



**Universidad
Europea**

**UNIVERSIDAD EUROPEA DE
MADRID**

**ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y
DISEÑO**

ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL

Máster en logística

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Impacto de las tecnologías y modelos
logísticos en la neutralidad del carbono y el
desarrollo sostenible**

Alumno: D. Tao Hu

Director: D. José Luis Martínez de Falcón Pérez

Septiembre 2023

RESUMEN

En un mundo en constante cambio, la necesidad de adoptar prácticas más sostenibles se ha vuelto imperativa. Este artículo se centra en la importancia de la logística sostenible en el contexto de los desafíos globales actuales y cómo las tecnologías y los modelos logísticos innovadores abordan esta necesidad. El cambio climático, la presión sobre los recursos naturales y la complejidad de las cadenas de suministro están impulsando la búsqueda de soluciones sostenibles en el ámbito logístico y de transporte. En este sentido, se analiza cómo dos de los puertos más importantes del mundo, Róterdam y Shanghái, están abordando estos desafíos. Estos puertos se han convertido en líderes en la implementación de prácticas de logística sostenible mediante la adopción de tecnologías avanzadas, la promoción de energías renovables y la mejora de la eficiencia energética. Además, han obtenido certificaciones de puertos verdes y han demostrado un fuerte compromiso con la responsabilidad social. Este artículo también explorará los próximos pasos en el desarrollo de la logística sostenible y ofrecerá recomendaciones para abordar estos desafíos en un mundo en constante evolución.

Palabras clave: logística, innovación, sostenible, huella de carbono, Neutralidad de carbono.

ABSTRACT

In a constantly changing world, the need to adopt more sustainable practices has become imperative. This article focuses on the importance of sustainable logistics in the context of current global challenges and how innovative logistics technologies and models address this need. Climate change, pressure on natural resources, and the complexity of supply chains are driving the search for sustainable solutions in the logistics and transportation sector. In this regard, we analyze how two of the world's most important ports, Rotterdam and Shanghai, are tackling these challenges. These ports have become leaders in implementing sustainable logistics practices by adopting advanced technologies, promoting renewable energies, and improving energy efficiency. Furthermore, they have obtained green port certifications and demonstrated a strong commitment to social responsibility. This article will also explore the next steps in sustainable logistics development and provide recommendations for addressing these challenges in an ever-evolving world.

Key words: logistics, innovation, sustainable, carbon footprint, Carbon neutrality.

Índice

RESUMEN	2
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO	8
1.3. ESTRUCTURA DEL PROYECTO.....	9
2. Antecedentes	11
2.1. La evaluación histórica del sector logístico antes de la industria 4.0	11
2.2. Industria 4.0 t las tecnologías innovadoras en el sector logístico.....	17
2.3. UN y logistica sostenible.....	21
3. La comparación de las tecnologías y procesos sostenibles logísticos con las tradicionales: Ventajas, limitaciones y desafíos	31
3.1. Ventajas	31
3.2. Limitaciones.....	44
3.3. Desafíos	48
4. Los ejemplos presentativos de innovación y sostenible en el sector logístico	53
4.1 La aplicación de vehículos de energía sostenible y Zona de bajo emisión en el sector logístico.....	53
4.2 Estudio de modelo de sostenibilidad de puerto Róterdam.....	61
4.3 Estudio del puerto de Shanghai	80
5. Estudio comparativo y análisis de los puerto de Róterdam y Shanghai	97
5.1 Comparación de políticas locales	97
5.2 Comparación de emisiones de carbono.....	99
5.3 Uso de las tecnologías innovadoras	102
5.4 Uso de energía renovable	104
5.5 Certificaciones de puertos verdes.....	106
5.6 Impacto de mercado y Responsabilidad social	109
6. Conclusiones y Recomendaciones para el Desarrollo Logístico Sostenible.....	113

Índice de Figuras

	Figura 1 Contaminación del aire.....	33
	Figura 2 La presa de 3 gargantas	34
	Figura 3 Vehículos híbridos vs vehículos electrónicos puros	38
40	Figura 4 Software inteligente para la planificación de ruta de la ultima milla, ...	
	Figura 5 Vehículos de guiado automatico(AFV) de su uso en el almacén inteligente.....	41
	Figura 6 Una estación de carga solar de vehículo electrónico	45
	Figura 7 Red eléctrica inteligente	49
	Figura 8 Residuo electrónico	52
	Figura 9 estructura de contaminación	54
	Figura 10 Composición de emisión en nivel mundial	56
	Figura 11 Plano de zona baja emisión Madrid.....	59
	Figura 12 Rotterdam Old Harbor(Oude Haven),	66
	Figura 13 Mapa de Róterdam	67
	Figura 14 Puerto de contenedores Europahaven, Rotterdam	69
	Figura 15 La plataforma de Muelle Delta.....	72
	Figura 16 AGV en uso de puerto de Róterdam	73
	Figura 17 Plataforma RWG	75
	Figura 18 Róterdam inteligente.....	76
	Figura 19 Routescanner.....	78
	Figura 20 Cogestion en el puerto de Yangshan.....	83
	Figura 21 AGVS de nueva generación en Yangshan IV	85
	Figura 22 Camiones de operación manual (Neijika) que utiliza en el puerto Yangshan I, II y III.	86
	Figura 23 AGVs con tecnología de navegación de rutas fijas por electromagnetismo	88
	Figura 24-25 AGV de tipo sensor laser y optica.....	89
	Figura 26 AGV de tipo sensor visual.....	90
	Figura 27 AGV de sensor mixta	91
	Figura 28 Funcionamiento de sistema de recarga AGV con estaciones móviles de carga.....	93
	Figura 29 Emisiones de carbono dentro del puerto de Róterdam.....	99

Figura 30 Proyecto Porthos	100
Figura 31 Sistema de alimentación eléctrica en el contexto portuario de Róterdam	103
Figura 32 Róterdam y sus competidores principales,	109
Figura 33 Objetivos sostenibles del puerto de Róterdam	111

Índice de Tablas

Tabla 1 Prioridad ambiental	61
Tabla 2 Los valores obtenidos de estudio de Zhou y Xin	64
Tabla 3 indicadores de estudio de Zhou y Xin y sus pesos	65
Tabla 4 PIB China.....	81
Tabla 5-6 estudio de relación de volumen de importación y exportación con volumen de cargo	82
Tabla 7 Indicadores de certificación de puerto verde.....	107

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, a medida que el sector logística moderna ha seguido desarrollándose continuamente, los investigadores y expertos del sector también están explorando activamente las posibilidades de desarrollo de manera sostenible en logística, y han presentado una serie de importantes logros de investigación y nuevos modelos de negocios innovadores relacionados con ello. Estas investigaciones tienen como objetivo encontrar soluciones innovadoras que satisfacen las necesidades de eficiencia y costes de producción mientras reducen el impacto ambiental lo más posible. Al mismo tiempo, con el continuo progreso e innovación tecnológica, muchas tecnologías innovadoras y sostenibles también se están aplicando gradualmente en el sector logística, explorando nuevas posibilidades para la neutralidad de carbono y el desarrollo sostenible en el dicho sector.

The Green Supply Chain, la economía circular y la economía compartida son unos ejemplos elevados y más utilizados de modelo de negocio ampliamente explorados y aplicados para mejorar la sostenibilidad de las actividades logísticas. Estos modelos enfatizan la colaboración y cooperación entre los actores logísticos para reducir al máximo posible las emisiones de carbono, disminuir el consumo de energía y el reciclaje y reutilización de recursos, es decir, uso máximo de material y energía renovable posible. Al mismo tiempo, la aplicación de tecnologías avanzadas en el sector logística también ofrece nuevas oportunidades para el desarrollo sostenible, como la introducción de sistemas de logística inteligente, vehículos eléctricos e híbridos, Internet de las cosas, análisis de big data e inteligencia artificial permite que las actividades logísticas operen de manera más eficiente y sostenible.

En este trabajo, exploraremos el impacto de las nuevas tecnologías y los nuevos modelos de negocios en el sector logística en la consecución de la neutralidad de carbono y el desarrollo sostenible. Revisaremos investigaciones anteriores y literatura relevante para comprender los retos que enfrenta el sector logística. Al comparar los modelos logísticos tradicionales con los modelos de desarrollo sostenible, analizaremos las diferencias en cuanto a la reducción de emisiones de carbono, la optimización de recursos y los

beneficios medioambientales. Además, presentaré algunos estudios de caso específicos para mostrar la aplicación y los efectos concretos del desarrollo sostenible en el sector logística. Por última parte, interpretaremos los resultados y exploraremos el potencial futuro de la logística en el ámbito del desarrollo sostenible.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el mundo actual, con el empeoramiento del cambio climático y la deterioración del medio ambiente a nivel global, el sector logística se vuelve cada mas importante en termino de la neutralidad de carbono y el desarrollo sostenible. Como un componente crucial que respalda la economía mundial, las actividades logísticas tienen un impacto significativo en indicadores ambientales como las emisiones de carbono, el consumo de energía y el desperdicio de recursos. Por lo tanto, nos enfrentamos a un gran reto: ¿cómo liderar el sector logístico hacia un futuro más ecológico, eficiente y sostenible?

1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

1. Identificar las principales corrientes de pensamiento, teorías y enfoques que han influido en el desarrollo del tema de sostenibilidad y innovación en el sector logístico a lo largo del tiempo.
2. Evaluar críticamente las diferentes perspectivas en torno a la sostenibilidad y la innovación , analizando cómo han evolucionado con el tiempo y cómo se aplican en diferentes contextos.
3. Proveer una visión panorámica y actualizada del tema de sostenibilidad y innovación en el sector logístico, ofreciendo a los lectores una comprensión comprensiva y rigurosa de su estado actual.
4. Comparar las demandas de sostenibilidad impuestas por puerto de shanghai y Róterdam y sus tecnologías, resaltando las diferencias clave y las posibles áreas de convergencia.
5. Proponer recomendaciones prácticas para el sector logístico, basadas en las conclusiones extraídas del análisis y la investigación realizados.

1.3. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

Contexto del Ámbito Logístico y Tecnologías Avanzadas para el Desarrollo Sostenible

En esta sección inicial del trabajo, se proporcionará una introducción al ámbito de la logística, destacando su importancia en la economía global y su intersección con las tecnologías avanzadas para lograr el desarrollo sostenible. Se presentarán los conceptos clave y la relevancia de la integración de tecnologías en la búsqueda de prácticas más sostenibles en la industria.

Análisis de Ventajas, Limitaciones y Desafíos

En esta sección, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de las ventajas, Limitaciones y desafíos asociados con la implementación de tecnologías avanzadas en la logística y su relación con el desarrollo sostenible. Se buscará las mejoras potenciales en eficiencia, la reducción de impactos ambientales y los obstáculos que podrían surgir en la adopción y la adaptación de estas tecnologías.

Estudio de Casos Representativos

En esta parte del trabajo, se presentarán 3 casos de estudio que representen diferentes enfoques de integración de tecnologías en la logística con miras a la sostenibilidad.

Comparativa y Análisis de los Puertos de Róterdam y Shanghái

En esta sección central del trabajo, se realizará una comparación exhaustiva entre dos puertos destacados, el Puerto de Róterdam y el Puerto de Shanghái. Se explorarán y contrastarán sus enfoques en términos de tecnologías implementadas, estrategias de sostenibilidad adoptadas y resultados obtenidos. Se evaluará cómo cada puerto aborda los desafíos específicos y se identificarán las lecciones transferibles y las mejores prácticas.

Conclusiones y Recomendaciones para el Desarrollo Logístico Sostenible

Finalmente, en esta última sección, se extraerán conclusiones significativas de la comparativa realizada y de los casos de estudio presentados. Se resaltarán los patrones, tendencias y hallazgos relevantes

para el desarrollo sostenible en la logística. Se proporcionarán recomendaciones clave para orientar futuras iniciativas y estrategias en el sector logístico, promoviendo una mayor adopción de tecnologías avanzadas y prácticas sostenibles.

2. Antecedentes

2.1. La evaluación histórica del sector logístico antes de la industria 4.0

Según la Real Academia Española (RAE), el término "logística" se refiere a "Conjunto de medios y métodos necesarios para llevar a cabo la organización de una empresa o de un servicio, especialmente de distribución.."¹El origen de este término se remonta al antiguo griego "logistikos", que significa "el que sabe calcular", enfatizando la importancia de la lógica y el cálculo en la logística. Por lo tanto, se puede decir que la logística ha existido desde los albores de la historia humana, surgida de la necesidad de almacenar y transportar diversos artículos para satisfacer las demandas de la sociedad. Inicialmente, la logística se centraba en el almacenamiento de alimentos, pero con el tiempo se expandió a otros recursos, herramientas y utensilios, creando la infraestructura correspondiente para proteger y almacenar estos elementos.²

Por otro lado, el término "logística" adquirió importancia en el ámbito militar, donde se refiere al movimiento de tropas y suministros para mejorar la eficiencia del ejército. Esto incluye la gestión y distribución de equipamiento, armas, medicamentos y suministros, asegurando su entrega en el momento y lugar correctos. En muchas guerras importantes de la historia, la logística ha desempeñado un papel crucial. De hecho, la logística moderna como disciplina científica comenzó a desarrollarse a partir de aquí.³

Y con el punto de vista histórica, el sector logística tiene sus raíces en las antiguas actividades comerciales, donde surgió la necesidad de trasladar

¹ REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: Diccionario de la lengua española, 23.^a ed., [versión 23.6 en línea]. <<https://dle.rae.es>> [13/06/2023].

² Somuyiwa, A. O., & Adewoye, J. O. (2010). Managing logistics information system: Theoretical underpinning. *Asian Journal of Business Management*, 2(2), 41-47.

³

Lumms, R. R., Krumwiede, , D. W., & Vokurka , R. J. (2001). The Relationship of Logistics to Supply Chain Management: Developing a Common Industry Definition. *Industrial Management & Data Systems*.

mercancías. Aunque se trataba de formas de logística muy simples, sentaron las bases para el sector logística actual. En aquellos tiempos, las personas se valían principalmente de caballos, toros e incluso fuerza humana para transportar los bienes necesarios. Este era un enfoque básico e incluso podría considerarse de baja eficiencia en términos de logística. Sin embargo, esta forma básica de logística utilizaba la organización y coordinación de los recursos humanos y animales para garantizar la libre circulación de mercancías.⁴

Con el paso del tiempo y el desarrollo de las ciudades y la sociedad, estas formas primitivas y espontáneas de logística ya no podían satisfacer las crecientes demandas comerciales. Esto significa que la logística también evolucionó junto con el desarrollo del comercio. Durante este período, los antiguos imperios más poderosos, como el Imperio Romano y la dinastía Han en China, comenzaron a desarrollar sistemas de transporte y comunicación especializados. El Imperio Romano construyó una impresionante red de carreteras y puentes que aún asombran hasta el día de hoy, proporcionando apoyo tanto para actividades militares como comerciales. Por su parte, en la antigua China de la dinastía Han, incluso se estableció la Ruta de la Seda, que conectaba China con el Medio Oriente, facilitando el transporte y el comercio de mercancías, es decir, a medida que la civilización avanzaba, el comercio se expandía y se requerían sistemas más sofisticados de logística. Estos desarrollos históricos marcaron un hito en la evolución de la logística, donde se empezaron a construir infraestructuras y rutas específicas para facilitar el transporte de mercancías y promover el comercio a larga distancia.⁵

Con la llegada de la primera Revolución Industrial, se produjo una transformación revolucionaria en el sector logística, impulsada por el crecimiento explosivo de la tecnología y la demanda comercial. La Revolución Industrial es uno de los eventos más importantes en la historia de la humanidad, ya que marcó un cambio social masivo de la producción artesanal a la producción mecánica. La aparición de la producción mecanizada llevó consigo un aumento significativo en la velocidad y eficiencia de la producción

⁴ Neeraja, B., Mehta, M., & Chandani, A. (2014). Supply chain and logistics for the present day business. *Procedia economics and finance*, 11, 665-675.

⁵

Farahani, R. (2011). *Logistics Operations and Management: Concepts and Models* (ISSN 2213-7866). Elsevier.

de bienes. Debido a la producción en masa y al crecimiento exponencial de la demanda comercial, se convirtió en un factor crucial contar con sistemas logísticos más eficientes.⁶

Ante esta nueva demanda, las personas comenzaron a utilizar locomotoras de vapor y barcos de vapor en lugar de la fuerza animal tradicional para el transporte de mercancías. Esto aceleró la circulación de mercancías y permitió el transporte de grandes volúmenes de productos. Estas tecnologías también impulsaron mejoras en el embalaje y en las instalaciones de almacenamiento, sentando las bases de los elementos fundamentales de la cadena de suministro.

La segunda Revolución Industrial, que tuvo lugar a finales del siglo XIX y principios del siglo XX, y la consecuencia de la Segunda Guerra Mundial tuvieron un impacto significativo en la logística. Durante la segunda Revolución Industrial, los avances tecnológicos, como la línea de montaje y las técnicas de producción en masa, revolucionaron los procesos de fabricación. Esto condujo a un aumento en los volúmenes de producción y a la necesidad de sistemas logísticos más eficientes para respaldar las crecientes industrias, mientras que después de la Segunda Guerra Mundial, la economía mundial comenzó a mostrar una tendencia cada vez más globalizada, y la logística internacional adquirió una posición destacada. Esto significaba mayores exigencias para el sector logística, lo que impulsó su desarrollo como disciplina a un ritmo más rápido que nunca.⁷

En la segunda mitad del siglo XX, el sector logística experimentó incluso una revolución de actualización cada década, aprovechando plenamente la base de la Industria 3.0 para una revolución tecnológica.⁸

Durante el período de 1950 a 1965, hubo un desequilibrio entre el desarrollo de la industria y el sector logística. En el contexto de la emergente Tercera Revolución Industrial, la capacidad de fabricación y venta de

⁶ Farahani, G. harlaftis, S. tenold, & j. valdaliso. (2012). *The World's Key Industry: History and Economics of International Shipping*. Springer.

⁷ Fernández, L. E. Í. (2012). *Breve historia de la Revolución Industrial*. Nowtilus.

⁸ Roel, V. (1998). *La tercera revolución industrial y la era del conocimiento*. Lima, Universidad Editorial Mayor de San Marcos, Fondo Editorial.

productos industriales superó con creces al sector logística, que aún no había experimentado la misma revolución. Al mismo tiempo, debido a factores como la reconstrucción posterior a la guerra y el aumento del comercio internacional, la demanda real de servicios logísticos era más alta que los factores impulsados por el aumento de la producción. Esto se debió a que la demanda logística era el resultado de múltiples factores interrelacionados. Como resultado, los investigadores comenzaron a explorar más posibilidades de desarrollo logístico más allá del enfoque tradicional en almacenamiento y transporte.

Por lo tanto, alrededor de 1965, los investigadores y las organizaciones relacionadas comenzaron a estudiar sistemáticamente la complejidad de los sistemas logísticos y las interrelaciones entre etapas como almacenamiento, transporte, inventario y gestión de pedidos. Se comenzó a explorar la posibilidad de integrar los sistemas logísticos tradicionales complejos. Durante este período, surgieron avances como la integración con la gestión de materiales y el control de inventario, la demanda de servicios al cliente, el impacto financiero de las decisiones, los intercambios comerciales con todos los componentes de la actividad y las primeras tecnologías informáticas. Se adoptó un enfoque proactivo hacia la logística como disciplina.

Durante la década de 1980, la logística se vio afectada por un contexto económico caracterizado por la escasez de capital, la crisis energética y la inflación. El surgimiento de las computadoras y la capacidad de análisis ayudaron a identificar mejoras en la logística. Por ejemplo, la utilización de computadoras permitió calcular de manera más precisa el coste real del inventario y la distribución, lo que facilitó una planificación a más largo plazo. Además, surgieron nuevos servicios de distribución que buscaban la centralización y la reducción de costes. Durante este período, los terceros proveedores de servicios logísticos también comenzaron a invertir en sistemas y equipos para mejorar su eficiencia. La globalización fue otro factor clave que impactó en la logística, ya que las organizaciones buscaban mano de obra y materiales más económicos en otras partes del mundo. Como resultado, la subcontratación se convirtió en una estrategia común para competir con empresas que tenían costes laborales más bajos. Durante este tiempo, también se observó el surgimiento de sistemas interempresariales y la aparición de la "guerra de precios", especialmente en el sector del transporte, lo que llevó a márgenes reducidos. Las fusiones de empresas se hicieron más

frecuentes, generando sinergias y economías de escala que brindaron una ventaja competitiva a las empresas más grandes.

Durante la etapa comprendida entre 1990 y 2000, el concepto de gestión de la cadena de suministro (supply chain management) comenzó a ganar relevancia. Este enfoque se basaba en el desarrollo de tecnologías de la información y comunicación (TIC) para mejorar la eficiencia y la comunicación a lo largo de la cadena de suministro. Durante este período, se hizo hincapié en la gestión de la calidad y el nivel de servicio al cliente como factores clave en la logística. Mejorar la comunicación y el flujo de información a lo largo de los distintos actores de la cadena de suministro se convirtió en una prioridad. Esto se logró mediante el uso de tecnologías como el intercambio electrónico de datos (EDI), que permitía la transmisión rápida y precisa de información entre proveedores, fabricantes, distribuidores y minoristas. Asimismo, se implementaron sistemas de gestión de inventario y planificación de la demanda basados en datos en tiempo real, lo que facilitó una mejor coordinación y sincronización de las operaciones logísticas.⁹

Es importante destacar que en ese momento por la primera vez se reconoció la importancia de la innovación como uno de los pilares fundamentales de la logística, impulsando así el desarrollo de nuevas soluciones y enfoques.

Además, durante esta etapa, se produjeron avances significativos en la gestión del transporte y la distribución. Se implementaron sistemas de seguimiento y localización de mercancías, lo que permitió un mayor control y visibilidad de los productos en tránsito. Asimismo, se utilizaron técnicas como la optimización de rutas y la consolidación de cargas para mejorar la eficiencia en la distribución.¹⁰

En resumen, a lo largo del siglo XX, el sector logística experimentó una serie de transformaciones significativas, desde el uso de la fuerza animal hasta la adopción de tecnologías avanzadas y enfoques innovadores. La logística se convirtió en una disciplina crucial para el funcionamiento eficiente de las

⁹ Klaus, P. (2009). Logistics research: a 50 years' march of ideas. *Logistics Research*, 1(1), 53-65.

¹⁰ Gimenez, C. (2006). Logistics integration processes in the food industry. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.

operaciones comerciales, satisfaciendo la creciente demanda de la producción industrial y garantizando la reducción de costes y el aumento de la eficiencia. El sector logístico continuó evolucionando y adaptándose a los cambios tecnológicos y comerciales, sentando las bases para la llegada de la Industria 4.0 y los desafíos logísticos del siglo XXI.

2.2. Industria 4.0 t las tecnologías innovadoras en el sector logístico

Con la introducción del concepto de Industria 4.0 por parte del gobierno alemán en 2011, comenzó la cuarta fase de la revolución industrial. En esta cuarta revolución industrial, la digitalización se considera su característica principal, junto con la amplia aplicación de tecnologías como Internet y el Internet de las cosas (IoT) en la industria.¹¹

La idea central de la Industria 4.0 es lograr una alta interconectividad y compartir datos en tiempo real entre dispositivos a través de la incorporación de tecnologías de vanguardia como sensores, inteligencia artificial y el IoT en los procesos de fabricación. Estos avances permiten la realización de procesos de producción inteligentes y altamente automatizados. Además de ser aplicable en la producción industrial, esta alta integración de procesos también continúa innovando el nuevo modelo de logística mencionado anteriormente, desarrollado a finales del siglo XX.¹²

En los procesos de logística altamente integrados de la Industria 4.0, se combinan tecnologías digitales y sistemas inteligentes, lo que tiene un gran significado y genera cambios significativos en la gestión y operación logística.¹³

En primer lugar, vamos a resumir los modelos de logística mencionados anteriormente, es decir, Logística 1.0, Logística 2.0 y Logística 3.0, y utilizarlos como referencia para analizar en detalle la Logística 4.0.

La Logística 1.0 surgió a principios del siglo XX con la primera revolución industrial. Los eventos emblemáticos y los principales enfoques se

¹¹ Hofmann, E., & Rüsç, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in industry*, 89, 23-34.

¹² Perasso, V. (2016). Qué es la cuarta revolución industrial (y por qué debería preocuparnos). *BBC Mundo*, 12.

¹³ Amr, M., Ezzat, M., & Kassem, S. (2019, October). Logistics 4.0: Definition and historical background. In *2019 Novel Intelligent and Leading Emerging Sciences Conference (NILES)* (Vol. 1, pp. 46-49). IEEE.

centraron en el cambio de la fuente de energía de los medios de transporte, pasando de la tracción animal a la mecanización. Esto significó que las tecnologías de transporte mecanizadas, como las máquinas de vapor, los trenes y los barcos, se utilizaron ampliamente en el sector logística. Utilizando estas tecnologías, se pudo lograr un transporte de mercancías más rápido, eficiente y en mayor cantidad sin necesidad de renovar los procesos logísticos existentes. Esto mejoró en gran medida la eficiencia y la productividad de la industria logística en ese momento.

La Logística 2.0, que se desarrolló en la década de 1960, marcó el primer intento consciente de optimización en el sector logística. Se introdujeron equipos mecanizados especializados y dedicados a la logística, con un enfoque principal en los equipos de manipulación de carga, como grúas y cintas transportadoras. Estos equipos reemplazaron aún más los procesos de manipulación de carga manuales en el sector logística, lo que representa el cambio más importante en esta serie de revoluciones logísticas, es decir, la transición de procesos manuales primitivos a procesos automatizados. Aunque aún no estaba completamente perfeccionada en esta etapa, se puede concluir preliminarmente que, con la ayuda de estos equipos mecanizados especializados, se redujo la mano de obra manual en los procesos de manipulación de carga, se mejoró la eficiencia de carga y descarga, y se redujeron los costes. Lo más importante es que se empezaron a mostrar las posibilidades de la automatización en los procesos logísticos.

