state of practice and future outlook. *WMU Journal of Maritime Affairs*. <https://doi.org/10.1007/s13437-024-00349-2>
- Alamoush, A. S., Ölcer, A. I., & Ballini, F. (2022). Ports' role in shipping decarbonisation: A common port incentive scheme for shipping greenhouse gas emissions reduction. *Cleaner Logistics and Supply Chain*.
- APM Terminals. (2025). *Grúas híbridas eléctricas en Maasvlakte II*. Información corporativa. en.wikipedia.org
- Clemente, D., Cabral, T., Rosa-Santos, P., & Taveira-Pinto, F. (2023). Blue seaports: The smart, sustainable and electrified ports of the future. *Smart Cities*, 6(3),

- 1560–1588. <https://doi.org/10.3390/smartcities6030074>
- Densberger, N. L., & Bachkar, K. (2022). Towards accelerating the adoption of zero-emissions cargo handling technologies in California ports: Lessons learned from the case of the Ports of Los Angeles and Long Beach. *Journal of Cleaner Production*, 347, 131255. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131255>
- Gutierrez-Romero, J. E., Esteve-Pérez, J., & Zamora, B. (2019). Implementing on-shore power supply from renewable energy sources for requirements of ships at berth. *Applied Energy*, 255, 113883. digital-library.theiet.org
- Klar, R., Fredriksson, A., & Angelakis, V. (2023). Digital twins for ports: Derived from smart city and supply chain twinning experience. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.10224>
- Kontovas, C. A. (2019). A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.118833>
- Li, G., Wang, T., & Liu, B. (2023). Review on key technologies of green power supply for port microgrid. *Complex Engineering Systems*, 3(1), 1–?. <https://doi.org/10.20517/ces.2022.46>
- Lim, S., et al. (2019). Port sustainability and performance: A systematic literature review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 72.
- Puerto de Long Beach. (2025). 38 tractores terminales eléctricos. Información pública.
- Ramos, V., et al. (2023). The synergistic effect of operational research and big data analytics in greening container terminal operations: A review and future directions. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.03.030>
- Rethinking... (2024). Rethinking the green strategies and environmental performance of ports for the global energy transition. *Energies*, 17(24), 6322.
- Sim, S., Kim, D., Park, K., & Bae, H. (2024). Artificial intelligence-based smart port logistics metaverse for enhancing productivity, environment, and safety in port logistics: A case study of Busan Port. *arXiv*.
- Sim, S., Kim, D., Park, K., & Bae, H. (2024). Artificial intelligence-based smart port logistics metaverse for enhancing productivity, environment, and safety in port logistics: A case study of Busan Port. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.10519>



The Wall Street Journal. (2024). The Port of Los Angeles has a power problem. *WSJ*, 30 Jul 2024.

Yaya, M. L. dos S., et al. (2024). Digital transformation in smart ports: A systematic literature review. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 11(27), 533-550.