La Industria 3.0, que surgió en la década de 1980, marcó la sistematización de la gestión logística. Ya no se trata simplemente de aplicar nuevas tecnologías en el sector logístico, sino de profundizar la optimización de los procesos logísticos. En esta etapa, se introdujeron las tecnologías de la información y los sistemas informáticos en la logística para optimizar y respaldar las operaciones y la toma de decisiones logísticas. Junto con la optimización más profunda de los procesos logísticos, se implementó el intercambio electrónico de datos (EDI) en los flujos logísticos para gestionar pedidos, inventarios, transporte, etc. Esto garantizó en gran medida la trazabilidad, precisión y, lo más importante, eficiencia en los procesos logísticos.

En la era de la Logística 4.0 hacia la cual nos dirigimos, se requiere utilizar tecnologías como el Internet de las cosas (IoT), la computación en la

nube y los robots inteligentes para lograr la digitalización, la inteligencia y la automatización en todas las etapas de la cadena de suministro, haciendo que la logística sea más ágil, precisa y eficiente.¹⁴

Además, el uso de datos en tiempo real y la conectividad entre dispositivos y sistemas permiten una mayor visibilidad y eficiencia en la cadena de suministro.¹⁵

La base de la Logística 4.0 radica en la digitalización, recopilación y análisis de datos de las actividades logísticas. A través de tecnologías como el Internet de las cosas (IoT) y los sensores, se puede digitalizar toda la información de cada etapa del proceso logístico, lo que permite su monitoreo y operación en tiempo real. Estos datos incluyen la ubicación precisa de la carga, información de identificación, estado y ubicación en tiempo real de las instalaciones de transporte, entre otros. Al monitorear, analizar y operar estos datos en tiempo real, las empresas logísticas pueden lograr un seguimiento y trazabilidad más preciso y eficiente de la carga, mejorando así la eficiencia general de la logística y satisfaciendo las necesidades de los clientes.¹⁶

Además, es importante destacar la automatización inteligente. Mediante el uso de tecnologías como robots, inteligencia artificial, almacenes inteligentes y vehículos autónomos, se puede lograr una automatización significativa de los procesos logísticos, reduciendo la intervención humana y, por lo tanto, disminuyendo los errores, aumentando la eficiencia operativa y reduciendo los costes laborales en comparación con la mano de obra convencional. Además, la inteligencia artificial y otras tecnologías pueden satisfacer, hasta cierto punto, las demandas en constante cambio de los

¹⁴ Tu, M., K. Lim, M., & Yang, M. F. (2018). IoT-based production logistics and supply chain system—Part 2: IoT-based cyber-physical system: a framework and evaluation. *Industrial Management & Data Systems*, 118(1), 96-125.

¹⁵ Barreto, L., Amaral, A., & Pereira, T. (2017). Industry 4.0 implications in logistics: an overview. *Procedia manufacturing*, 13, 1245-1252.

¹⁶ Cichosz, M., Wallenburg, C. M., & Knemeyer, A. M. (2020). Digital transformation at logistics service providers: barriers, success factors and leading practices. *The International Journal of Logistics Management*, 31(2), 209-238.

procesos logísticos, ya que pueden aprender, analizar y optimizar de manera autónoma, mejorando continuamente la eficiencia general.¹⁷

En cuanto a los modelos de negocio, la Logística 4.0 también presenta nuevos avances. En esta etapa, han surgido modelos de negocio radicalmente diferentes, como la colaboración, la economía circular y la economía compartida. Esto se debe a que, a medida que se desarrolla, las demandas logísticas también aumentan. Además de mejorar la eficiencia y reducir costes, también se busca reducir errores, satisfacer las demandas personalizadas de los clientes y reducir el impacto ambiental para lograr un futuro sostenible.¹⁸

En resumen, la Logística 4.0 implica una revolución logística impulsada por el contexto de la Industria 4.0. Mediante la aplicación de tecnologías digitales e sistemas inteligentes, la Logística 4.0 permite la toma de decisiones y operaciones automáticas de sistemas de inteligencia artificial, mejorando la eficiencia, precisión y sostenibilidad de la logística. A medida que la Logística 4.0 continúa desarrollándose, podemos esperar modelos de operación logística más inteligentes, eficientes y sostenibles¹⁹, lo que brindará nuevas oportunidades y desafíos para la gestión de la cadena de suministro y el comercio global.²⁰

¹⁷ Shamout, M., Ben-Abdallah, R., Alshurideh, M., Alzoubi, H., Kurdi, B. A., & Hamadneh, S. (2022). A conceptual model for the adoption of autonomous robots in supply chain and logistics industry. *Uncertain Supply Chain Management*, 10(2), 577-592.

¹⁸ Cimini, C., Lagorio, A., Romero, D., Cavalieri, S., & Stahre, J. (2020). Smart logistics and the logistics operator 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 10615-10620.

¹⁹ Hofmann, E., & Rüsçh, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in industry*, 89, 23-34.

²⁰ Efthymiou, O. K., & Ponis, S. T. (2021). Industry 4.0 technologies and their impact in contemporary logistics: A systematic literature review. *Sustainability*, 13(21), 11643.

2.3. UN y logística sostenible

El desarrollo sostenible se refiere a satisfacer las necesidades actuales de desarrollo sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades. Se centra en tres objetivos principales: económico, social y ambiental, con el objetivo de lograr el bienestar integral de la humanidad. Su historia se remonta al movimiento de protección ambiental a principios del siglo XX. En 1962, Rachel Carson publicó "Primavera silenciosa", que despertó la conciencia ambiental al plantear preocupaciones sobre la degradación del medio ambiente. En este libro, Carson describió vívidamente los efectos negativos de la contaminación ambiental y la destrucción del ecosistema causados por el uso excesivo de productos químicos y fertilizantes. Explicó los peligros de los pesticidas para el medio ambiente utilizando principios de ecología, y señaló que el uso de venenos creados por los humanos para aumentar la producción agrícola era contraproducente. Propuso que la humanidad debía tomar "otro camino". Durante este período, surgieron numerosas organizaciones y movimientos ambientales, como the Greenpeace y el Día de la Tierra.²¹

Sin embargo, el punto de inflexión real fue la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano celebrada en Estocolmo en 1972. Esta conferencia tuvo como objetivo discutir cuestiones de protección ambiental y ponerlas en la agenda mundial, sentando las bases para las iniciativas futuras de desarrollo sostenible.²² En las décadas siguientes, el concepto de desarrollo sostenible se desarrolló y expandió aún más. En 1987, la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de las Naciones Unidas (WCED) publicó el informe "Nuestro futuro común", también conocido como Informe Brundtland. Como se mencionó anteriormente, este informe definió el desarrollo sostenible como "satisfacer las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades". Esta definición enfatizó el

²¹ Bonzi, R. S. (2013). Meio século de Primavera silenciosa: um livro que mudou o mundo. *Desenvolvimento e Meio ambiente*, 28.

²² Handl, G. (2012). Declaration of the United Nations conference on the human environment (Stockholm Declaration), 1972 and the Rio Declaration on Environment and Development, 1992. *United Nations Audiovisual Library of International Law*, 11(6).

equilibrio y la coordinación entre el desarrollo económico, el progreso social y la protección del medio ambiente.²³

En 1992, la Cumbre de la Tierra de las Naciones Unidas se celebró en Río de Janeiro, Brasil, y fue un hito importante que colocó el desarrollo sostenible en la agenda global. En esta cumbre se adoptaron la "Declaración de Río" y la "Agenda 21", que registraron y planificaron los principios y acciones para el desarrollo sostenible, alentando a los países a implementar políticas y prácticas sostenibles en los ámbitos económico, social y ambiental.²⁴

Otro hito importante fue la adopción del Protocolo de Kyoto en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático celebrada en Kioto, Japón, en 1997. El Protocolo de Kyoto es un anexo a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Su objetivo principal es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente en los países industrializados. Exige que los países industrializados reduzcan sus emisiones de gases de efecto invernadero a los niveles de 1990 durante el período de 2008 a 2012. El protocolo también introduce mecanismos flexibles como el comercio de derechos de emisión y el mecanismo de desarrollo limpio para fomentar acciones de reducción de emisiones.²⁵

En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático celebrada en París en 2015, se adoptó el Acuerdo de París. El objetivo principal de este acuerdo es abordar el cambio climático a través de la cooperación global, controlando el aumento de la temperatura media global y manteniéndolo por debajo de 2 grados Celsius en comparación con los niveles preindustriales, y esforzándose por limitar el aumento a 1.5 grados Celsius. El acuerdo también alienta a los países a establecer metas de reducción de emisiones voluntarias (Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional) y

²³ Keeble, B. R. (1988). The Brundtland report: 'Our common future'. *Medicine and war*, 4(1), 17-25.

²⁴ Handl, G. (2012). Declaration of the United Nations conference on the human environment (Stockholm Declaration), 1972 and the Rio Declaration on Environment and Development, 1992. *United Nations Audiovisual Library of International Law*, 11(6).

²⁵ Protocol, K. (1997). Kyoto protocol. UNFCCC Website. Available online: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php (accessed on 1 January 2011).

proporciona apoyo financiero y transferencia de tecnología a los países en desarrollo para abordar el cambio climático. Es el acuerdo global más amplio sobre el cambio climático y tiene un significado histórico. Representa el compromiso conjunto de los gobiernos de todo el mundo con el problema del cambio climático y promueve la cooperación internacional en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la adaptación al cambio climático y el apoyo financiero.²⁶

Sin embargo, simplemente mirar desde una perspectiva histórica no es suficiente para comprender el desarrollo sostenible, debemos comprenderlo. A partir de la historia mencionada anteriormente, podemos entender que la protección del medio ambiente es el núcleo del desarrollo sostenible. Los recursos naturales no son infinitos y debemos ser conscientes de su limitación y el impacto que las actividades humanas pueden tener sobre ellos. Esto significa que la protección de un ecosistema sostenible es clave para el desarrollo sostenible. Los seres humanos dependemos de los sistemas naturales, los cuales proporcionan las condiciones necesarias para nuestra supervivencia y desarrollo, como fuentes de agua, conservación del suelo, regulación del clima, entre otros, los cuales son fundamentales para nuestra existencia y desarrollo. Dependemos de los recursos naturales para sobrevivir, para el suministro de agua, para respirar aire y para nuestro desarrollo. Por lo tanto, debemos conservar los recursos naturales limitados, tomar medidas para proteger los bosques, humedales, océanos y otros ecosistemas, permitiéndoles mantener sus funciones en un estado estable y sostenible. Esto implica, por ejemplo, prohibir la tala ilegal de bosques y la deforestación indiscriminada, regular el uso de los recursos naturales, fortalecer la gestión y supervisión de las áreas protegidas y, por supuesto, incluir un uso sostenible de la tierra, lo cual es fundamental para la industria moderna.

Además, la reducción de la contaminación es otro factor importante para lograr el desarrollo sostenible. El modelo de producción industrial ha llevado a un gran consumo de energía y, al mismo tiempo, ha generado una gran cantidad de contaminantes y desechos que son difíciles de degradar naturalmente. El proceso de urbanización sin duda ha agravado esta situación,

²⁶ Peters, G. P., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Fuss, S., Jackson, R. B., Korsbakken, J. I., ... & Nakicenovic, N. (2017). Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement. *Nature Climate Change*, 7(2), 118-122.

planteando una grave amenaza para el medio ambiente y la salud humana. Aquí es donde necesitamos medidas más estrictas de control de la contaminación, como reducir las emisiones industriales innecesarias y fortalecer la gestión de los desechos y la contaminación industrial, como la supervisión estricta de las aguas residuales industriales, entre otras posibles medidas. Sin embargo, más que simplemente reducir la contaminación existente, aquí es donde necesitamos buscar procesos de producción verde que sean más degradables y buscar posibilidades de tecnologías limpias para reducir el impacto negativo de la industria en el medio ambiente.²⁷

Como se mencionó anteriormente, la reducción de las emisiones de carbono se ha convertido en un indicador y una medida importante para el desarrollo sostenible, tal como se establece en el Acuerdo de París. En la actualidad, cada vez estamos más conscientes de que las grandes cantidades de dióxido de carbono liberadas por la quema de combustibles fósiles y la disminución de la capacidad de los bosques para absorberlo, debido a la deforestación, han sido una de las principales causas del calentamiento global y los eventos climáticos extremos en los últimos años. Para abordar este problema, debemos promover alternativas a los combustibles fósiles, como la energía solar y eólica, para reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles y disminuir las emisiones de dióxido de carbono. Al mismo tiempo, también debemos investigar y fortalecer la eficiencia energética, de modo que podamos utilizar la misma cantidad de energía con un menor impacto ambiental.²⁸

La protección de la biodiversidad también es un factor importante para el desarrollo sostenible, ya que la biodiversidad es crucial para mantener el equilibrio ecológico. Desde la era de la industrialización, el aumento drástico de las actividades humanas ha llevado a la extinción o la amenaza de muchas especies, lo que indudablemente ha resultado en la pérdida de la diversidad biológica en los ecosistemas. Para proteger los ecosistemas y la biodiversidad, es necesario prohibir aún más el comercio ilegal de vida

²⁷ Dai, Y., & Gao, H. O. (2016). Energy consumption in China's logistics industry: A decomposition analysis using the LMDI approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, 69-80.

²⁸ Hofmann, E., & Rüsçh, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in industry*, 89, 23-34.

silvestre, fortalecer la protección y la investigación de la biodiversidad y los ecosistemas, así como promover la conciencia pública sobre la protección de los ecosistemas y la biodiversidad. Esto nos permitirá reducir el impacto significativo que las actividades humanas tienen en los ecosistemas y la diversidad de especies.²⁹

En términos de la utilización eficiente de los recursos y la sostenibilidad ambiental, hemos reconocido una serie de medidas, como se mencionó anteriormente, para mitigar el impacto en el medio ambiente. Sin embargo, esto no abarca todos los aspectos del desarrollo sostenible, ya que la equidad social también es una parte integral de este concepto. Mientras protegemos los recursos naturales, también debemos abordar cuestiones sociales como la pobreza, la educación y la salud. Esto se debe a que el desarrollo sostenible no se limita solo a la preocupación por los cambios ambientales, sino que también se centra en los problemas sociales y busca el progreso y la equidad en la sociedad humana, para lograr un desarrollo sostenible en el ámbito social.³⁰

En este aspecto, nos comprometemos en primer lugar a reducir la pobreza causada por la desigualdad social, ya que no solo es un gran desafío para el desarrollo sostenible a nivel social, sino también una amenaza para el desarrollo sostenible ambiental. En este sentido, debemos promover el crecimiento económico en las áreas de pobreza al tiempo que brindamos oportunidades de empleo sostenible, asegurando que todas las personas tengan acceso a garantías económicas básicas y condiciones de vida necesarias. Solo cuando las personas se liberen de la trampa de la pobreza, se valorará un enfoque de desarrollo sostenible. Vivimos en el mismo planeta y las acciones en cualquier lugar tienen un impacto global, lo cual es otra razón importante para impulsar el desarrollo social sostenible.

Además de reducir la pobreza, también es importante esforzarse por promover y proporcionar educación de alta calidad, ya que la educación es

²⁹ Torres, J. (2001). Estrategia y plan de acción de la biodiversidad para el departamento de Huancavelica como base de su desarrollo sostenible. *Comunidad Andina. Banco Interamericano de Desarrollo. Lima-Perú*, 132.

³⁰ Foladori, G. (2006). La insostenibilidad social del desarrollo sostenible. *Portularia*, 6(2), 7-20.

fundamental para la equidad social y el desarrollo sostenible. En la teoría del desarrollo social sostenible, debemos asegurarnos de que todas las personas tengan igualdad de oportunidades para adquirir conocimientos y desarrollar su potencial. Esto requiere mejorar las infraestructuras educativas básicas, aumentar los recursos docentes, entre otros aspectos. A través del poder de la educación, es posible romper el ciclo de la pobreza y cultivar talentos innovadores y comprometidos con el desarrollo sostenible para impulsar el progreso social.³¹

La sanidad también es un factor clave en este aspecto. Proporcionar servicios de sanidad inclusivos y sostenibles hace posible que todas las personas puedan disfrutar de buena salud. Sin embargo, esto no es una tarea sencilla y requiere la construcción de instalaciones médicas sólidas, la formación de profesionales de la salud y el fortalecimiento de los sistemas de salud pública para garantizar la cobertura médica básica y establecer sistemas de seguridad social. Al lograr esto, se puede reducir la propagación de enfermedades, mejorar la calidad de vida de la población y sentar una base sólida para el desarrollo sostenible de la sociedad.

La igualdad social en sí misma también es un objetivo importante para el desarrollo sostenible. Todos nacemos diferentes, pero debemos reducir las desigualdades sociales, como la desigualdad de género, la desigualdad de la orientación sexual, la desigualdad étnica, entre otras. Solo al promover la participación de las personas podemos lograr una sociedad inclusiva, donde todos tengan voz y oportunidades para participar, Y solo cuando cada individuo disfrute de igualdad de oportunidades y trato podremos crear un futuro más próspero, estable y sostenible.

Por supuesto, cuando hablamos de desarrollo sostenible, la innovación y el desarrollo tecnológico también son factores clave e indispensables. Solo a través de la investigación y el desarrollo continuo de nuevas tecnologías podemos hacer posible la protección del medio ambiente y la utilización de recursos. Esto es fundamental para promover el logro del desarrollo sostenible.

³¹ Foladori, G., & Tommasino, H. (2000). El enfoque técnico y el enfoque social de la sustentabilidad.

En primer lugar, podemos reconocer la importancia de la investigación y el desarrollo de energías renovables. Como se mencionó anteriormente, el uso de fuentes tradicionales de energía fósil, como el petróleo, el carbón y el gas natural, conlleva graves problemas de contaminación ambiental. Por otro lado, las energías renovables, como la solar, eólica e hidroeléctrica, son fuentes de energía limpia y sostenible. Al reducir nuestra dependencia de las fuentes de energía fósil y aumentar el uso de energías renovables y limpias, podemos reducir las emisiones de carbono y disminuir nuestra dependencia de los recursos naturales limitados.³²

Al mismo tiempo, las tecnologías y procesos de producción limpia son muy importantes en este aspecto, ya que buscan reducir la contaminación en los procesos de producción mediante la disminución del consumo de recursos. En este sentido, a través de la implementación de tecnologías de fabricación más avanzadas, procesos de producción más eficientes y la posibilidad de reciclar los materiales, es posible minimizar la generación de residuos y contaminantes en los procesos de producción, al tiempo que se reduce la dependencia de los recursos naturales. Estas nuevas tecnologías y procesos no solo son significativos en términos de desarrollo sostenible y protección del medio ambiente, sino que también pueden mejorar la eficiencia de producción, reducir costes y tener un impacto importante en el ámbito económico.

En base a la discusión sobre energías renovables anteriormente mencionada, también debemos considerar la importancia de la tecnología de eficiencia energética en el desarrollo sostenible. El uso eficiente de la energía es fundamental para reducir el consumo de energía y disminuir las emisiones de carbono. Cuando hablamos de tecnología de eficiencia energética, no nos referimos únicamente a la optimización del uso de energía en la producción, sino que incluye una serie de enfoques indirectos, como la mejora del diseño de edificios, la posibilidad de reciclaje y reutilización, y la implementación de sistemas de gestión energética eficientes para optimizar y reutilizar el uso de energía. Similar a las tecnologías y procesos de producción limpia, al utilizar estas innovaciones tecnológicas, también se pueden reducir los costes y crear nuevas oportunidades laborales en términos de su impacto económico y

³² Francés, G. E. (2012). Desarrollo energético sostenible y energías renovables. *ICE, Revista de Economía*, (864).

generar un círculo virtuoso en el desarrollo sostenible en los ámbitos económico, ambiental y social.

En el contexto del desarrollo sostenible, la logística juega un papel importante. La logística se refiere al proceso de la cadena de suministro que involucra la adquisición de materias primas, producción, embalaje, transporte, almacenamiento y distribución de bienes desde los productores hasta los consumidores. La eficiencia logística tiene un impacto directo en la utilización de recursos y el medio ambiente.

En el sector logística, se requiere una mayor utilización de la investigación, desarrollo y aplicación de estas nuevas tecnologías y procesos, ya que el desarrollo sostenible mencionado anteriormente se refiere a un nivel macroscópico. Esto significa que aunque las actividades en el sector logística tienen un impacto directo en el nivel macroscópico, las mejoras y optimizaciones a nivel macroscópico solo pueden generar impactos indirectos e intangibles en el sector logística. Sin embargo, la optimización de la innovación tecnológica y los procesos en el ámbito microscópico tienen un impacto directo en la industria logística, como se mencionó anteriormente con respecto a la Industria 4.0, que afecta directamente al sector logística y promueve la aparición de la Logística 4.0.³³

El objetivo de la logística sostenible es reducir el impacto negativo en el medio ambiente mediante la reducción del consumo de energía, la disminución de residuos y emisiones, y la mejora de la eficiencia del transporte. Para lograr estos objetivos, se han implementado diversas medidas en la logística sostenible. Por ejemplo, optimizar las rutas de transporte y aumentar la capacidad de carga puede reducir el consumo de energía y las emisiones de carbono. La promoción de energías limpias y modos de transporte sostenibles, como el ferrocarril y el transporte marítimo, puede reducir las emisiones de contaminantes. Además, la capacidad de reciclaje y reutilización de los materiales de embalaje también es un factor importante a

³³ Xu, B., & Xu, R. (2022). Assessing the role of environmental regulations in improving energy efficiency and reducing CO2 emissions: Evidence from the logistics industry. *Environmental Impact Assessment Review*, 96, 106831.

considerar en la logística sostenible para reducir la generación de residuos de embalaje.³⁴

La industria logística también ha reconocido cada vez más la importancia del desarrollo sostenible y ha tomado medidas para mejorar su sostenibilidad. Muchas empresas y organizaciones están utilizando tecnologías inteligentes y dispositivos de Internet de las cosas para lograr una gestión precisa de inventarios y planificación de transporte, reduciendo el desperdicio de recursos. A través del establecimiento de sistemas de gestión de la cadena de suministro sostenible y colaborando con proveedores y socios, la industria logística ha facilitado la implementación del desarrollo sostenible.

Además, nuevas tecnologías e innovaciones están impulsando el desarrollo de la logística sostenible. Por ejemplo, el uso de drones y tecnología de conducción autónoma para el transporte de mercancías puede mejorar la eficiencia del transporte y reducir las emisiones de carbono. La aplicación de la tecnología de impresión 3D también tiene el potencial de reducir los pasos logísticos, disminuir el consumo de recursos y los costes de transporte.

La innovación en los procesos logísticos es un elemento clave para lograr el desarrollo sostenible de la industria logística. Mediante la optimización y mejora de los flujos logísticos y la cadena de suministro, es posible simplificar los nodos y rutas de transporte, lo cual puede reducir significativamente el consumo de energía y las emisiones de carbono en las actividades logísticas. Además, el intercambio de datos y la implementación de la logística inteligente pueden aumentar la eficiencia de manera considerable. Estos ejemplos permiten maximizar el uso de los recursos, reducir el consumo de energía y disminuir los residuos y la contaminación, lo cual contribuye al desarrollo sostenible de la industria logística. Sin embargo, es fundamental establecer estándares y directrices ambientales comunes en la industria logística, lo cual abre la posibilidad de un futuro más sostenible en el sector.³⁵

³⁴ Evangelista, P. (2014). Environmental sustainability practices in the transport and logistics service industry: An exploratory case study investigation. *Research in Transportation Business & Management*, 12, 63-72.

³⁵ Ternera, L. C., Sepúlveda, P. A., Vega, E. O., & Herazo, S. H. (2018). Emprendimiento e innovación como motor del desarrollo sostenible: Estudio bibliométrico (2006-2016). *Revista de ciencias sociales*, 24(4), 26-37.

En resumen y una pequeña conclusión, la logística, como parte integral de la cadena de suministro, está estrechamente relacionada con el desarrollo sostenible. A través de la optimización de los procesos logísticos, la reducción del consumo de recursos y la contaminación ambiental, la logística sostenible contribuye a lograr un desarrollo económico, social y ambiental armonioso. Con el impulso de la innovación tecnológica y la cooperación global, la logística sostenible seguirá desempeñando un papel importante para lograr los objetivos del desarrollo sostenible.

3. La comparación de las tecnologías y procesos sostenibles logísticos con las tradicionales: Ventajas, limitaciones y desafíos

3.1. Ventajas

Cuando discutimos las diferencias entre las tecnologías y procesos innovadores y sostenibles en comparación con las tecnologías y procesos tradicionales que carecen de estas características, la eficiencia energética es un factor importante a tener en cuenta. Las tecnologías y procesos innovadores y sostenibles buscan maximizar la eficiencia energética, asegurando la reducción máxima del consumo de energía a través de tecnologías eficientes y sistemas de gestión energética inteligente, mientras se maximiza la producción de trabajo efectivo. En contraste, las tecnologías y procesos tradicionales no priorizan este aspecto. Tecnologías obsoletas como los motores de combustión interna tienen una eficiencia energética más baja en comparación con las nuevas tecnologías, y una parte considerable de la energía se pierde en forma de calor residual o se utiliza ineficientemente en tareas útiles.

En este sentido, hace diez años se comenzó a hablar sobre la eficiencia y el ahorro energético de las lámparas LED. Sin embargo, hoy en día, no solo estamos discutiendo pequeños cambios en los extremos de la red eléctrica, sino que estamos hablando de la digitalización de la red eléctrica. Después de su digitalización, una red eléctrica inteligente puede reducir significativamente las pérdidas de energía durante el proceso de distribución o disminuir directamente la demanda en los períodos de máxima carga para optimizar la eficiencia energética. Esto implica una modernización y optimización de las antiguas redes de distribución utilizando tecnologías inteligentes como la computación, la comunicación industrial, el almacenamiento de energía renovable y el análisis de big data. Vale la pena mencionar que no solo tiene ventajas significativas en términos de eficiencia

energética en comparación con los sistemas de distribución antiguos, sino que también tiene un impacto ambiental importante.³⁶³⁷

El sistema eléctrico tradicional depende de fuentes de energía fósil como el carbón y el petróleo, los cuales se queman para generar vapor y conducir turbinas generadoras de electricidad. Esta es una tecnología típica de la segunda revolución industrial, influenciada por la primera revolución industrial. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, estas tecnologías tienen problemas de baja eficiencia energética. Pero no es solo eso, la combustión de combustibles fósiles también libera grandes cantidades de gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono, lo que contribuye al cambio climático global y al aumento del efecto invernadero. Esto tiene un impacto negativo significativo en el sistema climático y el equilibrio ecológico del planeta. Además, durante la combustión también se generan inevitablemente contaminantes como NOx, SO2 y partículas inhalables como PM2.5, que tienen un grave impacto negativo en la calidad del aire. Estos contaminantes están directamente relacionados con problemas como la neblina tóxica y la lluvia ácida. Sin embargo, estos no solo contaminan la atmósfera, sino que también afectan directamente la salud humana. Estas partículas microscópicas pueden atravesar fácilmente las barreras de superficie del cuerpo humano y afectar seriamente la salud de los pulmones y el corazón. Un estudio publicado en el Journal of the American Medical Association demostró que PM2.5 puede provocar depósito de placas de arterias, inflamación vascular y aterosclerosis, lo que finalmente lleva a enfermedades cardíacas u otros problemas cardiovasculares. Esta investigación, que comenzó en 1982, confirmó que cuando la concentración de PM2.5 en el aire es constantemente superior a 10 µg/m³, existe un aumento en el riesgo de muerte. Por cada aumento de 10 µg/m³ en la concentración, el riesgo de mortalidad general aumenta un 4%, el riesgo de enfermedad pulmonar y cardíaca aumenta un 6% y el riesgo de cáncer de pulmón aumenta un 8%.³⁸ Además, las partículas PM2.5 tienen una alta

³⁶ 余贻鑫. (2020). 面向 21 世纪的智能电网. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 53(6), 551-556.

³⁷ Dileep, G. J. R. E. (2020). A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable energy*, 146, 2589-2625.

³⁸ Pope III CA, Burnett RT, Thun MJ, et al. Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *JAMA*. 2002;287(9):1132-1141. doi:10.1001/jama.287.9.1132

capacidad de adsorber contaminantes orgánicos como hidrocarburos aromáticos policíclicos y metales pesados, lo que aumenta significativamente la probabilidad de cáncer, mutaciones y malformaciones. Según un artículo publicado en The Lancet por el académico Chen Zhu de la Academia China de Ciencias, se estima que cada año en China, entre 350,000 y 500,000 personas mueren prematuramente debido a la contaminación del aire exterior.³⁹

Figura 1 Contaminación del aire.



Figura 1 La contaminación del aire, Fuente: Tecnológico de Monterrey, <https://futurociudades.tec.mx/es/contaminacion-del-aire-por-que-debe-ser-un-tema-urgente>

Sin embargo, las tecnologías sostenibles e innovadoras hacen posible escapar de todos estos problemas. Por ejemplo, en una red eléctrica inteligente, ya no dependemos de una única fuente de energía fósil como fuente de energía, sino que permite una producción eficiente de energía limpia y sostenible. En 2020, la planta hidroeléctrica de las Tres Gargantas en China generó 111.8 mil millones de kilovatios-hora en un año, equivalente al consumo de energía producido por 35.63 millones de toneladas de carbón

³⁹ Chen Z, Wang JN, Ma GX, Zhang YS. China tackles the health effects of air pollution. Lancet. 2013 Dec 14;382(9909):1959-60. doi: 10.1016/S0140-6736(13)62064-4. PMID: 24332069.

después de calcular la eficiencia de generación de calor y electricidad. Esto resulta en una reducción anual de consumo de carbón de 60-70 millones de toneladas y una reducción de emisiones de dióxido de azufre de 2.5 millones de toneladas y una gran cantidad de aguas residuales industriales no cuantificadas.⁴⁰ Además de la energía hidroeléctrica, la red eléctrica inteligente también está impulsando el uso de fuentes de energía renovable como la energía eólica y solar. En los últimos tres años, la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en España se ha triplicado, pasando de 4,767 megavatios al inicio de 2019 a un total de 15,190 megavatios al final de 2021. Este crecimiento ha tenido un impacto en la estructura de generación de electricidad en España, ya que en solo dos años, la energía solar fotovoltaica aumentó del 3.55% en 2019 al 8.05% en 2021. El uso masivo de estas fuentes de energía limpia no solo minimiza el consumo de recursos naturales, sino que

Figura 2 La presa de 3 gargantas



Figura 2 La presa de 3 garganta, Fuente:
elperiodicodelaenergia,<https://elperiodicodelaenergia.com/la-central-hidroelectrica-china-de-tres-gargantas-bate-el-record-mundial-de-generacion-electrica-anual-al-alcanzar-los-1118-twh/>

⁴⁰ 龚文婷, & 刘攀. (2019). 长江上游梯级水电站群的水能宏观关系研究. *Journal of Water Resources Research*, 9, 106.

también garantiza una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero.⁴¹

Sin embargo, simplemente enfatizar las ventajas de las tecnologías sostenibles e innovadoras en términos de eficiencia energética e impacto ambiental no es suficiente. También tienen ventajas insustituibles en términos de mejorar la eficiencia económica. A través de sistemas avanzados de detección y control, big data e Internet de las cosas, se puede recopilar datos de rendimiento y eficiencia en tiempo real, e identificar y realizar mejoras y optimizaciones potenciales mediante inteligencia artificial. Además, la combinación de estas tecnologías innovadoras también puede enviar alertas y notificaciones en tiempo real para garantizar el funcionamiento fluido de los procesos de trabajo y detectar posibles fallas o problemas. En este sentido, un ejemplo típico del impacto de estos sistemas innovadores en los objetivos de sostenibilidad son los sistemas avanzados de control de emisiones que funcionan con tecnologías inteligentes. Estos sistemas garantizan el monitoreo y la regulación en tiempo real de las emisiones contaminantes en la producción y el medio ambiente, permitiendo un desarrollo más eficiente al cumplir de manera más estricta con las regulaciones ambientales. Algunos sistemas de gestión inteligente incluso pueden ajustar en tiempo real el rendimiento del motor para minimizar las emisiones en entornos específicos. Bajo la influencia de estos algoritmos y sistemas de control inteligentes, es posible ajustar la potencia, el consumo de energía y otros parámetros para garantizar un equilibrio máximo entre el aumento de la eficiencia de producción y la reducción de la contaminación ambiental. En el contexto de regulaciones ambientales cada vez más estrictas para las empresas, esto sin duda se convierte en la clave para aumentar significativamente la eficiencia de producción. Estas características de alta eficiencia no pueden ser igualadas por los sistemas tradicionales de control de emisiones, que tienen capacidades de ajuste y adaptación limitadas en tiempo real. Esto indudablemente conduciría a una disminución en la eficiencia de gestión de emisiones y a un mayor impacto en el medio ambiente.

Al mismo tiempo, es importante destacar que estas tecnologías y procesos innovadores también tienen un impacto directo y positivo en el material y la eficiencia de producción en sí misma. Por ejemplo, el uso de

⁴¹ Esteban Amaro, R., Lengua Lengua, I., & Estelles Miguel, S. (2023). Ayer y hoy de la energía fotovoltaica en España.

materiales ligeros pero robustos (como aleaciones de aluminio o fibra de carbono) para reducir el peso total del motor genera una gran diferencia de eficiencia y de impacto ambiental en comparación con los motores fabricados con materiales tradicionales que no consideran la innovación y el desarrollo sostenible (basados en los métodos tradicionales de extracción y producción de materiales). Estas tecnologías suelen implicar procesos de fabricación más eficientes y avanzados. Pueden incluir tecnologías de fabricación aditiva (como la impresión 3D) para lograr una producción más precisa y personalizada, lo que reduce el desperdicio de materiales. También se pueden implementar procesos automatizados y robóticos para mejorar la eficiencia y la calidad de la fabricación de componentes. Esto se debe a que las tecnologías innovadoras y sostenibles en el campo de los sistemas de propulsión están respaldadas por una sólida investigación y desarrollo. Se invierte en la mejora continua de los materiales y los procesos utilizados, con el objetivo de lograr un rendimiento óptimo y una mayor eficiencia energética. Esto significa buscar constantemente nuevos materiales, nuevos diseños y métodos de fabricación más eficientes y sostenibles. Mientras tanto, si bien las tecnologías tradicionales también pueden lograr avances en investigación y desarrollo, su enfoque no se centra en la sostenibilidad y la innovación de los materiales y los procesos. Esto puede limitar la adopción de nuevos materiales y tecnologías de fabricación, restringiendo así la mejora en eficiencia y sostenibilidad.⁴²

Estas tecnologías de innovación sostenible también son especialmente destacadas en la industria logística, especialmente en términos de ayudar a alcanzar los objetivos de neutralidad de carbono. Por ejemplo, a través de las ventajas de mejorar la eficiencia del combustible, las tecnologías de innovación sostenible pueden mejorar significativamente la eficiencia del combustible de los vehículos de transporte. Esto significa que se puede lograr una mayor eficiencia al consumir menos combustible durante el proceso de transporte. Algunos ejemplos en este sentido incluyen mejoras en los motores y el uso de materiales más avanzados para reducir el peso de los vehículos. Sin embargo, lo que hemos mencionado hasta ahora se refiere a tecnologías de innovación que fueron consideradas hace una década. En la actualidad, al considerar la mejora de la eficiencia del combustible, ya no nos limitamos solo a las restricciones de los combustibles fósiles. Con el rápido desarrollo de los vehículos eléctricos, las soluciones de transporte sostenibles que utilizan

⁴² Suntasig, L., & Steven, D. TECNOLOGÍA SUPERIOR EN MECÁNICA AUTOMOTRIZ.

baterías o celdas de combustible como fuente de energía se han vuelto cada vez más prominentes como una contribución importante a la sostenibilidad. En comparación con los vehículos de combustión interna, los vehículos eléctricos prácticamente no emiten gases de escape, lo que significa que los vehículos de cero emisiones son ahora posibles. La aparición de vehículos de cero emisiones significa una gran mejora para el entorno urbano. ⁴³Tomando Madrid como ejemplo, la presencia de vehículos de cero emisiones ha permitido la posibilidad de planificar zonas de cero emisiones en el centro de la ciudad, lo cual sin duda tiene un gran impacto en el control de la contaminación local.

Las tecnologías innovadoras para el desarrollo sostenible también están evolucionando en el campo de los vehículos híbridos. Estos vehículos son una nueva categoría que combina las ventajas de los motores de combustión interna tradicionales y los sistemas de propulsión eléctrica. Su funcionamiento se basa en la sinergia entre ambos, con el objetivo de proporcionar energía de manera óptima y eficiente, al tiempo que se reduce el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de carbono. Estos vehículos suelen contar con dos tipos de motores, utilizando energía eléctrica en situaciones de baja velocidad o al arrancar para reducir el consumo de combustible, y confiando en el motor de combustión interna en situaciones de alta velocidad.⁴⁴

Estos vehículos híbridos representan una solución intermedia que combina las ventajas de los vehículos eléctricos y los vehículos de combustión interna,⁴⁵ lo que les permite ser más eficientes en términos de consumo de combustible y emisiones, a la vez que aprovechan la infraestructura y la autonomía de los vehículos de combustión interna. Esta tecnología sigue siendo un área de desarrollo activo en la búsqueda de soluciones más sostenibles y eficientes en el transporte.⁴⁶

⁴³ De Automoción, S. D. T. (2011). El Vehículo Eléctrico. Desafíos tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocio. Libbooks.

⁴⁴ Maila, J. E. G., Proaño, D. D. O., Vergara, H. F. G., & Hidalgo, E. V. V. (2021). El control y la gestión de la inyección electrónica de combustible para los motores de encendido provocado. *Dominio de las Ciencias*, 7(4), 44.

⁴⁵ Westbrook, M. H. (2001). The Electric Car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars (No. 38). Iet.

⁴⁶ Cadena, J. R. A., Erazo, F. A. V., Erazo, C. M. V., & Avila, J. S. O. (2020). INSTALACIÓN DE UN MOTOR ELÉCTRICO PARA PROPULSIÓN DE UN VEHÍCULO Y ACOPLA A SU SISTEMA DE TRANSMISIÓN. *Tech Carlos Cisneros*, (01).

Figura 3 Vehículos híbridos vs vehículos electrónicos puros

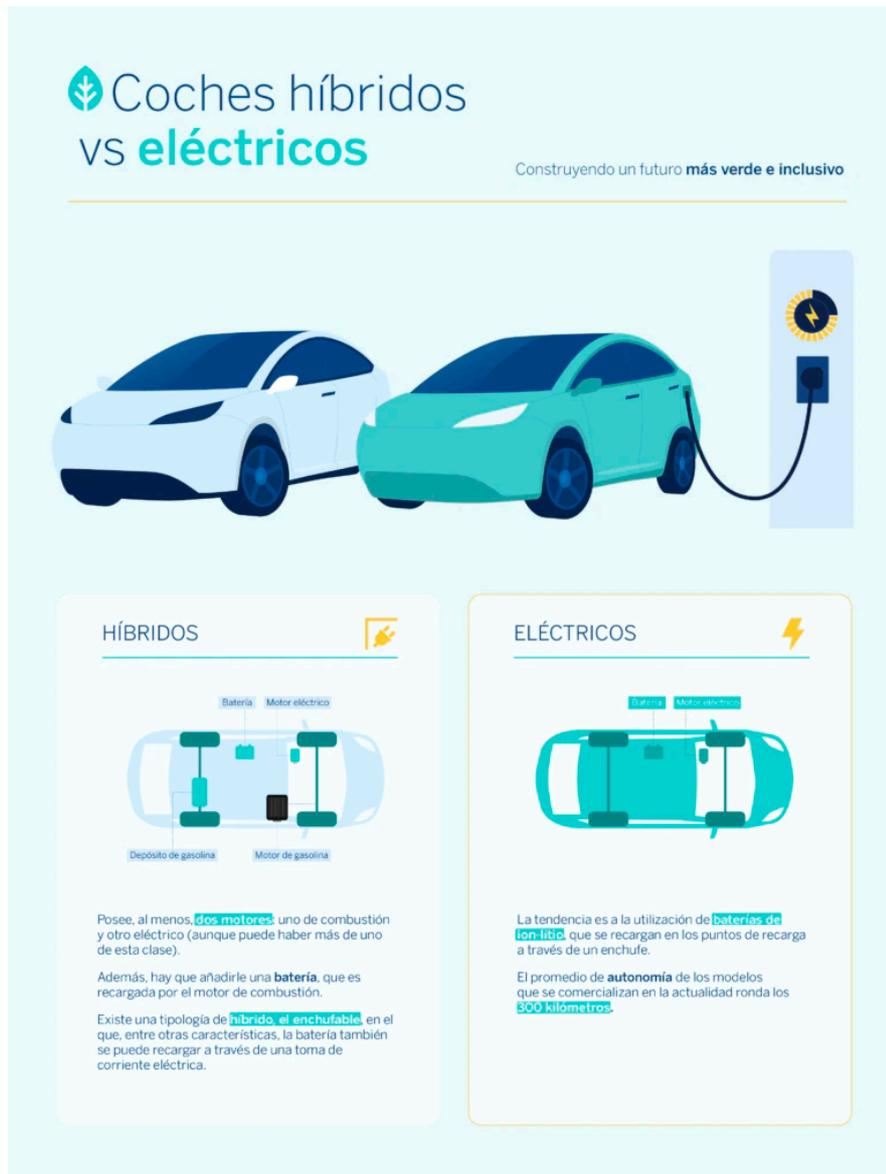


Figura 3 Vehículos híbridos vs vehículos electrónicos puros, fuente:

Al mismo tiempo, hay un campo de aplicación muy evidente en el ámbito energético, donde se está optando cada vez más por el uso de energías renovables en las instalaciones logísticas para reducir la huella de carbono y alcanzar los objetivos de neutralidad de carbono. Por ejemplo, en almacenes, centros logísticos o centros de clasificación, se pueden instalar

paneles solares en los techos o fachadas de estos edificios para convertir la energía solar en electricidad. Esta energía obtenida puede respaldar las actividades dentro de las instalaciones, reemplazando parcialmente el uso de energía de la red eléctrica para iluminación, ventilación, calefacción y otras actividades.

Al mismo tiempo, uno de los usos más destacados de esta tecnología en el campo logístico es la aplicación de estaciones de carga solar⁴⁷. Estas estaciones de carga utilizan energía solar como fuente de alimentación, llevando la fuente de energía limpia de los vehículos eléctricos un paso más allá al convertirla en energía renovable. Esta combinación de tecnologías sin duda valida aún más la superioridad y la vanguardia de las tecnologías de innovación sostenible en el campo logístico. Al reemplazar la red eléctrica tradicional con energía sostenible, se reduce considerablemente la huella de carbono.

No solo en el aspecto de hardware, sino también en el ámbito del software, las tecnologías de innovación sostenible tienen una gran aplicación en la industria logística. Una de las áreas más detalladas se refiere a la optimización de procesos. Por ejemplo, mediante la implementación de tecnologías de factibilidad de utilización de datos en tiempo real, las empresas de logística pueden aprovechar sensores y recopilación de datos en tiempo real para obtener información precisa y actualizada sobre las condiciones del tráfico, estado de las carreteras, pronóstico del clima e incluso la demanda de carga en tiempo real. La aplicación de algoritmos inteligentes puede aprovechar estos datos en tiempo real y analizar grandes volúmenes de datos para proporcionar a las empresas de logística la mejor planificación de rutas y programas de transporte. Con el uso de algoritmos más avanzados, esta tarea se puede realizar sin intervención humana, ya que los algoritmos inteligentes y la tecnología de inteligencia artificial son más eficientes y tienen una tasa de error más baja que los seres humanos en el análisis y desarrollo de datos objetivos.

⁴⁷ 俞铭津, 江莺, 张梦琦, 俞旭, 段峥, & 许越. (2019). 基于物联网的电动车智能充电系统. 测控技术, 38(5), 48-52.

Figura 4 Software inteligente para la planificación de ruta de la ultima milla,

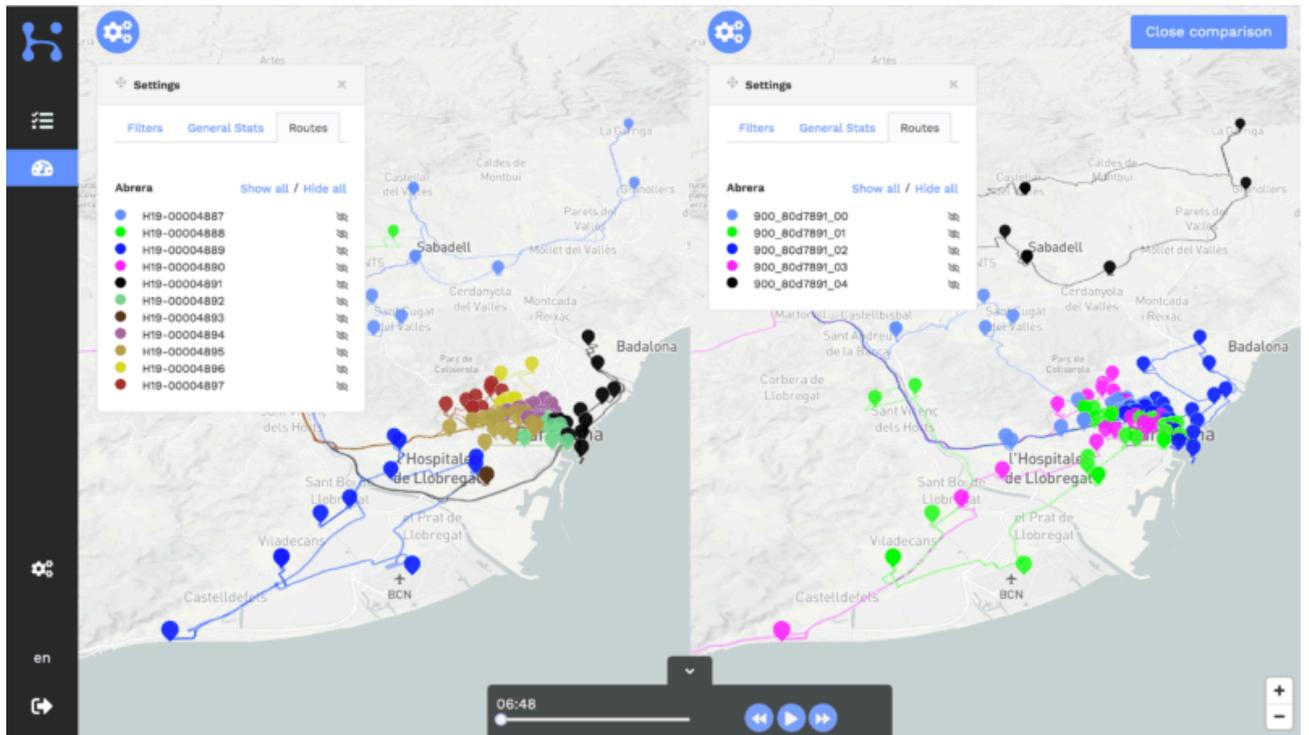


Figura 4 Software inteligente para la planificación de ruta de la ultima milla, fuente:

Por ejemplo, en la planificación de rutas, los algoritmos inteligentes pueden tener en cuenta múltiples factores, desde la congestión del tráfico en tiempo real hasta la eficiencia del combustible de los vehículos y las condiciones del vehículo. Con base en estos factores, se investigan las rutas y los modos de transporte más eficientes para reducir significativamente los kilómetros en vacío y el tiempo innecesario. En este sentido, los algoritmos inteligentes proporcionan una mayor eficiencia y una menor huella de carbono en comparación con los procesos tradicionales.⁴⁸

No solo es significativo en el ámbito de la última milla, sino que las tecnologías de innovación sostenible tienen una gran aplicación en toda la cadena de suministro logístico. Por ejemplo, mediante sensores conectados a Internet de las cosas (IoT), las instalaciones de almacenamiento pueden monitorear y recopilar datos en tiempo real sobre los productos. Estos

⁴⁸ Cabitza, F., Campagner, A., & Balsano, C. (2020). Bridging the “last mile” gap between AI implementation and operation: “data awareness” that matters. *Annals of translational medicine*, 8(7).

sensores pueden proporcionar datos en tiempo real sobre la temperatura, humedad, ubicación de almacenamiento, entre otros, y se integran en sistemas de inteligencia artificial para el análisis y la predicción de datos. Esto permite a las empresas de logística comprender con mayor precisión las tendencias de demanda y los ciclos de rotación de los productos. Al mismo tiempo, esto también es una parte integral de los sistemas de automatización, donde el IoT actúa como el receptor del sistema, permitiendo la viabilidad de tecnologías como sistemas de almacenamiento y recuperación automatizados (AS/RS), vehículos de guiado automático (AGV) y robots en el sistema de almacenamiento. Estas tecnologías de innovación sostenible en el ámbito de la Industria 4.0 pueden mejorar en gran medida la eficiencia y precisión de las operaciones de almacenamiento.

Figura 5 Vehículos de guiado automatico(AFV) de su uso en el almacén inteligente



Figura 5 Vehículos de guiado automatico(AFV) de su uso en el almacén inteligente, fuente:<https://www.softwareoit.es/software-gestion-almacen-guias/vehiculos-agv-guiado-automatico.html>

Bajo la influencia de la tecnología de almacenes automatizados, estas tecnologías de innovación sostenible ayudan a optimizar los niveles de inventario para reducir el exceso de stock y el desperdicio, así como optimizar

el espacio de almacenamiento y reducir los errores humanos. Esto contribuye a la reducción del consumo de energía, el desperdicio de materiales y las emisiones de carbono, al tiempo que se reduce la huella de carbono.

Mientras en un ámbito más amplio, las tecnologías de innovación sostenible también tienen aplicaciones únicas que pueden fomentar la economía colaborativa y la colaboración logística. A través de plataformas y aplicaciones, se puede impulsar el desarrollo de este modelo, lo que permite a diferentes empresas y personas compartir recursos de transporte. En este sentido, se incluye el uso compartido de espacio de carga, vehículos de transporte compartidos, instalaciones de almacenamiento compartidas, entre otros. También existen nuevos modelos como la consolidación de carga, donde las empresas logísticas pueden reducir las emisiones de carbono al combinar las demandas de transporte de múltiples cargas, incluso si provienen de diferentes compañías, para lograr una mayor capacidad de carga y eficiencia de transporte. Esto permite reducir la disponibilidad mínima de vehículos, lo que conlleva una reducción en el consumo de energía e incluso puede ayudar a reducir la congestión del tráfico en las vías urbanas.⁴⁹

Al mismo tiempo, las tecnologías de innovación sostenible también están impulsando el desarrollo del transporte multimodal. Esto significa que se promueve la eficiente coordinación e integración de diversos modos de transporte, como el transporte por carretera, ferrocarril, aéreo, marítimo, entre otros. A través de la optimización de los enlaces entre los diferentes modos de transporte basada en big data e inteligencia artificial, se puede analizar y determinar el modo de transporte óptimo. Esto puede mejorar significativamente la eficiencia y brindar a las empresas de logística una mayor variedad de opciones, lo que resulta en una clara ventaja en términos de aumento de eficiencia, reducción de costos y huella de carbono.⁵⁰

El enfoque en el transporte multimodal permite aprovechar las fortalezas y capacidades de cada modo de transporte, optimizando la ruta y minimizando los tiempos de tránsito. Por ejemplo, el uso del transporte

⁴⁹ Chien, F. (2022). The mediating role of energy efficiency on the relationship between sharing economy benefits and sustainable development goals (Case of China). *Journal of Innovation & Knowledge*, 7(4), 100270.

⁵⁰ Komashinskiy, V., Malygin, I., & Korolev, O. (2020). Introduction into cognitive multimodal transportation systems. *Transportation Research Procedia*, 50, 273-279.

ferroviario o marítimo en tramos largos y luego el transporte por carretera en tramos más cortos puede reducir la congestión del tráfico y disminuir las emisiones de carbono. Además, la combinación de diferentes modos de transporte puede ofrecer flexibilidad y opciones en situaciones donde un solo modo de transporte no es suficiente o eficiente, es decir, el enfoque en el transporte multimodal y la utilización de tecnologías de innovación sostenible permiten una planificación y ejecución más eficientes de la cadena de suministro, al tiempo que reducen los impactos ambientales negativos.

La aplicación y desarrollo de estas diversas tecnologías de innovación sostenible en el campo logístico sin duda están impulsando el rápido desarrollo de la industria logística hacia un futuro más eficiente, sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

3.2. Limitaciones

A pesar de que la tecnología sostenible e innovadora parece ser casi perfecta, como dijo "Vince" Lombardi: "La perfección no es alcanzable, pero si perseguimos la perfección podemos alcanzar la excelencia." ("*Perfection is not attainable, but if we chase perfection we can catch excellence.*") Sin embargo, en este ámbito aún existen amplias oportunidades de mejora y desafíos por enfrentar.

Una de las principales limitaciones de las tecnologías sostenibles es su alta barrera de entrada en términos de costos iniciales. Esto se debe a las características avanzadas de las tecnologías, los materiales sofisticados y las técnicas de control de vanguardia que las componen. Por ejemplo, algunas tecnologías sostenibles, como los paneles solares de última generación o los sistemas de almacenamiento de energía de gran escala, requieren una inversión inicial significativa. Esto se debe a los altos costos de investigación y desarrollo, así como a la necesidad de infraestructura especializada y equipos especializados. Estos costos iniciales pueden dificultar la adopción masiva de tecnologías sostenibles, especialmente en regiones con recursos limitados.⁵¹

Además, las tecnologías sostenibles a menudo enfrentan desafíos en términos de disponibilidad y acceso a la infraestructura necesaria para su funcionamiento eficiente. Por ejemplo, algunas tecnologías, como los vehículos eléctricos, requieren una infraestructura de carga bien desarrollada y ampliamente distribuida para garantizar su uso generalizado. Sin embargo, en muchas áreas, especialmente en países en desarrollo o zonas rurales, la infraestructura de carga de vehículos eléctricos es limitada o inexistente. Esto puede desalentar la adopción de vehículos eléctricos y limitar su viabilidad en ciertos contextos.

⁵¹ 郑培柳. (2023). 国际贸易中的不平等交换问题考察——从经济到生态. *World Economic Research*, 12, 173.

Figura 6 Una estación de carga solar de vehículo electrónico



Figura 6 Una estación de carga solar de vehículo electrónico, fuente: Renting Finders <https://rentingfinders.com/blog/movilidad-sostenible/primera-estacion-carga-solar-coches-electricos/>

Otro desafío importante es la brecha existente entre las regiones económicamente desarrolladas y las económicamente menos desarrolladas en términos de acceso y adopción de tecnologías sostenibles. Las áreas económicamente menos desarrolladas a menudo se enfrentan a desafíos adicionales para acceder y utilizar tecnologías sostenibles. La falta de recursos financieros, la infraestructura inadecuada y las limitaciones educativas pueden dificultar la implementación de tecnologías sostenibles en estas regiones. Como resultado, las comunidades en estas áreas pueden depender en gran medida de tecnologías tradicionales y menos sostenibles, simplemente porque son más accesibles y viables en términos de costos y disponibilidad.

Además de las barreras económicas y de infraestructura, existen consideraciones sociales y culturales que pueden afectar la adopción de tecnologías sostenibles. Por ejemplo, algunas comunidades pueden mostrar resistencia al cambio o pueden tener creencias arraigadas que dificultan la aceptación de nuevas tecnologías. Para superar estos obstáculos, es necesario establecer programas educativos y de divulgación que informen y concienticen a las personas sobre los beneficios de las tecnologías sostenibles. La participación comunitaria y la colaboración son clave para impulsar la adopción y el éxito de las tecnologías sostenibles.

En términos de empleo y educación, la adopción de tecnologías sostenibles implica un cambio en la estructura y el tipo de fuerza laboral existente. Muchas tecnologías tradicionales tienen características más comunes entre diferentes industrias, lo que significa que las habilidades requeridas para operar y mantener esas tecnologías son transferibles. Sin embargo, las tecnologías sostenibles a menudo requieren habilidades más especializadas y un mayor nivel de formación. Esto puede plantear preocupaciones sobre la reestructuración laboral y la necesidad de programas de capacitación y reciclaje para los trabajadores afectados.

Además, para implementar con éxito tecnologías sostenibles, se requiere un nivel adecuado de educación y alfabetización tecnológica en la sociedad. Sin embargo, en muchas regiones con limitaciones de recursos y acceso a la educación, este requisito puede convertirse en una barrera significativa. Para superar este desafío, se deben implementar programas de educación y capacitación que brinden oportunidades para adquirir las habilidades necesarias y fomentar la alfabetización tecnológica.

En cuanto a la logística, además de las limitaciones mencionadas anteriormente, las tecnologías sostenibles requieren materiales y componentes específicos con una cadena de suministro compleja y globalizada. Esto puede aumentar la vulnerabilidad de la cadena de suministro a interrupciones y fluctuaciones de precios debido a la dependencia de recursos y proveedores específicos. La disponibilidad y la estabilidad de los materiales y componentes necesarios para el funcionamiento de las tecnologías sostenibles difieren de las tecnologías tradicionales, que tienden a tener una cadena de suministro más madura y dependen menos de recursos específicos.

En resumen, aunque las tecnologías sostenibles e innovadoras presentan un gran potencial para abordar los desafíos ambientales, aún existen desafíos significativos que deben superarse. Estos desafíos incluyen las altas barreras de entrada, los costos iniciales más altos, la necesidad de participación comunitaria, la reestructuración laboral, la educación y la capacitación, las barreras culturales y sociales, y las complejidades logísticas. A medida que se aborden estas limitaciones y se desarrollen soluciones efectivas, las tecnologías sostenibles podrán desplegar todo su potencial y

generar beneficios ambientales y socioeconómicos significativos en todo el mundo.

3.3. Desafíos

Las tecnologías sostenibles y de innovación están impulsadas por la necesidad de abordar desafíos de desarrollo sostenible como la eficiencia energética, la reducción de emisiones y la protección de recursos. Estas tecnologías requieren innovación constante para mejorar el rendimiento, aumentar la eficiencia y reducir el impacto ambiental. Se invierte en investigación y desarrollo para descubrir nuevos materiales, procesos y soluciones tecnológicas que puedan superar las limitaciones actuales y promover el desarrollo sostenible. En comparación con las tecnologías tradicionales diseñadas sin un enfoque sostenible, la velocidad de innovación puede ser más lenta. Esto se debe a que las tecnologías tradicionales suelen estar más consolidadas en el mercado y es posible que hayan alcanzado niveles de desarrollo maduros en términos de desarrollo y mejoras. Aunque estas tecnologías aún pueden experimentar avances progresivos, es posible que no haya cambios disruptivos o cambios significativos a corto plazo en comparación con las tecnologías sostenibles e impulsadas por la innovación.

La continua innovación de las tecnologías sostenibles también implica su adopción y difusión en diferentes sectores y aplicaciones. Con el desarrollo y mejora de las tecnologías sostenibles, es necesario fomentar su adopción a gran escala en diferentes sectores. Esto implica la colaboración entre el sector público y privado, la implementación de políticas y regulaciones adecuadas, y la implementación de medidas de incentivo para estimular la adopción de estas tecnologías. En España, en situaciones como esta, se implementan subsidios económicos directos para el uso de energías sostenibles. Con la promulgación del Real Decreto 477/2021, se establece un plan de incentivos para el uso directo de energías renovables tanto en el ámbito individual como empresarial. Bajo esta normativa, se establecen diversos programas de apoyo para abarcar diferentes tipos de energías renovables, como la solar fotovoltaica, la eólica, y su aplicación en distintos sectores.⁵² Este es un ejemplo típico de cómo se fomenta la colaboración entre el sector público y privado mediante medidas de incentivo para promover el uso de energías renovables.

⁵² «BOE» núm. 155, de 30 de junio de 2021, páginas 77938 a 77998 (61 págs.)

Figura 7 Red eléctrica inteligente

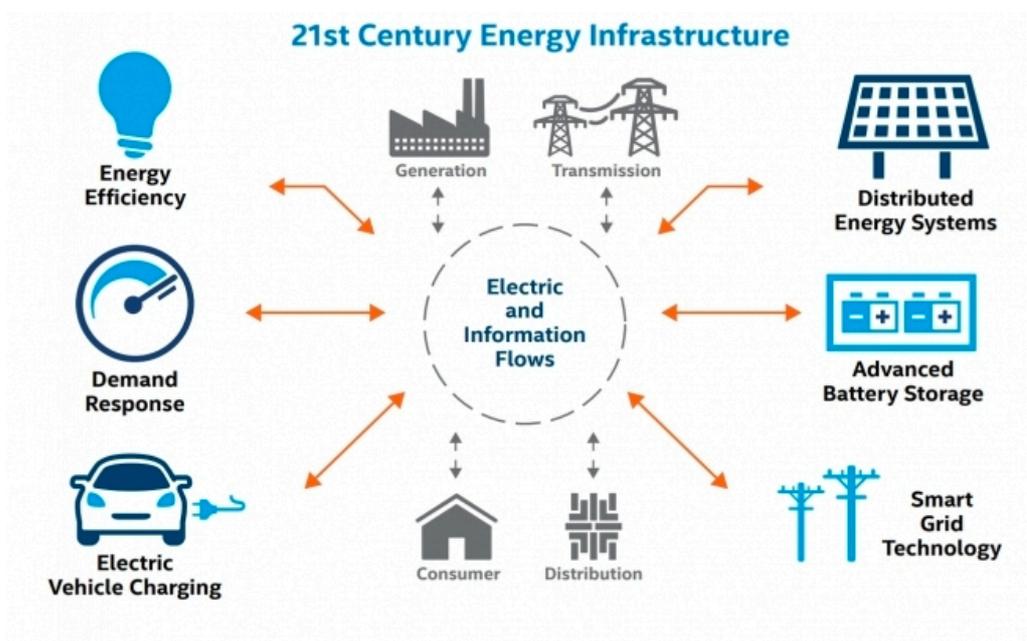


Figura 7 Red eléctrica inteligente, fuente: Helio Esfera <https://www.helioesfera.com/que-son-los-smart-grids/>

Además, es importante difundir información y conocimiento sobre estas tecnologías para asegurar una comprensión y aceptación generalizadas. En contraste, las mejoras en las tecnologías tradicionales suelen tener como objetivo optimizar el rendimiento y la eficiencia existentes. Estas mejoras pueden estar dirigidas a reducir costos, mejorar la durabilidad o aumentar la disponibilidad, pero no necesariamente se centran en abordar de manera integral los desafíos del desarrollo sostenible. Por lo tanto, la adopción de nuevas versiones o actualizaciones puede ser un proceso gradual y menos frecuente en comparación con las tecnologías sostenibles.

Las tecnologías sostenibles e impulsadas por la innovación suelen ser parte de sistemas interconectados más amplios. Por ejemplo, los sistemas de energía renovable pueden incluir generación distribuida, redes inteligentes y almacenamiento de energía. Debido a la integración de diferentes tecnologías, infraestructuras y actores, estos sistemas interconectados pueden ser complejos. En contraste, la complejidad de los sistemas interconectados de las tecnologías tradicionales tiende a ser menor. Esto se debe a que estas tecnologías son más maduras y su integración con los sistemas existentes puede ser más directa y fácil. Por ejemplo, en comparación con los sistemas

de energía renovable, los sistemas de energía basados en combustibles fósiles pueden tener un menor nivel de interconexión.⁵³

La complejidad de los sistemas interconectados requiere una coordinación efectiva y una gobernanza adecuada. Es necesario establecer marcos regulatorios y políticas que fomenten la integración y coordinación entre diferentes tecnologías y sectores. Esto implica abordar los desafíos relacionados con la planificación, operación y mantenimiento de estos sistemas interconectados para garantizar un funcionamiento eficiente y sostenible. En comparación con las tecnologías sostenibles e impulsadas por la innovación, las tecnologías tradicionales pueden requerir menos esfuerzo en términos de coordinación y gobernanza. Esto se debe a que los sistemas tradicionales ya están en su lugar y es posible que los marcos regulatorios y políticas existentes sean aplicables a estas tecnologías. Sin embargo, aún pueden existir desafíos en la coordinación entre diferentes actores y sectores involucrados en el uso y gestión de estas tecnologías.

A pesar de que las tecnologías sostenibles e impulsadas por la innovación pueden tener el potencial de cerrar la brecha digital en términos de acceso y adopción, uno de los desafíos iniciales es garantizar que las comunidades y regiones con recursos limitados sean las primeras en beneficiarse de estas tecnologías. Esto implica superar barreras financieras y logísticas para llevar estas tecnologías a áreas con infraestructura y recursos potencialmente escasos. Las tecnologías tradicionales a veces pueden agravar la brecha digital existente, ya que se centran en soluciones más costosas y complejas. Esto puede obstaculizar el acceso y la adopción de estas tecnologías en comunidades o regiones con recursos limitados. Además, la rápida obsolescencia de estas tecnologías puede ampliar la brecha entre aquellos que pueden utilizar las últimas tecnologías y aquellos que no tienen acceso a ellas.

Otro desafío es lograr una implementación y adopción amplias de las tecnologías sostenibles e impulsadas por la innovación. Esto requiere no solo proporcionar la tecnología, sino también educación y capacitación a las comunidades sobre su uso y beneficios. Además, es necesario abordar

⁵³ Ahmad, T., Madonski, R., Zhang, D., Huang, C., & Mujeeb, A. (2022). Data-driven probabilistic machine learning in sustainable smart energy/smart energy systems: Key developments, challenges, and future research opportunities in the context of smart grid paradigm. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112128.

posibles barreras culturales o de conocimiento que puedan obstaculizar la adopción de estas tecnologías en ciertas comunidades. Mientras tanto, las limitaciones consisten en la necesidad de actualización y capacitación continua en el uso de tecnologías tradicionales. Esto es especialmente desafiante en comunidades con recursos limitados en términos de infraestructura y capacitación. La falta de programas de capacitación y recursos educativos puede ampliar la brecha digital y dificultar la participación plena en la sociedad digital.

Uno de los desafíos que enfrentan las tecnologías sostenibles e impulsadas por la innovación es lograr la adopción y aceptación por parte de los consumidores. Dado que estas tecnologías están diseñadas para ser duraderas y prolongar el ciclo de vida de los productos, pueden encontrar resistencia inicial de consumidores acostumbrados a una cultura de reemplazo frecuente. La educación y la concienciación son necesarias para que los consumidores comprendan los beneficios a largo plazo de estas tecnologías y cambien su percepción sobre durabilidad y sostenibilidad. Por otro lado, la vida útil de las tecnologías tradicionales suele ser limitada y los consumidores las reemplazan con frecuencia. Esto se debe a que las estrategias de marketing fomentan la obsolescencia planificada para impulsar las ventas y generar ingresos. Esta práctica resulta en la compra y disposición continua de productos, generando una gran cantidad de residuos electrónicos y aumentando la demanda de recursos naturales.

Las tecnologías sostenibles e impulsadas por la innovación pueden enfrentar presiones competitivas en el mercado, ya que los productos tradicionales están diseñados para ser desechados y reemplazados con frecuencia. Los fabricantes comprometidos con prácticas sostenibles pueden enfrentar desafíos al competir con productos más baratos pero menos sostenibles. Además, pueden tener dificultades para equilibrar la rentabilidad de la producción y fabricación con altos estándares de sostenibilidad. La planificación de obsolescencia de las tecnologías tradicionales puede tener impactos económicos y ambientales significativos. Los consumidores se ven obligados a gastar más dinero para reemplazar constantemente sus dispositivos, lo que puede ser una carga económica para muchas personas. Además, la fabricación y disposición frecuentes de productos genera emisiones de carbono, consume recursos naturales y aumenta la contaminación ambiental.

Para superar el desafío de la obsolescencia planificada, las tecnologías sostenibles e impulsadas por la innovación requieren una inversión significativa en investigación y desarrollo. Es necesario desarrollar nuevos materiales, procesos y diseños para mejorar la durabilidad y la capacidad de reparación de los productos. Esto implica compromisos a largo plazo y una inversión continua para impulsar la innovación sostenible y encontrar soluciones tecnológicas que sean competitivas en términos de precio y rendimiento en comparación con las tecnologías tradicionales. Las tecnologías tradicionales a menudo presentan dificultades en términos de reparación y reciclaje. Los diseños complejos y la falta de piezas de repuesto dificultan la reparación de productos dañados o defectuosos. Esto resulta en una mayor generación de residuos electrónicos, ya que los dispositivos desechados no pueden repararse fácilmente o reciclarse de manera efectiva.

Figura 8 Residuo electrónico



Figura 8 Residuo electrónico, fuente: Onda regional <https://www.orm.es/programas/vivalradio/viva-la-radio-el-mundo-en-el-que-vivimos-nos-lo-cargamos-el-timo-de-la-obsolencia-progranada/>

4. Los ejemplos presentativos de innovación y sostenible en el sector logístico

4.1 La aplicación de vehículos de energía sostenible y Zona de bajo emisión en el sector logístico.

Como se mencionó anteriormente, con el aumento de la gravedad del problema del cambio climático debido a las emisiones globales de gases de efecto invernadero, las ciudades, como una de las principales fuentes de emisiones y la fuente de emisiones más cercana a nosotros, están cada vez más afectadas por este problema. En este contexto, cómo garantizar que las ciudades mantengan operaciones logísticas eficientes y limpias mientras reducen las emisiones de carbono se ha convertido en una cuestión crucial para la logística urbana, especialmente después de la firma del Acuerdo de París.

De hecho, las expectativas de los objetivos de neutralidad de carbono para 2030, establecidos por el Acuerdo de París, no solo se aplican a los países grandes y a las corporaciones multinacionales, sino que también se extienden a cada individuo y entidad que pueda contribuir a mitigar el cambio climático. Tras Barcelona, Madrid se convirtió en el segundo miembro español de la red C40, y presentó su propia "Estrategia de Sostenibilidad Madrid 360". Este ambicioso plan tiene como objetivo superar en un diez por ciento los desafíos de reducción de emisiones de dióxido de carbono en la ciudad con base en el Acuerdo Verde firmado por la Unión Europea en 2019. Esto significa que, a partir de una base de 13 millones de toneladas métricas de emisiones de carbono, Madrid aspira a reducir estas emisiones a 4.5 millones de toneladas métricas para el año 2030, y a 1.4 millones de toneladas métricas para 2050, alcanzando así la neutralidad de carbono.

Lograr la neutralidad de carbono para una ciudad implica equilibrar las emisiones de carbono generadas por sus actividades con las medidas tomadas para eliminar el carbono, como se plantea en la Estrategia de Sostenibilidad Madrid 360. Sin embargo, como se

mencionó anteriormente, simplemente enfocarse en la reducción de emisiones de carbono no es suficiente para contrarrestar el continuo aumento de las emisiones totales de carbono. Esto requiere que el plan implemente medidas más integrales, como el uso de energías limpias, la planificación urbana y la optimización del transporte.

A continuación, exploraremos los esfuerzos realizados por Madrid en este sentido y su impacto en la industria logística.

Dentro del plan de Madrid, los tres sectores más destacados son el sector residencial, de servicios y de transporte, que representan 2.9 millones de toneladas, 2.7 millones de toneladas y 2.4 millones de toneladas de emisiones de carbono equivalente, respectivamente. En los primeros dos sectores, se han implementado principalmente medidas de energía limpia para reducir las emisiones, lo que implica una serie de incentivos para promover el uso de energías renovables en estos sectores. En el tercer sector, el sector de transporte, que está estrechamente relacionado con la industria logística, se han adoptado medidas más complejas.

Figura 9 estructura de contaminación

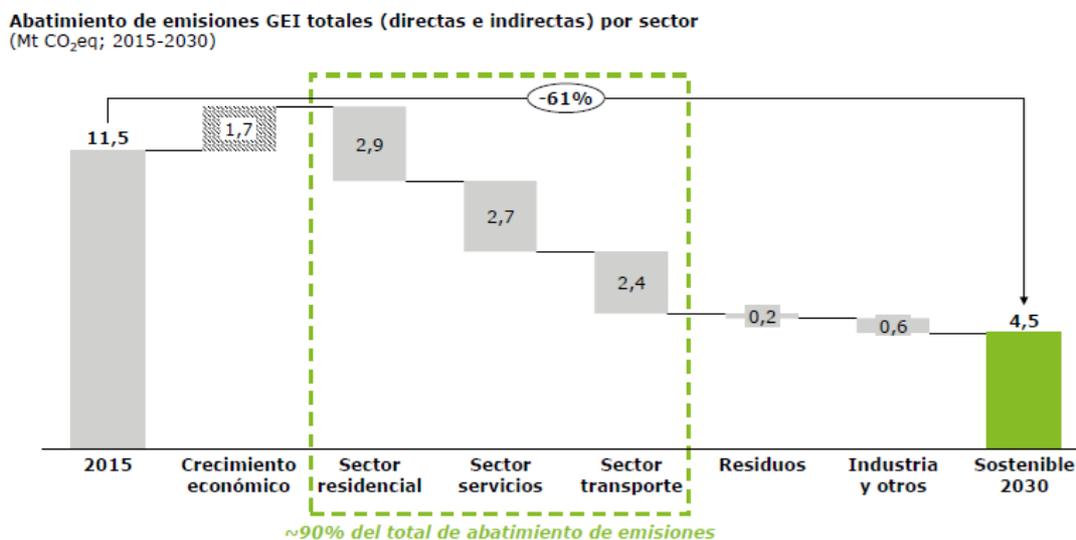


Figura 9 Estructura de contaminación local Madrid, Fuente: ayuntamiento madrileño

En este sector, la estrategia de reducción de emisiones se basa en el esquema Evitar-Cambiar-Mejorar (Avoid-Shift-Improve, ASI).

"Evitar" implica la reducción de la demanda, y en esta parte se incluyen una serie de medidas como la planificación urbana y el teletrabajo para disminuir la necesidad de desplazamientos y, por lo tanto, reducir las emisiones. Se espera que esta parte de la estrategia reduzca aproximadamente 0.6 millones de toneladas métricas de CO₂ equivalente.

En la parte de "Cambiar", se hace hincapié en la promoción del transporte público, es decir, cambiar de los viajes en vehículos privados a modos de transporte compartidos. Se espera que esta parte de la estrategia reduzca aproximadamente 0.3 millones de toneladas métricas de CO₂ equivalente.

Por último, en la parte de "Mejorar", se busca mejorar los medios de transporte existentes, adoptando opciones más respetuosas con el medio ambiente y nuevas tecnologías de bajas emisiones para reducir las emisiones actuales.

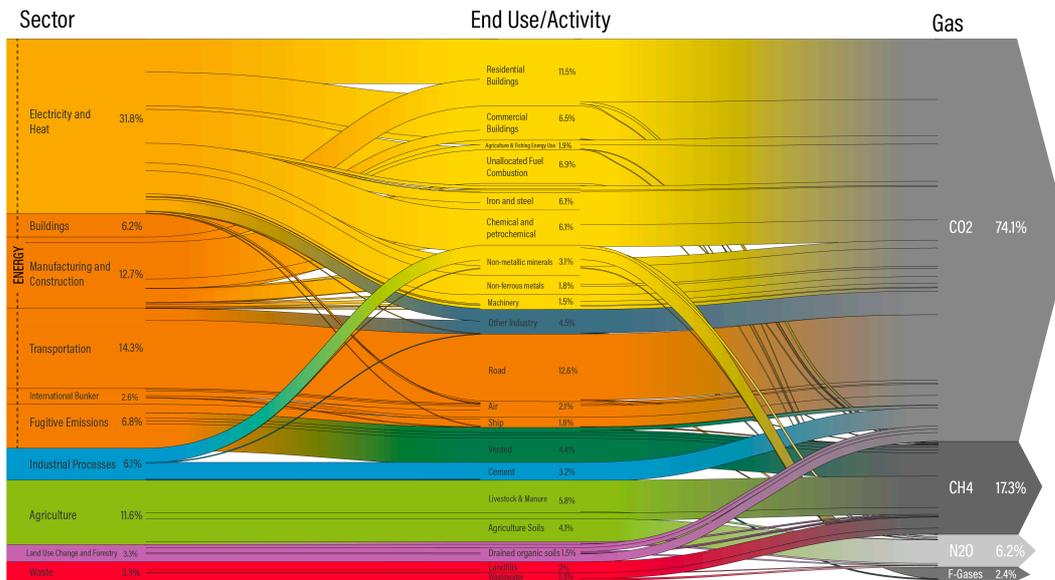
De acuerdo con los 5 ejes de acción de este plan:

1. Establecer modelos de gobernanza y objetivos de sostenibilidad energética.
2. Favorecer el transporte sostenible de pasajeros y mercancías.
3. Fomentar la eficiencia energética y las fuentes energéticas de origen renovable en la edificación.
- 4, Contribuir desde la administración municipal con el ejemplo de modelos energéticos sostenibles.
5. Mejorar la sostenibilidad de la gestión de residuos, la industria y el aeropuerto de Barajas.

Se menciona explícitamente que el fomento del transporte sostenible de pasajeros y mercancías es uno de los elementos clave en este plan.

Figura 10 Composición de emisión en nivel mundial

World Greenhouse Gas Emissions in 2019 (Sector | End Use | Gas)
Total: 49.8 GtCO₂e



Source: Climate Watch, based on raw data from IEA (2021), GHG Emissions from Fuel Combustion, www.iea.org/statistics; modified by WRI.

 WORLD RESOURCES INSTITUTE

Figura 10 Composición de emisión en nivel mundial, Fuente: World Resources Institute

Sobre esta base, al hablar de los métodos más importantes y representativos para reducir la huella de carbono en la industria logística, sin lugar a dudas se mencionará la innovación y mejora de los vehículos de transporte. Esto se debe a que estos vehículos participan directamente en la etapa del proceso logístico que genera la mayor contaminación y emisiones de dióxido de carbono: el transporte. De hecho, más del 14% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero provienen del transporte.⁵⁴ Además, el transporte es una de

⁵⁴ ⁵⁴ Data, C. W. Climate Watch. GHG Emissions. <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions> (accessed July 18, 2022).

las pocas industrias dentro de la Unión Europea que ha experimentado un aumento constante en las emisiones de carbono desde el año 2000.⁵⁵

Dentro de la estrategia "Mejorar" en el sector del transporte, para la industria logística en particular, la promoción del uso de vehículos de transporte sostenibles puede tener un impacto significativo en la reducción de estas emisiones. Por ejemplo, los vehículos de carga eléctricos pueden considerarse en cierto sentido neutros en carbono, mientras que los camiones de propulsión híbrida y los camiones impulsados por celdas de combustible de hidrógeno pueden reducir las emisiones de manera significativa en comparación con los camiones de combustibles fósiles convencionales. Por lo tanto, la descarbonización de los vehículos de transporte es indudablemente uno de los aspectos más importantes para la industria logística en su camino hacia la neutralidad de carbono.

De hecho, al igual que el nombre de esta estrategia, "mejorar" (Improve), el significado de estas nuevas tecnologías no se limita solo a la reducción de la huella de carbono. También tienen ventajas competitivas en términos de mejora de la eficiencia y reducción de costos en comparación con los vehículos de combustión tradicionales. Tomemos como ejemplo los camiones híbridos ampliamente utilizados en la industria logística actual. Debido a que utilizan diversas combinaciones de fuentes de energía, pueden lograr una mayor eficiencia en la utilización de la energía en diferentes entornos.

Además, esta ventaja se amplifica en el escenario más común en la logística urbana: las ciudades. Estos vehículos pueden apagar automáticamente sus motores durante situaciones como detenciones en estacionamientos o esperas en semáforos, evitando el desperdicio ineficiente de energía. Asimismo, debido a que suelen tener un mayor par motor y potencia en comparación con los vehículos convencionales,

⁵⁵ ⁵⁵ Haasz, T., Vilchez, J. J. G., Kunze, R., Deane, P., Fraboulet, D., Fahl, U., & Mulholland, E. (2018). Perspectives on decarbonizing the transport sector in the EU-28. *Energy strategy reviews*, 20, 124-132.

mejoran la eficiencia en el arranque y la aceleración, lo cual es crucial en entornos urbanos con frecuentes cruces peatonales y semáforos.⁵⁶

En términos de reducción de costos, aunque los vehículos de transporte sostenibles pueden tener un costo inicial de adquisición más alto en comparación con los vehículos de combustión convencionales, a largo plazo, sus costos operativos suelen ser más bajos. Esto se debe a que, en comparación con los costos de combustible, tienen un menor consumo de energía, costos de mantenimiento más bajos y menores costos de electricidad. Además, políticas gubernamentales como reducciones de impuestos, subsidios directos o préstamos a tasas bajas también les proporcionan ventajas en términos de costos.

Además, es importante destacar que en este contexto, los costos iniciales de los vehículos sostenibles no son absolutos en comparación con los vehículos de combustión tradicionales, ya que la gama de vehículos sostenibles no se limita solo a los vehículos eléctricos o híbridos. En muchas áreas, incluso se consideran vehículos de transporte de carga de tres ruedas impulsados por fuerza humana en la planificación de la logística urbana. En términos de costo de adquisición, sin duda alguna, estos vehículos son significativamente más económicos que los vehículos de combustión convencionales.⁵⁷

Basándonos en lo expuesto anteriormente, el espacio de aplicación más destacado se encuentra en las zonas de bajas emisiones o emisiones nulas en las ciudades. Aunque cuando hablamos de este concepto estamos abordando la planificación urbana y la protección ambiental, que están dentro del ámbito de la estrategia "evitar" (Avoid). Estas áreas están diseñadas con el propósito de reducir la contaminación del aire y mejorar el entorno local, elevando la calidad de vida de los residentes y promoviendo el desarrollo sostenible. La delimitación de estas zonas restringe la circulación de vehículos,

⁵⁶ ⁵⁶ 许冀阳, & 文昊. (2021). 电动汽车整车性能检测研究进展. 小型内燃机与车辆技术.

⁵⁷ ⁵⁷ 盛毅. (2020). 多种配送模式下电动车与燃油车配送成本量化研究 (Master's thesis, 北京交通大学).

especialmente aquellos de alta emisión, lo que reduce la demanda de tráfico en dichas áreas. El objetivo es asegurar que los vehículos, en especial los de alto nivel de emisiones diésel, reduzcan al máximo la contaminación ambiental local. Esto implica que los vehículos en estas áreas urbanas deben cumplir con estrictas normas de emisiones al ingresar a zonas específicas de la ciudad. Sin duda, esto presenta un desafío significativo para la industria logística, ya que históricamente ha dependido en gran medida de camiones diésel convencionales para el transporte en carretera.

Figura 11 Plano de zona baja emisión Madrid

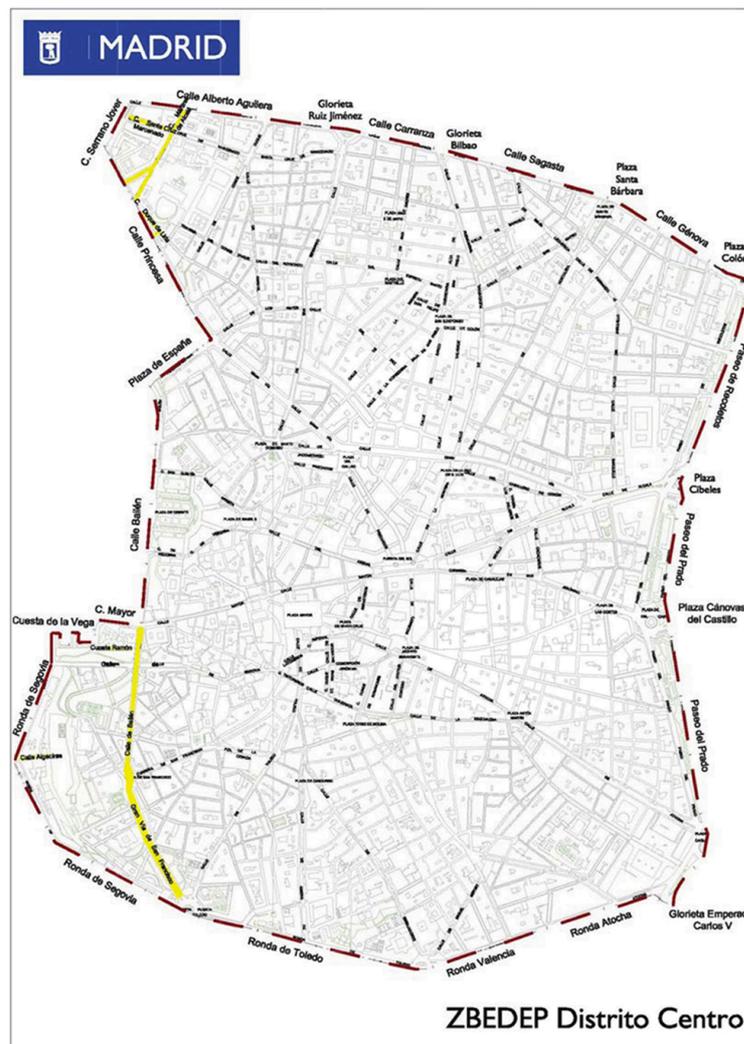


Figura 11 Plano de zona baja emisión Madrid,
fuente:

En este contexto, la capacidad de implementar prácticas de transporte sostenible ya no es simplemente un enfoque verde, sino que se convierte en una necesidad interna para cumplir con objetivos de eficiencia y neutralidad de carbono. Además, estas prácticas se vuelven requerimientos directos y obligatorios para los participantes de la industria logística debido a las leyes y políticas locales.

4.2 Estudio de modelo de sostenibilidad de puerto Róterdam

En el día de hoy en 2023, el cambio climático se ha convertido cada vez más en un gran desafío para el desarrollo económico, y los puertos, que serán discutidos en este capítulo, no son una excepción. En el momento de creación de la Organización de Puertos Europeos en 1993, la calidad del agua afectada por el desarrollo portuario se consideraba el tema ambiental más prioritario y requería atención y manejo inmediatos. Sin embargo, esto sin duda representaba una perspectiva limitada al solo considerar los factores directamente afectados.

Posteriormente, en el informe anual de 2004, se volvió a resaltar la prioridad ambiental, donde la generación de desechos y residuos portuarios, así como las operaciones de dragado y su disposición, fueron nuevamente reconocidos como los asuntos de mayor importancia. En los años 2013 y 2017, estos asuntos prioritarios fueron replanteados nuevamente en los informes anuales. Finalmente, en el año 2020, el cambio climático y la eficiencia energética fueron reconocidos por primera vez como los temas ambientales de mayor relevancia en la última versión de las prioridades medioambientales de la industria portuaria. Sin lugar a dudas, esto se debió al rápido aumento en los últimos años en la cantidad de puertos enfrentando desafíos operativos debido al cambio climático. Por lo tanto, la necesidad de monitorear las tendencias de estos cambios climáticos para fortalecer la adaptación de la infraestructura portuaria existente a la variabilidad climática se hace evidente aquí.⁵⁸

Tabla 1 Prioridad ambiental

	1996	2004	2009	2013	2020
1	Port development (water)	Garbage/post wast	Noise	Air quality	Air quality
2	Water quality	Dredging operations	Air quality	Garbage / port wast	Climate change
3	Dredging disposal	Dredging disposal	Garbage / port wast	Energy consumption	Energy efficiency
4	Dredging operations	Dust	Dredging operations	Noise	Noise
5	Dust	Noise	Dredging disposal	Ship waste	Relationship with the local community
6	Port development (land related)	Air quality	Relationship with the local community	Relationship with the local community	Ship waste
7	Contaminated land	Hazardous cargo	Energy consumption	Dredging operations	Water quality
8	Habitat loss / degradation	Bunkering	Dust	Dust	Garbage / port wast
9	Traffic volume	Port development (land related)	Port development (water)	Port development (land related)	Dredging operations

⁵⁸ Puig Duran, M., Wooldridge, C., & Darbra Roman, R. M. (2021). ESPO Environmental report 2021. EcoportsinSights2021.

10	Industrial effluent	Ship discharge (bilge)	Port development (land related)	Water quality	Port development (land related)
----	---------------------	------------------------	---------------------------------	---------------	---------------------------------

Tabla 1 Evaluación de tops prioridades de tema ambiental, fuente: ESPO

Como es ampliamente conocido, los puertos son piezas clave en la industria logística y representan eslabones cruciales en las cadenas de suministro internacionales. Desempeñan un papel indispensable en el funcionamiento normal del comercio internacional y la cadena de suministro, ya que el comercio internacional depende principalmente del transporte marítimo, y los puertos son los puntos clave de conexión para el transporte marítimo: los bienes entran y salen del mercado internacional a través de ellos, y diversas mercancías de diferentes regiones se concentran, distribuyen y vuelven a cargar aquí.

Dado que también sirven como puntos de interconexión para múltiples modos de transporte, en los puertos, el transporte marítimo se conecta con las redes de transporte terrestre, ferroviario y aéreo, facilitando una transición fluida entre diferentes modos de transporte y permitiendo el transporte multimodal. Con su posición crítica en la industria logística, la eficiencia operativa y el nivel de gestión de los puertos también influyen directamente en la confiabilidad de las cadenas de suministro.

En este capítulo, el enfoque en la sostenibilidad de los puertos es crucial, y en 2023, donde la calidad del aire, los desafíos climáticos y la eficiencia energética son indicadores fundamentales para los puertos, el análisis detallado del modelo de desarrollo sostenible del puerto de Róterdam es de gran importancia. Basándose en la investigación de Zhou Bingzhong y Xin Taikang,⁵⁹ que compara la capacidad de desarrollo sostenible de puertos importantes mediante la cuantificación de indicadores como capacidad de producción portuaria, capacidad de desarrollo económico, capacidad de recursos y medio ambiente, capacidad de apoyo intelectual y coordinación social, se llega a la conclusión mediante las fórmulas

$$\delta = \frac{x_{ij} - m_{ij}}{M_{ij} - m_{ij}} = \begin{cases} 1 & x_{ij} \geq M_{ij} \\ \frac{x_{ij} - m_{ij}}{M_{ij} - m_{ij}} & m_{ij} < x_{ij} < M_{ij} (1) \\ 0 & x_{ij} \leq m_{ij} \end{cases}$$

$$\delta = \frac{M_{ij} - x_{ij}}{M_{ij} - m_{ij}} = \begin{cases} 1 & x_{ij} \leq M_{ij} \\ \frac{M_{ij} - x_{ij}}{M_{ij} - m_{ij}} & m_{ij} < x_{ij} < M_{ij} (2) \\ 0 & x_{ij} \geq m_{ij} \end{cases}$$

⁵⁹ 周炳中, & 辛太康. (2008). 中外主要港口城市可持续发展能力的比较研究. 资源科学, 30(2), 177-184.

El objetivo general de la fórmula es calcular un valor llamado δ , que representa el grado de diferencia normalizada de un indicador. Este valor oscila entre 0 y 1. El valor de δ refleja la posición relativa del valor del indicador x_{ij} , entre el valor mínimo m_{ij} , y el valor máximo M_{ij} .

x_{ij} representa el valor real del atributo del indicador, m_{ij} es el valor mínimo de ese indicador en diferentes regiones, y M_{ij} es el valor máximo de ese indicador en diferentes regiones.

La fórmula se define como una función escalonada con tres casos para calcular el valor de δ :

Cuando $x_{ij} \geq M_{ij}$, se establece δ en 1. Esto indica que el valor del indicador es mayor o igual al valor máximo, es decir, se encuentra en el límite superior del rango.

Cuando $m_{ij} < x_{ij} < M_{ij}$, se utiliza interpolación lineal escalonada para calcular el valor de δ , Esto se hace para mapear la posición relativa del valor del indicador entre el valor mínimo y máximo en un rango de 0 a 1.

Cuando $x_{ij} \leq m_{ij}$, se establece δ en 0. Esto indica que el valor del indicador es menor o igual al valor mínimo, es decir, se encuentra en el límite inferior del rango.

esta fórmula se utiliza para calcular la posición relativa de un indicador, permitiendo su comparación entre diferentes regiones e indicadores. Transforma el valor real del indicador en un valor de posición relativa normalizado, lo cual facilita la evaluación del rendimiento relativo de un indicador en un conjunto de datos. Dentro del rango dado, cuanto más cerca esté el valor del indicador del valor máximo, más cerca será el valor de δ a 1; y cuanto más cerca esté del valor mínimo, más cerca será el valor de δ a 0. Los casos intermedios se interpolan linealmente entre 0 y 1.

El propósito de la fórmula es calcular la pertenencia del indicador δ que permite evaluar y comparar la posición relativa de los valores de los indicadores en diferentes regiones y períodos, proporcionando una medida

normalizada que facilita la comparación y el análisis. utilizando datos de diversas fuentes estadísticas autorizadas en su estudio. Estos datos se obtienen de múltiples fuentes, incluyendo: El "Anuario Estadístico de Ciudades Chinas" (2000-2006). Los "Informes Ambientales de China" (2000-2006). El "Anuario de Transporte de China" (2006). Los "Anuarios Estadísticos" de siete ciudades chinas: Dalian, Tianjin, Qingdao, Shanghai, Ningbo, Shenzhen y Guangzhou (2000-2006). Datos del "Buró Central de Estadísticas de los Países Bajos". Datos del sitio web estadístico del gobierno de Singapur. Datos del "Departamento de Estadísticas de Hong Kong". y Documentación de planificación portuaria.

Basándose en estos datos e indicadores, después de realizar una comparación horizontal de los principales puertos internacionales, se llega a la conclusión de que el Puerto de Róterdam posee una ventaja relativa en términos de desarrollo sostenible.

Tabla 2 Los valores obtenidos de estudio de Zhou y Xin

	Shanghai	Hong Kong	Rotterdam	Singapore
Capacidad de producción portuaria	0.645	0.394	0.682	0.650
Capacidad de desarrollo económico	0.410	0.624	0.536	0.499
Capacidad de recurso y medio ambiente	0.552	0.611	0.732	0.664
Capacidad de apoyo intelectual	0.421	0.669	0.809	0.791
Capacidad de coordinación social	0.219	0.336	0.798	0.550
Comparación integral	0.465	0.539	0.705	0.638
Rank	4	3	1	2

Los valores de las funciones de pertenencia difusa de los indicadores de capacidad de desarrollo sostenible de las principales ciudades portuarias. Fuente: estudio de Zhou y Xin

Donde el peso del indicador de capacidad de producción portuaria es 0.23, el peso del indicador de capacidad de desarrollo económico es 0.22, el peso del indicador de capacidad de recursos y medio ambiente es 0.18, el peso del indicador de capacidad de apoyo intelectual es 0.23 y el peso del indicador de coordinación social es 0.14.

Dentro de estos indicadores, los más destacados son la capacidad de recursos y ambiente con un peso del 18%, y la capacidad de apoyo intelectual con un peso del 23%. Esto incluye indicadores como la superficie de tierra per cápita, la tasa de cobertura forestal, la tasa de calidad del agua potable en fuentes, la tasa de calidad del aire ambiental, la tasa de utilización integral de residuos sólidos industriales, la proporción de inversión en protección ambiental con respecto al PIB, el consumo de electricidad por cada 10,000

yuanes de producción industrial, la proporción de gastos en educación y ciencia en comparación con los ingresos fiscales locales, el valor de la industria de alta tecnología, el porcentaje de población con educación superior, el porcentaje de producción industrial de alta tecnología, el gasto per cápita en educación (en dólares), el índice de eficiencia gubernamental, entre otros indicadores. A continuación, se continuará investigando por qué el Puerto de Róterdam presenta una ventaja significativa en estas áreas en comparación con otros grandes puertos mundiales.

Tabla 3 indicadores de estudio de Zhou y Xin y sus pesos

Indicadores	Subindicadores	Pesos
Capacidad de Producción Portuaria (23%)	Longitud de la línea de costa de la zona portuaria	0.13
	Área de la zona portuaria	0.12
	Profundidad de aguas fronterizas	0.14
	Volumen de carga manejada	0.11
	Volumen de contenedores manejados	0.10
	Número de rutas internacionales del puerto	0.09
	Maquinaria de carga y descarga productiva en la zona portuaria	0.08
	Número de muelle	0.12
	Densidad de rutas marítimas de larga distancia	0.11
Capacidad de Desarrollo Económico (22%)	Producto Interno Bruto per cápita (en dólares)	0.23
	Tasa de Crecimiento del PIB	0.18
	Participación del Tercer Sector en el PIB	0.20
	Valor Total de la Producción Industrial (en dólares)	0.16
	Utilización Real de Inversión Extranjera (en dólares)	0.11
	Número de Empresas de la Lista Fortune Global 500	0.12
Capacidad de Recursos y Medio Ambiente (18%)	Superficie de Tierra Per Cápita	0.24
	Tasa de Cobertura Forestal	0.13
	Tasa de Calidad del Agua Potable en Fuentes	0.14
	Tasa de Calidad del Aire Ambiental	0.11
	Tasa de Utilización Integral de Residuos Sólidos Industriales	0.13
	Proporción de Inversión en Gestión Ambiental con respecto al PIB	0.14
	Consumo de Electricidad por cada 10,000 yuanes de Producción Industrial	0.11
Capacidad de Apoyo Intelectual (23%)	Proporción de Gastos en Educación y Ciencia en Comparación con los Ingresos Fiscales Locales	0.21
	Valor de la Producción de Industrias de Alta Tecnologías	0.18
	Porcentaje de Población con Educación Superior	0.17
	Porcentaje de Producción Industrial de Alta Tecnología	0.11
	Gasto Per Cápita en Educación (en dólares)	0.19
	Índice de Eficiencia Gubernamental	0.14
Coordinación Social (14%)	Índice de Seguridad Social	0.21
	Tasa de Crecimiento Natural de la Población	0.13
	Coefficiente de Engel	0.18
	Superficie de Vivienda Per Cápita en Áreas Urbanas	0.16
	Número de Camas de Hospital por Mil Personas	0.14
	Tasa de Desempleo Urbano	0.18

Tabla 3 Indicadores y subindicadores del estudio de 周炳中, & 辛太康. (2008). 中外主要港口城市可持续发展能力的比较研究. 资源科学, 30(2), 177-184.

El puerto de Róterdam se encuentra en los Países Bajos, en la desembocadura de los ríos Rin y Mosa, conectando el Mar del Norte con los ríos interiores europeos Rin y Danubio. Es el puerto de transporte más importante de Europa para petróleo, productos químicos, contenedores, mineral de hierro, alimentos y metales, y es conocido como la "Puerta de

Europa". El puerto de Róterdam se ha desarrollado a lo largo de siete períodos históricos distintos, con áreas portuarias de diversas funciones. Su superficie abarca más de 105 kilómetros cuadrados a lo largo del canal artificial Nieuwe Waterweg, con una longitud total de más de 40 kilómetros. Desde el año 1595, cuando la primera flota holandesa regresó de las Indias Orientales llevando mercancías del mundo oriental a Ámsterdam a lo largo de la ruta portuguesa, pasaron solo unos pocos años antes de que unas 50 flotas holandesas fueran enviadas en sucesión, superando instantáneamente en número a las flotas de Portugal y España juntas en ese momento. Este éxito compensó la pérdida de productos importantes, como la sal y las especias del Lejano Oriente, que antes se importaban de la península ibérica debido a la Guerra de los Ochenta Años.⁶⁰



Figura 12 Rotterdam Old Harbor(Oude Haven),

Figura 12 Rotterdam Old Harbor(Oude Haven), primer puerto de Rotterdam, con fecha de apertura 1350, fuente:<https://www.viator.com/Rotterdam-attractions/Old-Harbor-Oude-Haven/overview/d4211-a18493>, VIATOR

En esta época, gracias a la creación de la Compañía Neerlandesa de las Indias Orientales (VOC por sus siglas en inglés), Róterdam se convirtió en un importante centro de comercio. En 1872, se excavó con éxito el canal Nieuwe Waterweg, conectando el Mar del Norte con el sistema del río Rin, lo que sentó las bases para el transporte multimodal en el futuro. Datos

⁶⁰ Heijman, W., Gardebroek, C., & van Os, W. (2017). The impact of world trade on the Port of Rotterdam and the wider region of Rotterdam-Rijnmond. *Case studies on transport policy*, 5(2), 351-354.

revelados anteriormente indican que el transporte de mercancías a granel representaba el 85% del total de mercancías transportadas en el puerto de Róterdam, y el petróleo crudo y sus derivados representaban el 70% de esa cifra. Muchas de estas mercancías no tenían como destino final los Países Bajos, sino que se redirigían a carreteras, ferrocarriles, vías fluviales y transporte aéreo en otros lugares, contribuyendo en gran medida al hecho de que alrededor del 30% del transporte internacional por carretera en la Unión Europea sea manejado por los Países Bajos, en gran parte gracias al puerto de Róterdam. A pesar del auge de la flota británica posterior y los devastadores bombardeos durante la Segunda Guerra Mundial, en la década de 1960, Róterdam superó a Nueva York como el puerto más grande del mundo. En 1967, poco después de la concepción del concepto de envío de contenedores, estableció su propio puerto de contenedores y, a finales de la década de 1980, se convirtió en el puerto de contenedores más grande del mundo.

Figura 13 Mapa de Róterdam

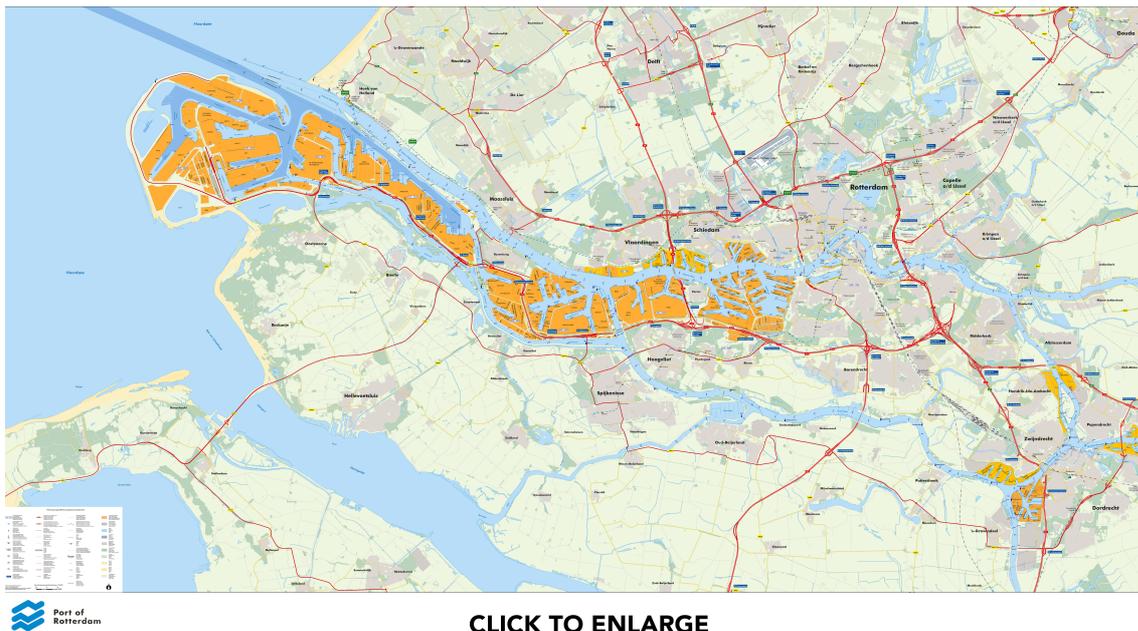


Figura 13 Mapa de puerto de Rotterdam, fuente:

Con la apertura del canal Rin-Danubio en 1985 por parte de Alemania, que conecta el río Rin y se extiende hasta el Danubio en Rumanía, la red fluvial interna del puerto de Róterdam se expandió a través de todo el continente europeo. Incluso después del rápido desarrollo de una serie de puertos en Asia después del año 2000, el puerto de Róterdam ha mantenido su posición como el puerto más grande e importante del continente europeo.

En la actualidad, el puerto de Róterdam tiene un volumen anual de carga de más de 400 millones de toneladas. Cada año, alrededor de 34,000 buques oceánicos y 133,000 barcasas fluviales atracan, conectando con más de 500 rutas de buques que enlazan con más de 1,000 puertos en todo el mundo. En el informe anual de 2021 del puerto de Róterdam, se registró un volumen de carga total de 468.7 millones de toneladas, lo que representó un aumento del 7.3% con respecto a 2020, a pesar del impacto de la pandemia de COVID-19. Esto casi igualó el nivel de 2019. El volumen de contenedores manipulados fue de 13.5 millones de TEU (unidades estándar de medida de contenedores), un incremento del 6.6% en comparación con 2020.⁶¹

Es importante destacar que el volumen de contenedores en sí mismo marcó un nuevo récord en la historia del puerto de Róterdam. Una de las principales razones de esta situación fue el aumento en la proporción de gastos en bienes de consumo y servicios en comparación con el gasto en actividades de entretenimiento debido a la pandemia. Al mismo tiempo, el cierre repetido de fábricas y terminales de contenedores, especialmente en China, para reducir la propagación del virus, afectó la logística internacional de contenedores. Esto resultó en retrasos frecuentes en la llegada de barcos que ya tenían más mercancías para transportar. A su vez, los contenedores tendían a quedarse más tiempo en los muelles, lo que llenaba las instalaciones de contenedores. Esto no contribuyó a mejorar la eficiencia de los puertos a nivel mundial.

Las compañías navieras tomaron la decisión de llamar a menos puertos y cargar y descargar más contenedores en cada uno para ahorrar tiempo. En Róterdam, esto llevó a una disminución del 10% en la cantidad de visitas de grandes buques portacontenedores. Sin embargo, la cantidad promedio de contenedores descargados en cada visita aumentó en un 20%, lo que aumentó la presión en el puerto. Además, el sector logístico, al igual que otras industrias, se vio afectado por el absentismo laboral debido a infecciones y medidas de cuarentena.

En este contexto, el hecho de que el volumen de contenedores manipulados en Róterdam haya alcanzado un récord histórico es un logro notable. Esto también significa que el puerto de Róterdam ha fortalecido su

⁶¹ *Port of Rotterdam Operated at Pre-Corona Level in 2021*. (2022, February 24). Port of Rotterdam. <https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/port-of-rotterdam-operated-at-pre-corona-level-in-2021>

cuota de mercado en comparación con otros puertos principales de contenedores en el noroeste de Europa.

Figura 14 Puerto de contenedores Europahaven, Rotterdam



Figura 14 Puerto de contenedores Europahaven, Rotterdam,
fuente:<https://www.ship-technology.com/news/hutchison-ports-container-terminal-rotterdam/>

Sin embargo, la vanguardia del puerto de Róterdam no radica en su volumen de carga, sino en cómo maneja esta gran cantidad de carga. Ya en 2011, el puerto de Róterdam presentó su visión estratégica de desarrollo portuario para 2030, estableciendo el objetivo de crear un puerto inteligente, sostenible, seguro y eficiente para esa fecha. Se llevaron a cabo análisis de factores clave en diez áreas, incluyendo el sistema de transporte y distribución portuaria, servicios logísticos, ambiente de inversión, recursos espaciales, entorno ecológico, integración entre el puerto y la ciudad, entorno cultural, capacidad de innovación, entorno político y economía regional, con el fin de mejorar de manera integral la eficiencia de la cadena logística portuaria, facilitar el comercio internacional y lograr un desarrollo portuario sostenible.

Para entonces, se espera que el volumen total de carga del puerto de Róterdam alcance los 750 millones de toneladas, y el volumen de contenedores superará los 20 millones de TEU. En consecuencia, el puerto de Róterdam se convertirá en un puerto de primer nivel a nivel mundial, más limpio, silencioso, seguro, eficiente e inteligente.

En la actualidad, el puerto de Róterdam consta de siete zonas portuarias. La más exterior es la zona portuaria de Maasvlakte, que sobresale de la línea costera. Justo después se encuentra la zona portuaria de Europoort, seguida por la zona portuaria de Botlek y otras cuatro zonas portuarias. El muelle Euromax, ubicado en la zona portuaria de Maasvlakte Fase 1, comenzó a operar en 2010 y se convirtió en el muelle de contenedores automatizado más grande del mundo en ese momento.

De hecho, la historia del transporte de contenedores tiene apenas 60 años, pero en la actualidad, al menos el 75% del transporte marítimo se realiza a través de contenedores. Uno de los principales enfoques de la estrategia de "puerto inteligente" de Róterdam es mejorar significativamente la eficiencia operativa y el nivel de automatización del puerto. En 1993, el puerto de Róterdam construyó el primer muelle de contenedores completamente automatizado del mundo para abordar los desafíos de los crecientes costos laborales, la limitación de recursos espaciales y el aumento de los costos operativos.⁶²

En los últimos años, el puerto de Róterdam ha estado llevando a cabo una renovación y modernización continua de su infraestructura portuaria. A través de tecnologías como el big data, el Internet de las cosas, el control inteligente y la computación avanzada, se ha fortalecido la automatización y el control integral de todo el proceso, desde las operaciones en el frente del muelle hasta las operaciones en las áreas de almacenamiento y los puntos de acceso.⁶³

Aquí es importante destacar el proyecto Maasvlakte 2 en el puerto de Róterdam, que es una gran obra de recuperación de tierras marítimas. Está

⁶² Samadi, S., Lechtenböhmer, S., Schneider, C., Arnold, K., Fishedick, M., Schüwer, D., & Pastowski, A. (2016). *Decarbonization pathways for the industrial cluster of the port of Rotterdam*. Wuppertal, Germany: Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy.

⁶³ Ottjes, J. A., Hengst, S., & Tutuarima, W. H. (1994, June). A simulation model of a sailing container terminal service in the port of Rotterdam. In *Proceedings of the 1994 Conference on Modelling and Simulation* (pp. 876-880).

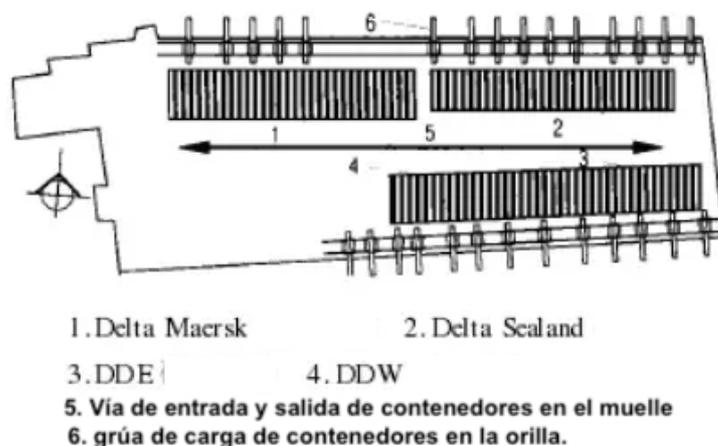
ubicado en la desembocadura noroeste del puerto de Róterdam y forma parte de su plan de expansión portuaria. Fue establecido a principios del siglo XXI para satisfacer la creciente demanda de comercio de mercancías. La construcción de este proyecto comenzó en 2008 y se completó en 2013. Se crearon alrededor de 2,000 hectáreas de tierra mediante la recuperación de tierras del mar, sobre las cuales se estableció una plataforma moderna para carga y logística con una variedad de muelles, almacenes, patios y facilidades auxiliares. El objetivo de este proyecto no solo era abordar el creciente volumen de mercancías, sino también establecer una plataforma logística moderna y sostenible para reducir los costos de transporte, mejorar la eficiencia y garantizar la sostenibilidad ambiental.

Este proyecto es una parte fundamental de la transformación del puerto de Róterdam en un puerto inteligente para el nuevo siglo, ya que ofrece instalaciones portuarias y de carga avanzadas que permiten que grandes buques atraquen y carguen y descarguen mercancías de manera eficiente. De hecho, poco más de un año después de que Schultz-van Haegen anunciara oficialmente la inauguración de este nuevo puerto en mayo de 2013, los operadores de muelles APMT y RWG ya habían completado la primera fase de construcción de muelles completamente automatizados que pueden cargar y descargar los buques portacontenedores más grandes del mundo de manera continua durante todo el año. Pero eso no es todo, esta plataforma cuenta con dos de los muelles automatizados para contenedores más avanzados del mundo, la mayor infraestructura de pilotes para montaje de turbinas eólicas marinas y el mayor buque de carga a granel del mundo. Sin embargo, lo más destacable es la instalación portuaria completamente automatizada y de emisión cero de carbono. Este muelle funciona completamente con energía eléctrica, depende de la energía eólica para su generación y cuenta con instalaciones de compensación de carbono.

De hecho, el puerto de Róterdam es como esta ciudad en sí: posee una historia larga pero también las construcciones modernas más audaces, vanguardistas e innovadoras. El puerto histórico de Róterdam, con una historia rica, es uno de los puertos más avanzados en la actualidad. Las distintas áreas portuarias establecidas en diferentes épocas tenían o han tenido las tecnologías portuarias más avanzadas de su tiempo. Tomemos como ejemplo los Vehículos Guiados Automáticamente (Automated Guided Vehicle, AGV) más renombrados de este puerto. Ya en 1993, la primera generación de tecnología AGV apareció en ECT Delta Sealand, con el objetivo de automatizar

el movimiento de carga. Los AGV se utilizaban para el transporte horizontal de contenedores, funcionando a lo largo de una ruta circular fija. Cada área de almacenamiento en este lugar tenía un AGV de alta velocidad en su lugar, y cada área tenía seis filas de contenedores, apiladas en cuatro niveles. Los puntos de carga y descarga de AGV estaban enmarcados en las puertas de grúa en el extremo de la terminal, con los AGV evitando entrar al área de almacenamiento. Los AGV se desplazaban a una velocidad de 3 m/s y eran impulsados por motores de combustión interna hidráulicos. Desde la entrada de un barco al puerto, un AGV podía atracar en un punto en la terminal en menos de una hora. Esto significaba que en ese momento, ya se había logrado la automatización del transporte de contenedores en este muelle. Sin embargo, debido a las limitaciones tecnológicas de la época, los AGV solo podían moverse a lo largo de rutas fijas. Si un AGV quedaba fuera de servicio, toda la operación de carga y descarga en la pila de contenedores que servía se detenía. Además, debido a las rutas largas, el frente de la pila ocupaba mucho espacio, lo que demostraba una flexibilidad limitada.

Figura 15 La plataforma de Muelle Delta



La tercera generación de muelles automatizados para contenedores, llamado Euromax, comenzó sus operaciones en 2008 y continuó la mejora sobre las dos generaciones anteriores. Su equipo de atraque estaba compuesto por grúas pórtico gemelas para contenedores. Los Vehículos Guiados Automáticamente (AGV) en este caso operaban a una velocidad de 6 m/s. Estos AGV se desplazaban sobre una extensión posterior de las grúas pórtico en la terminal. En el área de almacenamiento, se empleaban grúas pórtico automáticas de riel tipo portal (ARMG) que eran totalmente automatizadas. Estas grúas podían apilar de 5 a 6 contenedores y abarcar 10

contenedores en ancho. Cada zona de almacenamiento tenía un canal de AGV dedicado.

Este muelle cuenta con 58 grúas de riel automatizadas que operan las 24 horas del día, los 7 días de la semana, mediante control remoto desde una ubicación distante. Aunque todavía se requiere cierta cantidad de operaciones semiautomáticas utilizando "grúas de costa semiautomáticas" al descargar contenedores de los buques, este muelle se ha convertido en una especie de "muelle sin tripulación". Conectados a él están los Vehículos de Guiado Automático (AGV), que han evolucionado hasta su tercera generación. En comparación con sus predecesores, estos AGV tienen una propulsión híbrida eléctrica y diésel, lo que reduce el consumo de combustible en más del 50% y disminuye el ruido.

Figura 16 AGV en uso de puerto de Róterdam



Figura 16 AGV en uso de Róterdam Fuente:
Bits and chips

Sin embargo, el cambio en la propulsión no es la principal diferencia en estos vehículos de manejo de contenedores. Los AGV utilizados en este muelle están diseñados sobre la base de vehículos de carretera convencionales, lo que permite la implementación de la solución de formación de caravanas (platooning). Esta es una forma especial de conducción en formación, donde el primer vehículo actúa como líder, determinando la ruta y la velocidad de avance. Los demás vehículos mantienen una distancia fija entre sí utilizando tecnologías como cámaras, radares y GPS. Si el vehículo líder disminuye la velocidad o cambia de dirección, los demás vehículos siguen su ejemplo.

Esto significa que mediante esta tecnología es posible lograr la gestión digital del transporte en el muelle. Esto se refiere a la utilización de soluciones digitales, como el monitoreo en tiempo real, la planificación inteligente de rutas y el análisis predictivo. Al recolectar y analizar los datos generados durante la formación de caravanas, se pueden optimizar mejor el rendimiento de los vehículos, el consumo de energía y la planificación de rutas. Esto, a su vez, permite mejorar la eficiencia laboral y energética, reducir las emisiones y disminuir la congestión en esta etapa del proceso.

En situaciones de cruce mutuo, los AGV no solo podían moverse en línea recta, sino que también podían realizar giros, recorridos circulares e incluso llevar a cabo operaciones de carga y descarga entre las patas de las grúas pórtico sobre rieles. En comparación con la segunda generación, las grúas pórtico en las áreas de almacenamiento estaban dispuestas de manera simétrica en configuración de relevos, y la eficiencia teórica de carga y descarga del muelle alcanzaba los 40 (contenedores estándar) por hora.

El puerto APMT MVII, que comenzó a operar en 2015 y sigue siendo uno de los puertos totalmente automatizados más avanzados del mundo, tiene la capacidad de manejar las embarcaciones portacontenedores más grandes en la actualidad. Aproximadamente el 80% de las grúas de carga en el muelle son totalmente automatizadas, mientras que las operaciones restantes se realizan de forma remota. Cada grúa en el puerto está equipada con dos spreaders y en total hay ocho carriles, lo que permite cargar y descargar dos contenedores de 40 pies al mismo tiempo. Estos ocho carriles están directamente conectados a la línea ferroviaria Betuwe, una vía de carga eléctrica de doble carril de 160 kilómetros (100 millas) de longitud que conecta el puerto de Róterdam con la frontera alemana en Zevenaar-Emmerich, lo que ha mejorado significativamente la eficiencia de transporte de carga.

En 2019, la incorporación de dos grúas de carga de súper muelle se espera que aumente la capacidad de manejo del puerto en más del 20%. Gracias al uso de energía verde y equipos totalmente eléctricos, este puerto se ha convertido en el primero en el mundo en lograr emisiones cero de dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y partículas. Además, cuenta con áreas de automatización completamente aisladas, que mantienen una separación clara entre humanos y máquinas, lo que garantiza un alto nivel de seguridad.

En paralelo a la operación de APMT MVII, también se puso en marcha el muelle RWG (Rotterdam World Gateway). Este muelle cuenta con 2 grúas

pórtico sobre rieles con una longitud total de 750 metros. Además, dispone de 59 vehículos guiados automatizados (AGV), 105 camiones portuarios y 50 grúas apiladoras automáticas. El transporte interno de contenedores entre el muelle y los almacenes se realiza mediante vehículos eléctricos de control automático. Los contenedores se transportan desde aquí a tierra mediante ríos interiores, ferrocarriles o carreteras, permitiendo que cada contenedor sea manejado de manera independiente en el puerto, separado de las operaciones marítimas. Con el objetivo de reducir el impacto ambiental, el 65% de los contenedores de carga interior son transportados hacia sus destinos finales utilizando vías fluviales y ferrocarriles en lugar de camiones.

Figura 17 Plataforma RWG

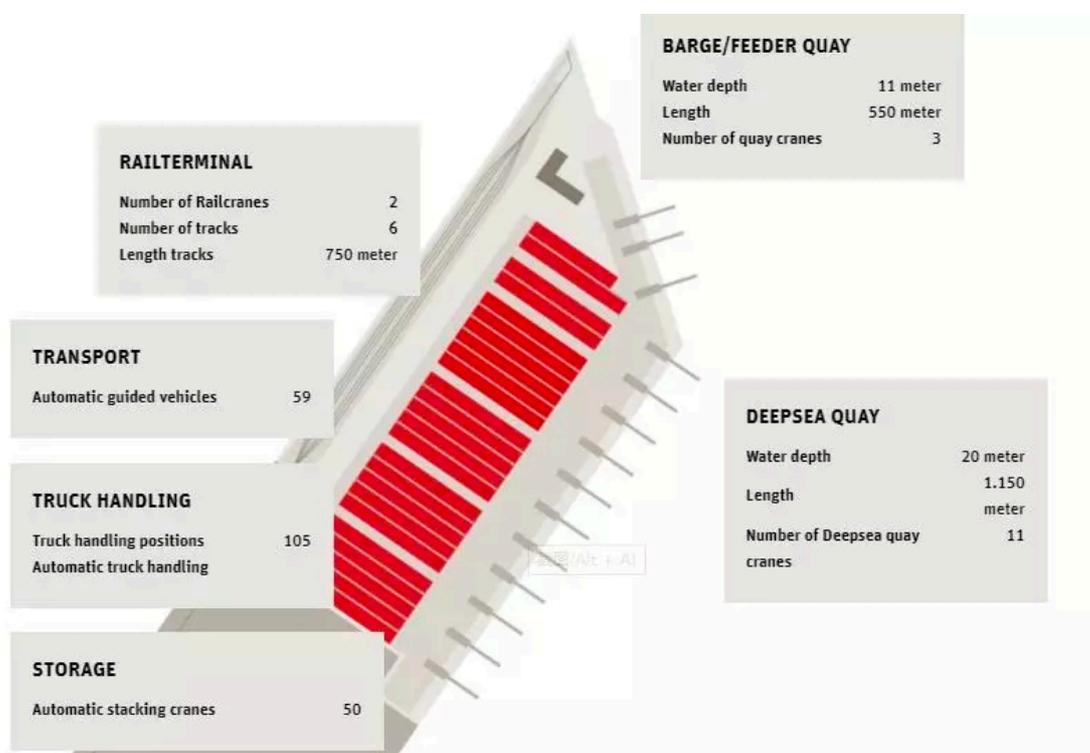


Figura 17 plataforma RWG, fuente: Port of Rotterdam

De facto, ni los vehículos AGV ni los muelles como Euromax, APMT MVII o RWG sean las únicas áreas en el puerto de Róterdam que adopta tecnologías innovadoras para la gestión. De hecho, el puerto de Róterdam pone un gran énfasis en mejorar la eficiencia operativa y el nivel de servicio portuario mediante la implementación de tecnologías de vanguardia en el campo de la Industria 4.0, como la tecnología de la información y la inteligencia artificial. En este sentido, el puerto se centra en cuatro planes importantes:

Establecimiento de una infraestructura de tecnología de la información sólida. Utilizando redes locales, computación en la nube, dispositivos móviles, Internet de las Cosas (IoT), Sistemas de Información Geográfica (GIS), sistemas de vigilancia por video, entre otros, se proporciona una base de soporte para la gestión digital y en red de áreas portuarias, muelles, patios y logística portuaria.

Implementación del sistema de gestión operativa portuaria CITOS, que permite la integración perfecta entre los sistemas de información y el control de maquinaria y equipos portuarios. Esto garantiza la distribución y programación eficiente y efectiva de los recursos portuarios.

Establecimiento de la plataforma de información interconectada Portbase System, con el fin de fortalecer la red de transporte terrestre y la integración de servicios portuarios relacionados. Esta plataforma unifica el flujo de datos en la cadena de valor portuaria, fomentando la colaboración efectiva entre entidades gubernamentales, compañías navieras, empresas logísticas, instituciones financieras y servicios legales.

Creación de un centro de datos portuarios, donde se gestionan y centralizan los recursos de información en la cadena de valor portuaria. Se desarrollan aplicaciones innovadoras basadas en big data, como infraestructura básica, gestión de producción, servicio al cliente y pronóstico de mercado. Esto proporciona servicios de datos oportunos, precisos y estandarizados a las partes involucradas.

Figura 18 Róterdam inteligente



Figura 18 futuro del puerto inteligente Rotterdam, fuente:<https://www.smartcitiesworld.net/special-reports/special-reports/port-of-rotterdam-on-course-for-self-driving-ships-by-2030>

Al mismo tiempo, con el objetivo de lograr una mayor fluidez en el puerto, el puerto de Róterdam valora enormemente la función de los nodos logísticos y el papel de centro neurálgico en la cadena logística. Se enfoca en brindar servicios de valor en toda la cadena logística del puerto, fomentando la organización eficiente y la operación coordinada de la cadena logística portuaria. Según sus informes anuales, se persigue este objetivo desde tres perspectivas principales:

Fortalecimiento de la colaboración coordinada con las partes involucradas en la cadena logística del puerto, interconectando los nodos terrestres y marítimos de la cadena logística. Se busca integrar y fusionar los recursos de la cadena logística para ofrecer servicios de alta calidad y valor agregado a los propietarios de carga, compañías logísticas, empresas navieras y alianzas.

Creación de un sistema de servicios de información integral para la cadena logística portuaria, proporcionando una plataforma colaborativa para la cooperación empresarial y la operación entre los actores de la cadena logística. Esto incluye la construcción de un sistema comunitario portuario basado en tecnología digital, que integra diferentes eslabones de la cadena de suministro y redes de trabajo (como terminales terrestres, terminales marítimas y transporte interno) en un sistema coordinado y claro, mejorando así la integración de servicios en la cadena logística portuaria. Más de 125 operadores ya han proporcionado sus datos al herramienta de planificación digital "Routescanner", lo que demuestra que los operadores de logística de contenedores están cada vez más interesados en encontrar rutas sostenibles. Los servicios digitales de Nextlogic también están mejorando la planificación del transporte fluvial, con cada vez más operadores participando. El servicio blockchain Quay Connect se lanzó en 2021, lo que ha permitido que las exportaciones al Reino Unido sean más eficientes y económicas. La Autoridad Portuaria también se está digitalizando cada vez más, como la automatización del proceso de declaración de salud marítima (MDoH), que antes requería 25,000 evaluaciones manuales anuales.

Incremento de la proporción de servicios de valor agregado. Mediante plataformas electrónicas de servicios, se integran los participantes en la red de "European Gateway Services", brindando servicios de valor agregado a través de información. Además, se procesan de manera oportuna y efectiva diversas actividades logísticas integrales según las necesidades de los usuarios, incluyendo diferentes tipos de carga, funciones y ciclos logísticos. Se

ofrecen servicios de transporte personalizados, así como servicios combinados de transbordo y transporte multimodal para satisfacer las necesidades diversas y personalizadas del mercado.

Figura 19 Routescanner



Figura 19 Routescanner, fuente: port of Rotterdam <https://www.portofrotterdam.com/nl/nieuws-en-persberichten/rijker-aanbod-routescanner-maakt-routeplanner-logische-opvolger-navigate>

Además de las tecnologías de vanguardia orientadas a optimizar la eficiencia, el puerto de Róterdam también valora enormemente el entorno ecológico y el desarrollo sostenible del puerto. Para alcanzar sus objetivos para el año 2030, además de las medidas para mejorar la calidad del aire y la eficiencia energética mencionadas anteriormente, el puerto también se enfoca en estrategias a nivel estratégico para lograr un desarrollo sostenible. Destaca especialmente su estrategia de "transformación del transporte", que implica la optimización integral de los procesos logísticos en el puerto.

En esta estrategia, se planea una reestructuración completa del sistema de transporte en el puerto, pasando de un enfoque tradicional en el transporte por carretera, representado por camiones, hacia modos de transporte más limpios y sostenibles como el transporte fluvial y ferroviario. Se está implementando un programa de incentivos para el transporte fluvial, que proporciona subsidios financieros a los barcos que cumplen con los requisitos. Además, se han establecido servicios de tren de carga entre Róterdam y Alemania para aumentar la proporción de transporte ferro-marítimo. En la

actualidad, más del 50% del transporte en el puerto de Róterdam se realiza a través de vías fluviales y más del 20% se realiza mediante transporte fluvial.

Esto tiene un impacto significativo en la reducción de la congestión vial y la contaminación ambiental en la región. Al igual que se mencionó anteriormente en relación con los muelles RTW y APMT MVII, desde el diseño inicial se consideró cómo mejorar la interconexión entre diferentes modos de transporte. El muelle RTW promueve activamente el uso de tecnologías de motores limpios y eficientes, así como vehículos eléctricos para la carga y descarga de contenedores, con el objetivo de lograr una conexión eficiente con futuros modos de transporte. Por ejemplo, el muelle APMT MVII se conecta directamente con la línea ferroviaria Betuwe, lo que muestra la ambición del puerto de Róterdam en este sentido.

4.3 Estudio del puerto de Shanghai

En el texto anterior se mencionó una comparación horizontal del puerto de Róterdam con otros puertos importantes. En ese estudio de 2008, el puerto de Róterdam tenía una clara ventaja sobre los demás puertos en términos de sostenibilidad y tecnología innovadora en ese momento. Sin embargo, en la actualidad, después de 15 años, es evidente que el puerto de Shanghái ha alcanzado una posición de liderazgo cada vez más relevante tanto en términos de tamaño como de tecnología.

Hoy, en el año 2023, el volumen total de importaciones y exportaciones de China ha alcanzado el segundo lugar a nivel mundial. Shanghái se ha convertido en la única ciudad china con un volumen de importaciones y exportaciones superior a los 34,046.8 mil millones de yuanes (aproximadamente 4,766.152 mil millones de dólares estadounidenses) según la tasa de cambio en tiempo real⁶⁴. Al mismo tiempo, China ocupa siete de los diez puertos más grandes del mundo en términos de manejo de contenedores. El puerto de Shanghái ha mantenido la posición de liderazgo durante 12 años consecutivos desde 2010, superando al segundo lugar, el puerto de Singapur, por una cantidad de 1 millón de TEU.⁶⁵

Los datos significativamente diferentes de los que tenemos hoy en día en comparación con hace quince años se deben en gran medida a la finalización y puesta en funcionamiento de la Fase I, Fase II, Fase III primera etapa y segunda etapa de la expansión del Puerto de Aguas Profundas de Yangshan entre los años 2005, 2006, 2007 y 2008. Los puertos existentes a lo largo del río Huangpu y en la costa sur de la desembocadura del río Yangtsé no podían satisfacer los requisitos de calado de los buques de gran tamaño en ese momento (estos puertos solo podían manejar buques con un calado máximo de 9 metros). Además, puertos como el de Wusong, representativos de la zona, sufrían constantes problemas de congestión debido a limitaciones en la profundidad del agua y la alta demanda de tráfico de buques de carga.⁶⁶ Estos puertos claramente no podían satisfacer las necesidades del mercado mundial de transporte marítimo que se desarrollaba a gran velocidad en el contexto de la globalización económica, especialmente cuando Shanghái tenía una posición crucial como puerto de salida para la industria manufacturera de

⁶⁴ 2023年1至7月进出口商品总值表（人民币值）. (2023, July). 中华人民共和国上海海关. http://shanghai.customs.gov.cn/shanghai_customs/423405/fdzdgnr/423468/1865071/4832584/4832600/index.html

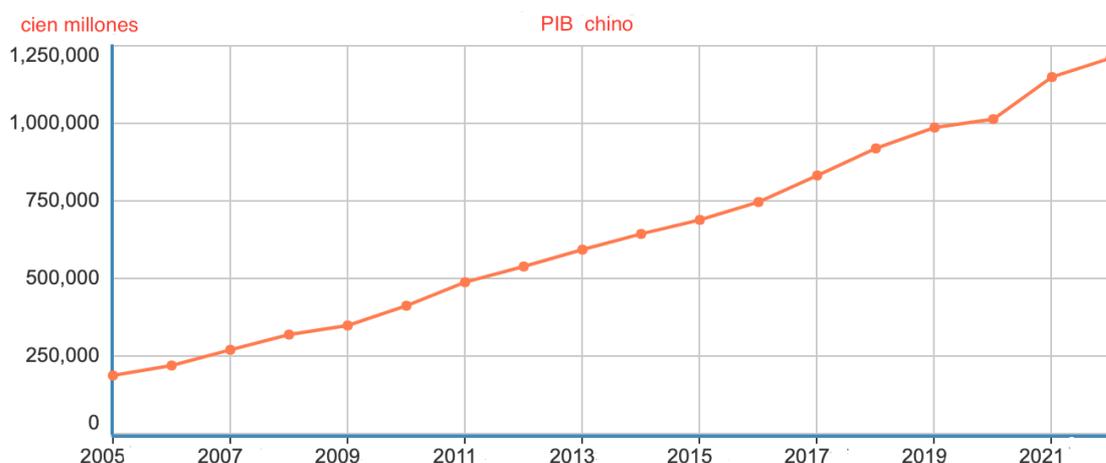
⁶⁵ AAPA. (2010). World Port Rankings.

⁶⁶ 段绍伯. (1983). 上海市建港地址初探. 上海师范大学学报: 哲学社会科学版, (3), 151-155.

China. La necesidad de construir un puerto de aguas profundas capaz de acomodar buques de gran tamaño se hizo evidente. La construcción de este puerto estaba estrechamente relacionada y se complementaba con la creación de Shanghái como centro financiero y de comercio internacional.

En 1999 se confirmó oficialmente el proyecto de construcción de un puerto artificial de relleno de tierras en Yangshan, con una profundidad máxima de hasta 15 metros, conocido como el Puerto de Aguas Profundas de Yangshan. Tras varios años de construcción, la Fase I de este puerto se completó y se puso en funcionamiento el 10 de diciembre de 2005. Al mismo tiempo, se inauguró la Zona de Almacenamiento en Régimen de Perfeccionamiento en Yangshan. Posteriormente, con la continua construcción y puesta en funcionamiento de diferentes áreas del Puerto de Aguas Profundas de Yangshan, en 2010, Shanghái logró un volumen de manipulación de contenedores de 29.07 millones de TEU, superando oficialmente a Singapur, que en ese momento tenía un volumen de 28.43 millones de TEU, convirtiéndose así en el puerto con mayor manipulación de contenedores en el mundo. El volumen total de carga alcanzó aproximadamente los 650 millones de toneladas.

Tabla 4 PIB China



PIB de China desde 2005 a 2022, fuente: Ministerio de Comercio de la República Popular China

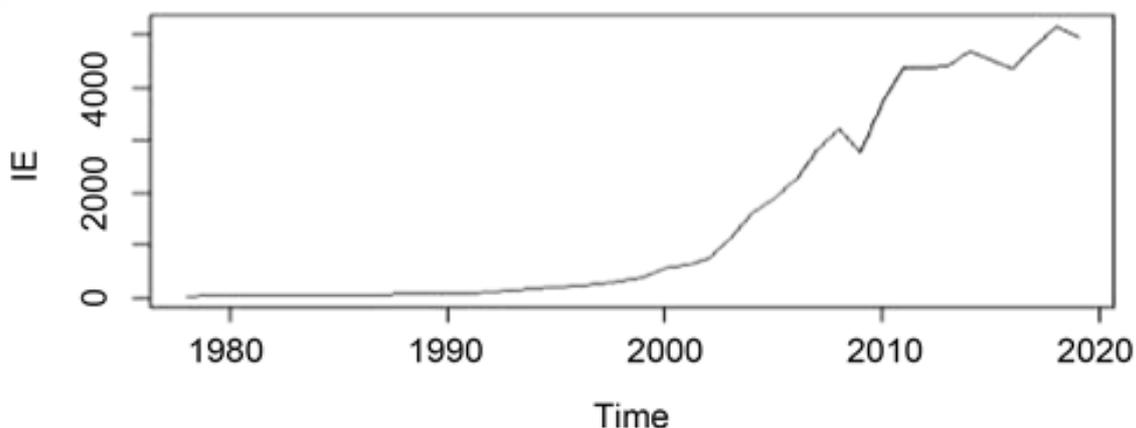
Sin embargo, durante este período, el aumento de la capacidad portuaria fue acompañado por un crecimiento económico explosivo en China. El PIB de China aumentó de 18 billones de yuanes en 2005 a 83 billones de yuanes en 2017, y en 2023 alcanzó los 121 billones de yuanes.⁶⁷ Sin lugar a dudas, junto con el crecimiento económico, la demanda en el puerto de

⁶⁷ 2005年至2022年国内生产总值（GDP）. (2023). 中华人民共和国商务部

Shanghái, como el puerto de importación y exportación más grande de China, también continuó aumentando.

De hecho, el volumen de importaciones y exportaciones en la región de Shanghái ha estado estrechamente relacionado con la construcción y expansión continua de la Fase I, Fase II y Fase III del Puerto de Aguas Profundas de Yangshan. Según los datos proporcionados por la Oficina de Estadísticas de Shanghái, después de la entrada en funcionamiento del Puerto de Aguas Profundas de Yangshan en 2005, el volumen total de importaciones y exportaciones en Shanghái experimentó un aumento significativo de magnitud.

Tabla 5-6 estudio de relación de volumen de importación y exportación con volumen de carga



Volumen de importación y exportación total de shanghai durante ultimas 5 décadas

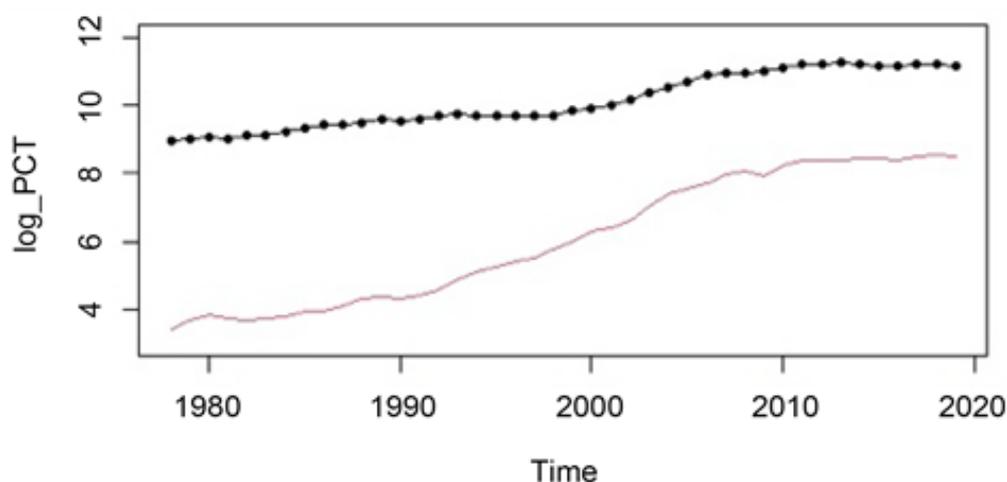


Gráfico de series temporales en escala logarítmica de la cantidad total de importaciones y exportaciones de shanghai y el volumen de carga del puerto de shanghai

Según un estudio realizado por Xu Yingshuang y Hu Wenwei basado en el modelo ARIMA⁶⁸, existe una clara relación causal entre el volumen de carga del puerto de Shanghái y el volumen total de importaciones y exportaciones. En otras palabras, el explosivo crecimiento de las importaciones y exportaciones después de 2005 se basó en el aumento de la capacidad de manipulación de carga internacional que se construyó en la Zona de Aguas Profundas de Yangshan.

Figura 20 Cogestión en el puerto de Yangshan



Figura 20 Congestión en el puerto de Yangshan, fuente: logistics updates Africa

Sin embargo, para el año 2017, justo antes de la entrada en funcionamiento de la Fase IV del Puerto de Aguas Profundas de Yangshan, la capacidad de los 16 muelles para buques portacontenedores de 70,000 a 150,000 toneladas métricas y la capacidad de producción de más de 15 millones de TEU de la Fase I a la Fase III ya no podían satisfacer las necesidades locales. Como resultado, Yangshan experimentó graves congestiones en abril y mayo de 2017, con un aumento del retraso promedio de los barcos de aproximadamente un 40%. Especialmente del 16 al 18 de abril, el tiempo de retraso promedio aumentó en 53 horas, un aumento del 42% en comparación con el promedio. Posteriormente, en agosto, se produjeron más bloqueos. Durante este período, debido a la grave congestión, se realizaron ajustes constantes en las operaciones portuarias, y numerosos

⁶⁸ 徐颖双, & 胡文伟. (2022). 基于 ARIMA 模型的上海港货物吞吐量和进出口总额预测分析. *Advances in Applied Mathematics*, 11, 3635.

buques se vieron obligados a utilizar puertos cercanos como Wai Gao Qiao para la carga y descarga. Aunque esta situación también se vio afectada por la adopción de nuevas programaciones de servicios de barcos por parte de la Alianza THE Alliance y la nueva Ocean Alliance en abril de 2017, así como por las inclemencias del tiempo estacionales, no se puede negar que esto fue el resultado de una larga utilización del puerto de Shanghái por encima de su capacidad. Desde 2010, cuando Shanghái se convirtió en el puerto con el mayor volumen de manipulación de contenedores del mundo, el volumen anual ha superado ampliamente la capacidad de manipulación diseñada y, en 2017, alcanzó los 40.23 millones de TEU, muy por encima de la capacidad de manipulación diseñada de 6.5 millones de TEU.⁶⁹ Esta situación no se resolvió hasta la finalización y puesta en funcionamiento de la Fase IV del Puerto de Aguas Profundas de Yangshan.

La Fase IV del Puerto de Yangshan, inaugurada el 10 de diciembre de 2017, es la instalación portuaria automatizada e inteligente más grande y avanzada hasta la fecha. Tras su puesta en funcionamiento, la capacidad anual de manipulación de contenedores en todo el Puerto de Shanghái superó los 40 millones de TEU, lo que equivale a la suma del volumen de todos los puertos de Estados Unidos y representa aproximadamente una décima parte del volumen anual de contenedores a nivel mundial.

Sin embargo, lo que hace que este puerto sea excepcional no es solo su magnitud, sino su nivel de automatización integral. La Fase IV del Puerto de Yangshan cuenta con diez grúas pórtico, 38 grúas de ferrocarril y 50 vehículos de guiado automático (AGV). Este "cuatro" no solo se refiere a ser la cuarta fase de este puerto de aguas profundas, sino también al concepto de Industria 4.0 y la tecnología de AGV de cuarta generación.⁷⁰

En este puerto, desde la terminal hasta el patio de almacenamiento, todos los procesos de operación son completamente automatizados, excepto las grúas pórtico que se operan de manera remota y semiautomática. Cuando un buque portacontenedores de gran tamaño atraca en una de las siete plataformas de atraque de este puerto, las grúas pórtico en tierra se encargan de forma automática, controladas por computadora y con supervisión parcial remota, de tomar los contenedores del barco y colocarlos en una plataforma de transferencia. Luego, los carros de pórtico en la plataforma de transferencia, según la configuración del sistema automatizado, trasladan los contenedores a los AGV en la plataforma. Este proceso toma menos de dos minutos.

⁶⁹ 李倩, & 贾晓霞. (2021). 新形势下上海洋山深水港物流发展问题研究. *Management Science and Engineering*, 10, 169.

⁷⁰ 王施恩. (2016). 洋山四期全自动化集装箱码头交通组织. *水运工程*, (9), 35-39.

Figura 21 AGVs de nueva generación en Yangshan IV



Figura 21 Los AGVs de nueva generación en el puerto de Yangshan IV, fuente: Xin Hua news

Luego, utilizando un sistema de localización en tierra compuesto por 61,438 clavos de localización, el sistema centralizado de AGV controla automáticamente los AGV necesarios para mover los contenedores al área de almacenamiento designada. Estos AGV siguen las rutas más cortas, eficientes y menos congestionadas.⁷¹ Como resultado, la eficiencia operativa de este puerto alcanza los 40 contenedores por hora, En los datos actualizados revelados en 2021, tras una continua optimización, la eficiencia de operación de una sola grúa pórtico en el puerto alcanzó las 63.88 contenedores estándar por hora, con un promedio de 58.28 contenedores estándar como la cantidad máxima de carga por hora en una sola nave⁷². superando nuevamente la eficiencia de la terminal de AGV mencionada anteriormente en el Puerto de Róterdam. Además, esta eficiencia representa un aumento del 70% en comparación con una terminal de contenedores manual de capacidad similar.

En la práctica, un puerto de esta envergadura requeriría tradicionalmente al menos unas 1200 personas para llevar a cabo las operaciones portuarias. Sin embargo, en la Fase IV del Puerto de Yangshan, que opera de manera completamente automatizada, incluyendo personal

⁷¹ 王跃全. (2018). 洋山深水港全自动化码头 AGV 磁钉安装定位方法. 水运工程, (4), 69-72.

⁷² 洋山四期: 如何登上自动化码头的“珠穆朗玛峰.” (2022, October 17). 澎湃新闻. https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_20320834

logístico, se necesitan menos de 300 personas para llevar a cabo todas las tareas.⁷³

De hecho, en comparación con el Puerto de Róterdam, que comenzó a experimentar operaciones completamente automatizadas en el puerto a finales del siglo pasado, los muelles de la Fase I, Fase II y Fase III del Puerto de Yangshan, que se completaron después de más de una década, aunque también incorporaron algunas tecnologías relacionadas, aún utilizaban camiones convencionales para mover los contenedores en el puerto. Aunque puede parecer una alternativa viable en comparación con el alto costo de alrededor de un millón de dólares por unidad de un AGV, la naturaleza de las operaciones manuales limitaba su aplicabilidad en un puerto de gran escala como Yangshan.

Figura 22 Camiones de operación manual (Neijika) que utiliza en el puerto Yangshan I, II y III.



Figura 22 Camiones de operación manual (Neijika) que utiliza en el puerto Yangshan I, II y III.

Neijika (内集卡, término ampliamente utilizado en las operaciones portuarias en China para referirse a camiones pesados especializados en

⁷³ 上海洋山港四期自动化码头：科技赋能智慧港口. (2022, September 27). 新华社上海. http://sh.news.cn/2022-09/27/c_1310666212.htm

mover contenedores dentro del puerto, en adelante se les denominará NJK) y AGV son dos tipos de equipos ampliamente utilizados en la manipulación de contenedores en los puertos hoy en día, cada uno con características y aplicaciones diferentes. A continuación, se presentará una descripción de estas dos tecnologías y sus respectivas aplicaciones en las fases 1, 2, 3 y 4 del puerto de Yangshan.

En primer lugar, es importante mencionar los AGV (Vehículos de Guiado Automático), que ya han sido mencionados en el artículo anterior en relación con el puerto automatizado de Róterdam. Los AGV de la primera a la tercera generación en el puerto de Róterdam comparten características similares, como la automatización, la precisión, la versatilidad y la capacidad de monitoreo en tiempo real. Esto significa que los AGV pueden ejecutar automáticamente tareas en el puerto, lo que reduce la necesidad de operación manual y, por lo tanto, los costos laborales. Además, garantizan la precisión en la navegación y la ejecución de tareas, lo que reduce el riesgo de daños en la mercancía y errores. La capacidad de monitoreo en tiempo real es esencial en un sistema de gestión centralizado, ya que contribuye significativamente a mejorar la eficiencia en la administración y operación del puerto, como se mencionó anteriormente.

Sin embargo, sin lugar a dudas, este tipo de equipo también tiene sus limitaciones. En primer lugar, como se mencionó anteriormente, el costo de adquisición de un AGV individual puede alcanzar millones de dólares. Además, el mantenimiento del sistema AGV es más complejo en comparación con el de los NJK, ya que requiere mantenimiento periódico y actualizaciones del sistema. Lo más importante es que este sistema tiene requisitos rigurosos para el entorno en el que opera, ya que necesita desplegar instalaciones de navegación dentro del puerto, como los pernos de posicionamiento utilizados en la fase cuatro del puerto de Yangshan. Estos pernos de posicionamiento son un ejemplo típico de la aplicación de tecnología IoT (Internet de las cosas). De hecho, en este aspecto, la tecnología AGV presenta una alta diferenciación, ya que su tecnología de navegación se divide en tres categorías principales: navegación de rutas fijas, navegación de rutas libres y navegación combinada.⁷⁴

Los pernos de posicionamiento mencionados anteriormente pertenecen a la navegación de rutas fijas, que implica planificar el puerto como una serie de rutas fijas y preinstalar pernos de posicionamiento o cables metálicos necesarios en estas rutas. Luego, se utiliza un sensor electromagnético a bordo del AGV para detectar la intensidad de campo electromagnético, lo que permite al AGV identificar y seguir las frecuencias de

⁷⁴ 张志明. (2014). AGV 技术发展综述. 导航与控制.

guía para la navegación. La ventaja de esta tecnología es que los pernos y cables están ocultos debajo del suelo del puerto, lo que los hace discretos y difíciles de dañar, y no interfieren con señales auditivas o visuales. Sin embargo, la instalación de estos pernos y cables puede ser complicada y, aunque no afecta la construcción de nuevos puertos, puede ser difícil de implementar en puertos más antiguos, ya que requiere la renovación completa del suelo del puerto y, durante este proceso, el puerto no puede realizar ninguna operación, lo que limita su aplicabilidad en proyectos de automatización de puertos existentes.⁷⁵⁷⁶

Figura 23 AGVs con tecnología de navegación de rutas fijas por electromagnetismo



Figura 23 AGVs con tecnología de navegación de rutas fijas por electromagnetismo, fuente: clearpathrobotics

Otra forma de navegación de rutas fijas es la navegación óptica, que implica marcar rutas fijas con señales ópticas y utilizar sensores ópticos a bordo del AGV para capturar señales de imagen y reconocer las rutas para la navegación.⁷⁷ La ventaja de esta tecnología en comparación con la navegación electromagnética es que no requiere la instalación subterránea de pernos o cables, lo que hace que su despliegue sea más sencillo. Sin embargo, esta

⁷⁵ 纪寿文, & 李国强. (2004). 智能化的物流搬运机器人-AGV. 中国物流与采购, 2.

⁷⁶ 于国英, 高峰, 张小丽, & 王建军. (2011). 现代制造车间 AGV 导航与控制的研究. 科技信息, 20.

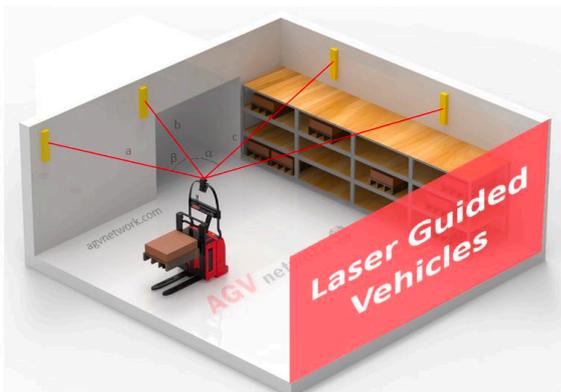
⁷⁷ 张辰贝西, & 黄志球. (2010). 自动导航车(AGV)发展综述. 中国制造业信息化, 39.

tecnología también presenta desafíos, ya que requiere un entorno de trabajo altamente visible y limpio en el puerto. Además, las señales ópticas pueden desgastarse con el tiempo y deben reemplazarse periódicamente, lo que aumenta los costos de mantenimiento. Vale la pena mencionar que esta tecnología se divide en navegación infrarroja y navegación basada en códigos QR, dependiendo de los diferentes dispositivos ópticos utilizados.

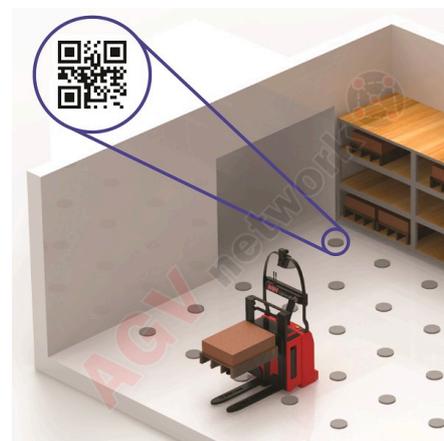
La tecnología de navegación óptica también se utiliza en el método de navegación de rutas libres, donde los AGV no planifican previamente su ruta, sino que la determinan en tiempo real durante la operación. En este contexto, la navegación óptica se divide en dos categorías: navegación activa y pasiva, utilizando la navegación láser y la navegación visual, respectivamente.

La navegación láser implica el uso de un emisor láser a bordo del AGV para la ubicación. Durante su movimiento, el AGV emite un rayo láser a través de un escáner láser, y múltiples receptores alrededor del área capturan el rayo láser reflejado desde objetos en el entorno. Esta información se utiliza para determinar la posición y la ruta del AGV en tiempo real. La navegación láser es altamente precisa y eficiente en la detección de obstáculos en tiempo real, lo que permite al AGV navegar con seguridad en un entorno en constante cambio.⁷⁸

Figura 24-25 AGV de tipo sensor laser y optica



AGV de tipo sensor laser, fuente:
AGV robot home



AGV con tecnología de rutas
fijas por la navegación
óptica, fuente: AGV network

La navegación visual, por otro lado, se basa en sensores de visión instalados en el AGV para capturar imágenes del entorno circundante. Estas

⁷⁸ 徐京邦, 刘洋, 李计星, 周宇, & 王凌云. (2020). AGV 激光导航定位技术综述与发展趋势. 物流技术与应用, 25.

imágenes se analizan para construir un mapa de coordenadas del área. Durante su movimiento, el AGV compara las imágenes actuales con el mapa para determinar la mejor ruta en tiempo real. Esta tecnología requiere una mayor capacidad de cálculo por parte del AGV, ya que debe realizar comparaciones en tiempo real entre las imágenes capturadas y el mapa generado por el sistema. La ventaja de la navegación visual es su capacidad para adaptarse a entornos cambiantes y desconocidos, lo que la hace útil en situaciones donde la ruta no se puede prever con antelación.⁷⁹

Figura 26 AGV de tipo sensor visual

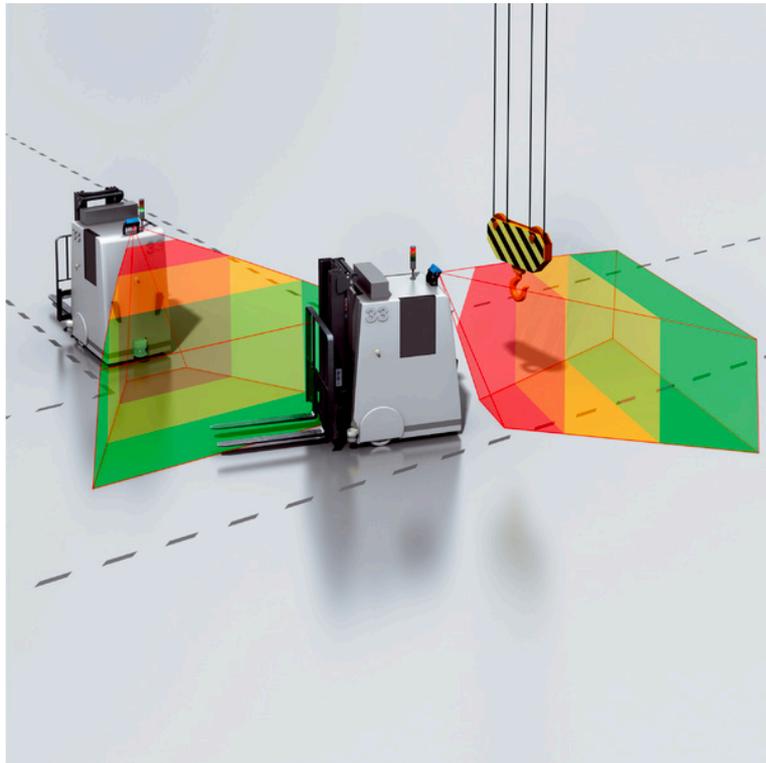


Figura 26 AGV de tipo sensor visual, fuente: www.sick.com

En el método de navegación de rutas libres, también se utilizan la navegación GPS y la navegación inercial, que utilizan tecnología GPS y sensores internos para determinar la posición y la orientación para la navegación. Sin embargo, ninguno de estos dos enfoques es muy adecuado para escenarios de operaciones portuarias.

La navegación GPS se basa en la recepción de señales de satélite para determinar la ubicación del AGV. Si bien es una tecnología precisa en

⁷⁹ 王浩吉, 杨永帅, & 赵彦微. (2019). 重载 AGV 的应用现状及发展趋势. 机器人技术与应用.

entornos al aire libre, puede ser menos confiable en áreas congestionadas o en interiores, como los puertos, donde las señales de satélite pueden verse obstaculizadas o reflejadas en estructuras, lo que puede llevar a errores en la determinación de la ubicación.

La navegación inercial utiliza sensores internos, como acelerómetros y giroscopios, para medir los cambios en la velocidad y la dirección del movimiento y, a partir de estos datos, calcular la posición y la orientación del AGV. Si bien esta tecnología puede ser precisa a corto plazo, tiende a acumular errores con el tiempo, lo que la hace menos adecuada para tareas de larga duración o que requieran una alta precisión.⁸⁰

La navegación combinada implica la combinación de las dos técnicas mencionadas anteriormente, aprovechando sus ventajas y desventajas en diferentes situaciones para lograr un rendimiento y eficiencia óptimos. En comparación con el uso individual de estas técnicas, la navegación combinada se caracteriza por su alta flexibilidad. En situaciones de baja actividad en el área de operaciones, se utiliza la navegación de rutas fijas para obtener la mejor ruta y la máxima eficiencia. Por otro lado, en momentos de alta congestión en el área de operaciones, se utiliza la navegación de rutas libres para evitar eficazmente situaciones de atasco y congestión.⁸¹

Figura 27 AGV de sensor mixta

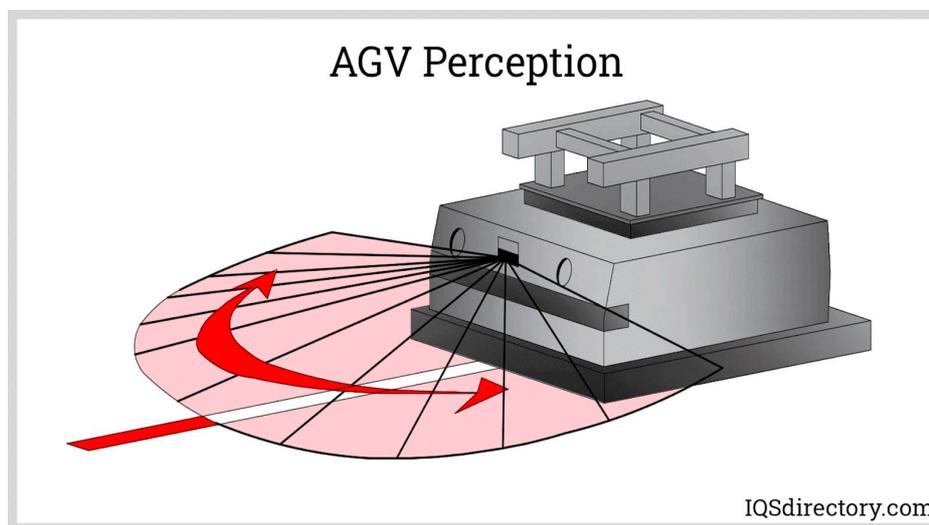


Figura 27 Funcionamiento del sensor de AGV, tanto con la ruta libre como la fija fuente: IQSdirectory

⁸⁰ 吴鹏, 李京东, & 负超. (2018). 一种惯性传感器与编码器相结合的 AGV 航迹推算系统. 机电工程.

⁸¹ 张礼廉, 屈豪, 毛军, & 胡小平. (2020). 视觉/惯性组合导航技术发展综述. 导航定位与授时.

Hasta la fecha, los camiones NJK siguen siendo la mejor opción para aquellos puertos no automatizados, ya que estos camiones están diseñados para transportar grandes cantidades de contenedores, tienen una alta capacidad de carga y ofrecen flexibilidad debido a la conducción manual. Son adecuados para la mayoría de las tareas y diversos entornos. Además, debido a su operación manual, no requieren sistemas de navegación, lo que reduce significativamente los costos iniciales. Sin embargo, debido a su alta dependencia de la operación manual, inevitablemente están sujetos a errores humanos y, en comparación con los sistemas AGV, pueden ser menos eficientes. Esto es especialmente evidente en escenarios de alto rendimiento y alta intensidad, como en puertos de gran escala, donde la eficiencia ha sido relativamente más baja.

Estos camiones de operación manual utilizados en el puerto, como la única herramienta para conectar la vanguardia del puerto tradicional y el patio de contenedores, aunque se realizaron investigaciones en el campo de la programación de camiones de contenedores para maximizar su eficiencia, todavía estaban muy por detrás en términos de eficiencia en comparación con la planificación completamente automatizada de AGV. De hecho, en 2021, el muelle de la Fase IV de Yangshan, altamente automatizado, manejó un volumen de carga de 5.7 millones de contenedores y alcanzó un nivel de operación de 6.3 millones de contenedores.⁸² Sin lugar a dudas, en este aspecto, los AGV tienen ventajas muy claras en comparación con los camiones de contenedores de operación manual tradicionales.

De hecho, los AGV tienen ventajas no solo en términos de eficiencia en comparación con los NJK, sino que también destacan en cuanto a desarrollo sostenible. En las últimas generaciones de AGV, se utiliza tecnología eléctrica, como se mencionó anteriormente, en comparación con los NJK tradicionales que funcionan con motores diésel. Esta tecnología eléctrica tiene enormes ventajas en términos de eficiencia energética y emisiones de gases de efecto invernadero.

Además, gracias a su capacidad de planificación de rutas inteligentes, los AGV pueden llevar a cabo sus tareas utilizando la ruta más corta y eficiente, lo que reduce el consumo de energía y las emisiones en comparación con los posibles desplazamientos innecesarios que podrían ocurrir con los NJK.

Adicionalmente, existe un método de carga para los AGV que involucra estaciones móviles de carga y un sistema de carga para AGV. Este método permite que las estaciones móviles de carga planifiquen de manera autónoma

⁸² 上海国际港务（集团）股份有限公司 2021 年年度报告. (2022). 上海国际港务（集团）股份有限公司.

su ruta de desplazamiento para llegar a los AGV y cargarlos de manera activa. Este enfoque evita que los AGV tengan que regresar a una estación de carga fija, lo que ahorra tiempo de trabajo. Además, las estaciones móviles de carga no interfieren ni se obstaculizan entre sí en sus rutas, lo que aumenta la eficiencia del equipo y garantiza que los AGV puedan cargar de manera continua sin interrupciones.

Este avance también permite que las estaciones móviles de carga se muevan simultáneamente con los equipos que deben cargar, asegurando que los puntos de carga se conecten de manera continua. Esto garantiza una carga ininterrumpida para los AGV. Además, a través de un sistema de programación en segundo plano, se garantiza la puntualidad de la carga y se asignan intervalos de tiempo previamente planificados para las estaciones móviles de carga. Esto asegura que, incluso durante períodos de alta demanda de carga, los AGV tengan acceso oportuno y razonable a la carga, al tiempo que se evita la sobrecarga y se mejora la vida útil de la batería. Lo más importante es que este enfoque contribuye significativamente a la reducción del desperdicio de recursos.⁸³

Figura 28 Funcionamiento de sistema de recarga AGV con estaciones móviles de carga

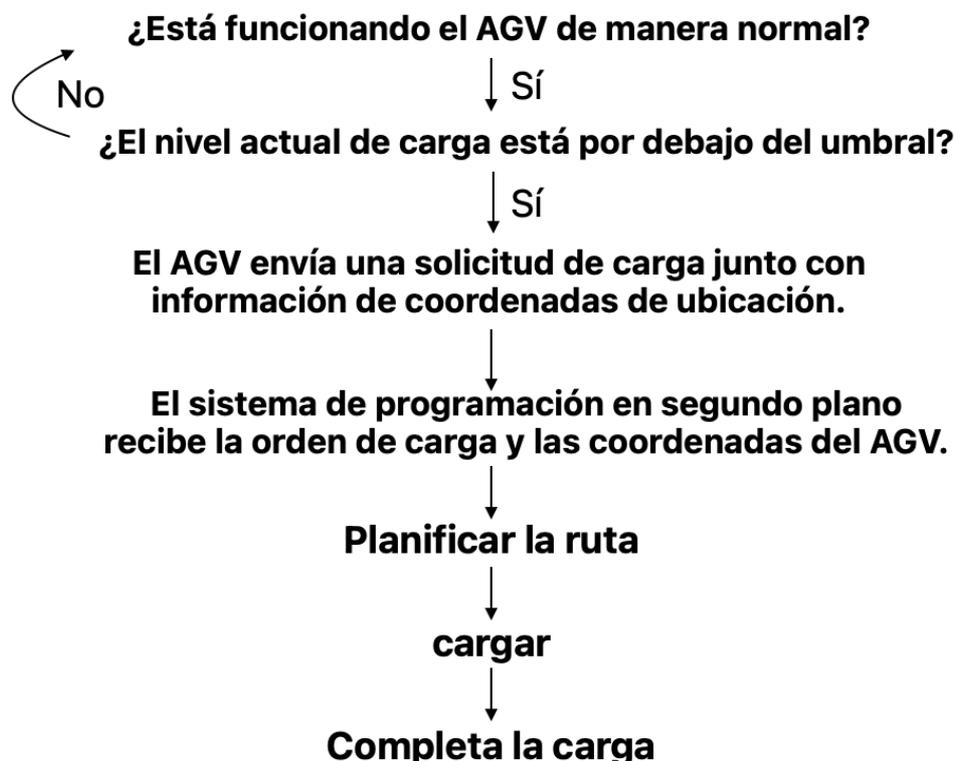


Figura 28 Funcionamiento de sistema de recarga AGV con estaciones móviles de carga

⁸³ 李帆, 谢宇, & 彭达. (n.d.). 自动导引运输车(Agv)的充电方法和移动充电桩、充电系统. 2015.

A nivel técnico, más allá del desarrollo sostenible de la tecnología, se encuentra el conjunto de medidas de desarrollo sostenible a nivel portuario. Aquí es donde entra en juego el concepto de "puerto verde".⁸⁴ Un puerto verde se refiere a aquellos puertos que implementan medidas tecnológicas y de gestión orientadas a la conservación de recursos y energía, así como a la protección del medio ambiente y la mitigación de los desafíos del cambio climático durante sus operaciones.

En este sentido, el puerto de Róterdam mencionado previamente es un ejemplo típico de puerto verde. China, aunque más tarde en su desarrollo, también ha tomado medidas en esta dirección. Desde un punto de vista legislativo, el desarrollo de los puertos verdes en China comenzó oficialmente con la formulación del "Plan Quinquenal de Ahorro de Energía y Reducción de Emisiones en el Transporte por Carretera y por Agua" por parte del Ministerio de Transporte en 2011. Este plan estableció objetivos de reducción de emisiones de carbono para los puertos.⁸⁵

Luego, en 2015, se publicó el "Plan de Acción Especial para el Control de la Contaminación en Buques y Puertos (2015-2020)", que definió objetivos claros para la reducción de contaminantes en los puertos chinos en un período de cinco años. Estos objetivos incluían una reducción del 65% en las emisiones de óxidos de azufre (SOx), una reducción del 20% en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y una reducción del 30% en las emisiones de partículas finas (PM2.5) en aguas chinas en comparación con los niveles de 2015. Además, se estableció el requisito de que al menos el 50% de los buques portacontenedores estén equipados con capacidad para recibir electricidad desde tierra.⁸⁶

En 2016, el Ministerio de Transporte publicó el "Plan Quinquenal para el Desarrollo del Ahorro de Energía y la Protección del Medio Ambiente en el Transporte", que enfatizaba la incorporación del desarrollo sostenible en todas las áreas y procesos del transporte, incluidos los puertos.⁸⁷

⁸⁴ 刘翠莲, & 郁艸兰. (2011). 论我国绿色港口建设. 武汉理工大学学报: 社会科学版, 24(3), 328-331.

⁸⁵ 孙瑶. (2011). 公路水路交通运输节能减排“十二五”规划正式发布. 交通标准化, (13), 42-42.

⁸⁶ 徐洪磊, & 韩兆兴. (2016). 《船舶与港口污染防治专项行动实施方案(2015—2020年)》实施进展情况及重点工作推进建议. 港口科技, (6), 33-36.

⁸⁷ 俞海, 王勇, 张永亮, 赵子君, & 张燕. (2017). “十三五”中国绿色增长路径识别分析. 中国人口·资源与环境, 1.

En 2017, se emitieron las "Directrices sobre el Fomento del Desarrollo del Transporte Ecológico en la Cuenca del Yangtsé", con el objetivo de establecer un grupo de puertos en la Cuenca del Yangtsé, incluido el puerto de cShanghái, que tuvieran una distribución razonable, equipos de buques eficientes en energía y procesos de transporte avanzados y eficientes para 2020.⁸⁸

En 2019, el Ministerio de Transporte emitió el "Plan de Acción para Promover la Construcción de Puertos Verdes (2018-2022)" y las "Directrices para la Construcción de Puertos de Primera Clase en el Mundo", que establecen siete tareas clave para la construcción de puertos verdes en China y definen los objetivos de desarrollo sostenible de los puertos chinos, con la meta de que, para 2035, la gestión de la contaminación en los puertos y los buques en China esté a la vanguardia mundial, al tiempo que los principales puertos chinos alcancen niveles avanzados de desarrollo sostenible a nivel internacional.⁸⁹⁹⁰

En comparación con la legislación relacionada con el desarrollo sostenible del Puerto de Shanghái, el puerto reveló en su informe anual de 2022 los esfuerzos realizados en la dirección de la sostenibilidad. En 2018, completó la evaluación de impacto ambiental y otros proyectos de protección ambiental, y en 2022 cumplió con todos los indicadores. Esto significa que después de implementar medidas de protección ambiental, el puerto ha cumplido con todos los requisitos de monitoreo de emisiones contaminantes mencionados anteriormente.

En cuanto a la contaminación del agua, el Puerto de Shanghái ha instalado equipos de tratamiento de aguas aceitosas con una capacidad de procesamiento de diez toneladas por hora dentro del puerto. Además, en 2022 se agregaron equipos de tratamiento de desechos sólidos correspondientes y se subcontrató a una empresa para tratar los residuos minerales de aceite, filtros de aceite usados, lodos de aceite y desechos industriales sólidos generales. Durante 2022, se trataron 5,16 toneladas de residuos minerales de aceite y 21,65 toneladas de residuos sólidos industriales generales.

En lo que respecta a la contaminación del agua, dado que las aguas residuales del Puerto de Shanghái se descargan a través del sistema de alcantarillado municipal, según los datos proporcionados por dicho sistema, las muestras recogidas en el sistema de alcantarillado para el monitoreo

⁸⁸ 姜磊, 陈攀, & 骆义. (2018). 长江经济带绿色航运发展背景下原油船队运输组织方式发展分析. 水运管理, 40(11), 19-21.

⁸⁹ 席悦. (2018). 绿色港口建设加速推进. 中国物流与采购, (8), 33-34.

⁹⁰ 王海潮. (2019). 政策解读: 关于建设世界一流港口的指导意见. 中国海事.

ocasional indican concentraciones muy por debajo de los límites de concentración de contaminantes establecidos, con 18 mg/l de demanda química de oxígeno (DQO), 8 mg/l de sólidos suspendidos y 0,11 mg/l de hidrocarburos totales en comparación con los límites de 500 mg/l de DQO, 400 mg/l de sólidos suspendidos y 15 mg/l de hidrocarburos totales establecidos. Además, el puerto contrató a una entidad de monitoreo independiente para realizar pruebas semestrales, y todas estas mediciones también se encontraban dentro de los estándares.

En lo que respecta a la reducción de emisiones de carbono, en 2022, el puerto logró una disminución de 11,713 toneladas equivalentes de dióxido de carbono (CO₂e) a través de medidas como la generación distribuida de energía solar, la modernización y actualización de neumáticos para grúas portuarias con tecnología híbrida eficiente en energía, mejoras en la eficiencia energética de la iluminación y la sustitución de maquinaria no vial por vehículos eléctricos. También se exploraron alternativas de energía eléctrica para los vehículos de movimiento de carga.

En cuanto al desarrollo social sostenible, el puerto donó un total de 11,511,190 yuanes (equivalentes a aproximadamente 1,621,000 dólares estadounidenses con un tipo de cambio de 0.14 dólares por yuan) a diversas iniciativas benéficas y proyectos sociales.⁹¹

⁹¹ 上海国际港务(集团)股份有限公司 2022 年年度报告. (2023). 上海国际港务(集团)股份有限公司.

5. Estudio comparativo y análisis de los puerto de Róterdam y Shanghai

En este capítulo, se realizará una comparación en seis dimensiones entre el puerto de Shanghái y el puerto de Róterdam. Se analizarán horizontalmente las políticas locales portuarias de protección ambiental, las emisiones de carbono, el uso de tecnologías innovadoras, la utilización de energías renovables, las certificaciones de puertos verdes, la responsabilidad social y el impacto en el mercado entre ambos puertos.

5.1 Comparación de políticas locales

En esta sección, en el caso de puerto de Róterdam, se destaca la clara visión del 2030 Structure Vision publicada en Rotterdam, que establece el objetivo de crear un entorno residencial adecuado mientras se desarrolla la economía. Sobre esta base, se han formulado estrategias de desarrollo sostenible diferentes para las diversas áreas del puerto. Por ejemplo, en la area de Maasvlakte 2, mencionada anteriormente, la planificación previa a la construcción se centra en evaluar regularmente el impacto del relleno de tierras en el entorno local, así como la accesibilidad del transporte, la calidad del aire, la ecología marina, la biodiversidad y las áreas marítimas afectadas.

Otra área importante es Stadshavens, que también es una parte fundamental del puerto de Rotterdam. Según el plan de visión estructural para 2030 de Rotterdam, se han formulado planes a largo plazo (2040), a medio plazo (2025) y a corto plazo (2015) para esta área. Estos planes incluyen cinco aspectos clave: la reestructuración de la tecnología portuaria, la expansión del volumen económico y la mejora de la calidad económica, la integración del puerto con la ciudad, la construcción de comunidades acuáticas y el transporte sostenible. Además, se han establecido indicadores para evaluaciones ambientales regulares en esta área, abarcando niveles de ruido, calidad del aire, seguridad, transporte y capacidad de adaptación al cambio climático. Esta serie de políticas y estrategias demuestran el compromiso del puerto Róterdam con el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente en diferentes áreas y períodos de tiempo.⁹²

En cuanto al puerto de Shanghái, desde 2016 se ha implementado una política de control de emisiones de buques. Esta política establece requisitos específicos para los buques que atracan en el puerto de Shanghái en términos del contenido de azufre en el combustible marino utilizado a bordo (no superior

⁹² 朱源, & 任景明. (2014). 荷兰城市规划环评的经验与启示. 环境影响评价, (1), 41-43.

al 0.5% (m/m) o 10 ppm), la eficacia y el uso normal de los sistemas de recuperación de compuestos orgánicos volátiles a bordo y las instalaciones de alimentación en tierra (shore power).

Se realizan inspecciones periódicas del combustible utilizado en los buques, y entre 2016 y 2021 se llevaron a cabo un total de 24,058 inspecciones aleatorias en buques, con sanciones impuestas a 735 buques que no cumplían con los estándares en cuanto a la recuperación de compuestos orgánicos volátiles y los niveles de azufre en el combustible.

Además, se ha planificado la creación de zonas de control de emisiones de buques y zonas de control de azufre en el Plan de Acción de Tres Años para el Desarrollo Integrado del Área del Delta del Yangtsé (2018-2020). Incluso antes de la implementación del "Plan de la OMI para la Implementación de la Regulación del Contenido de Azufre en el Combustible de los Buques en Todo el Mundo para el Año 2020", publicado por el Comité de Protección del Medio Marino de la Organización Marítima Internacional en 2020, las regulaciones en el puerto de Shanghái eran más estrictas que las normas internacionales habituales. Estas medidas muestran el compromiso del puerto de Shanghái con el control de las emisiones de buques y la protección del medio ambiente marino en la región.⁹³

Al comparar las políticas de estos dos puertos, es evidente que el puerto de Róterdam tiende a favorecer la planificación regional que minimiza el impacto en la vida local y el entorno ecológico. Por otro lado, el puerto de Shanghái ha implementado una serie de políticas rigurosas dirigidas a abordar de manera inmediata la grave contaminación por azufre en los combustibles marinos, con el objetivo de lograr una reducción rápida de la contaminación local en un corto período de tiempo.

Ambas políticas están diseñadas teniendo en cuenta las condiciones locales y las necesidades específicas de cada puerto. Shanghai enfrentaba una grave contaminación local, lo que justifica la adopción de medidas de control más estrictas y rápidas. Por otro lado, los Países Bajos, donde se encuentra Róterdam, tienen una situación de contaminación menos grave en comparación con Shanghai, lo que les permitió adoptar una perspectiva a largo plazo y centrarse en el desarrollo sostenible a largo plazo.

⁹³ 倪训鹏. (2021). 上海港船舶排放控制区政策实施和效果分析. 世界海运.

5.2 Comparación de emisiones de carbono

Según una investigación realizada por la organización Transport & Environment (T&E), el puerto de Róterdam es el puerto más contaminante de Europa en cuanto a emisiones de dióxido de carbono (CO₂), emitiendo anualmente 13.7 millones de toneladas de CO₂. Este nivel de emisiones es equivalente a la quinta fuente de emisiones de carbono más grande de Europa, la central eléctrica de carbón Weisweiler en Alemania. Esto también significa que las emisiones de carbono del puerto de Róterdam representan aproximadamente el 20% de las emisiones de carbono de todo el país de los Países Bajos, mientras que una única central eléctrica de carbón en los Países Bajos emite solo alrededor de una cuarta parte de esa cantidad de CO₂.

Figura 29 Emisiones de carbono dentro del puerto de Róterdam

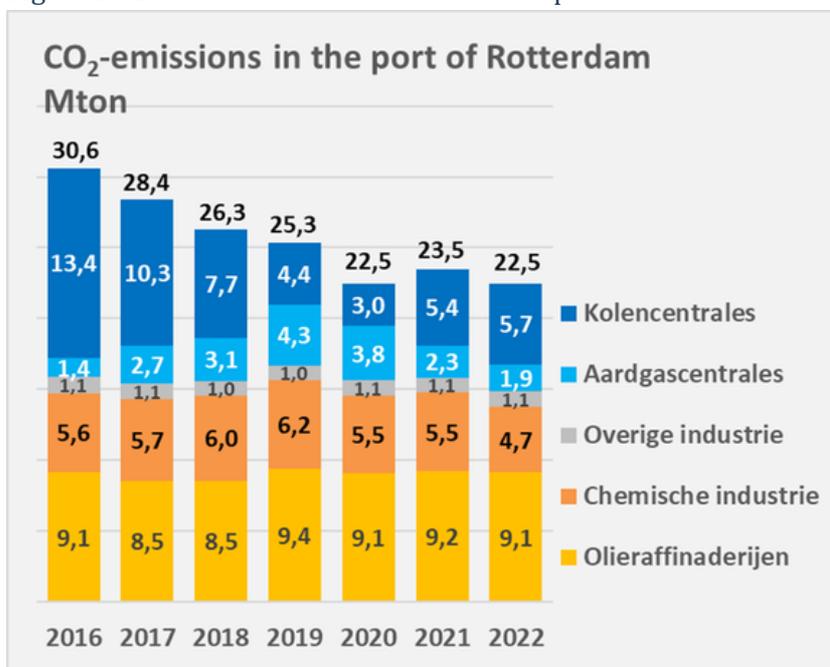


Figura 29 Emisiones de carbono dentro del puerto de Róterdam, fuente: Port of Rotterdam

En términos de emisiones de CO₂ per cápita, Róterdam tiene una cifra muy alta, con aproximadamente 29.8 toneladas de CO₂ por persona. Esto supera significativamente las cifras de emisiones per cápita de otras ciudades como Londres, que tiene alrededor de 9.6 toneladas de CO₂ por persona, y Shanghái, que tiene alrededor de 11.7 toneladas de CO₂ por persona. Róterdam se encuentra entre los principales emisores de CO₂ per cápita en el mundo.

En contraste, el puerto de Shanghái no ha revelado información sobre su emisión total de carbono, pero ha destacado que en el año 2020 logró

reducir su consumo de energía en un 16% por unidad de producción y disminuir su intensidad de emisión de carbono en un 20% por unidad de producción en comparación con el año 2010.

Figura 30 Proyecto Porthos



Figura 30 Proyecto Porthos, fuente: Port of Rotterdam

Sin embargo, es importante destacar que Rotterdam, a pesar de tener un número de emisiones de carbono llamativo, también está trabajando activamente para controlarlas. Entre 2016 y 2020, las emisiones de carbono de este puerto europeo más grande disminuyeron en al menos un 27%, mientras que durante el mismo período, las emisiones en los Países Bajos solo se redujeron en un 14%. En 1990, el puerto de Róterdam emitía más de 20 millones de toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera, y para 2016, esta cifra aumentó a más de 30 millones de toneladas. Sin embargo, para el año 2020, las emisiones habían vuelto a niveles cercanos a los de hace 30 años, a pesar de un aumento del 20% en el área del puerto y un aumento del 50% en el volumen de carga anual. Esto se debió a una serie de medidas, como el uso generalizado de energías renovables como la solar, eólica y biomasa (que superó el 40% en todo el país) en 2020, lo que permitió que las centrales eléctricas de Róterdam redujeran sus emisiones de carbono en 1.9 millones de toneladas. Ese mismo año, las centrales eléctricas a gas natural de Róterdam superaron por primera vez a las de carbón en emisiones de carbono. La demanda reducida de productos petroleros y químicos también llevó a una disminución de 1.1 millones de toneladas en las emisiones de carbono de la industria de Róterdam. Sin embargo, uno de los proyectos más destacados en Róterdam es el proyecto Porthos, que transporta el dióxido de carbono producido por empresas industriales dentro del puerto y lo almacena en campos de gas subterráneos vacíos en el Mar del Norte. Con este proyecto, se

capturan y almacenan permanentemente alrededor de 2.5 millones de toneladas de dióxido de carbono al año.⁹⁴

⁹⁴ Highlights: Top 12 Energy Transition Projects. (2023, August 24). Port of Rotterdam.

5.3 Uso de las tecnologías innovadoras

En los capítulos anteriores, hemos realizado una breve comparación de las tecnologías portuarias automatizadas y AGV (vehículos de guiado automático) en los puertos de Róterdam y Shanghái. Según esta información, podemos llegar a una conclusión inicial de que el puerto de Shanghái tiene un mayor espacio de aplicación de AGV y otras tecnologías relacionadas con la industria 4.0, siendo el puerto más grande y con las tecnologías más avanzadas. Por otro lado, el puerto de Róterdam tiene una mayor proporción de terminales portuarias automatizadas en comparación con el total del puerto. Todo esto se debe a los esfuerzos continuos de largo plazo que ha realizado el puerto de Róterdam en la búsqueda de la innovación tecnológica y su aplicación en el campo del desarrollo sostenible. A continuación, se presentará una comparación de la aplicación de la tecnología de alimentación eléctrica en estos dos puertos para mostrar las diferencias.

La tecnología de alimentación eléctrica en el contexto portuario se refiere al uso de equipos de alimentación eléctrica proporcionados por el puerto cuando los barcos están atracados en el muelle. Estos equipos se utilizan como fuente de energía para los barcos en lugar de los motores de combustión interna, lo que resulta en una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero, ruido y vibraciones en el agua. Además, esta tecnología crea un entorno más saludable para pasajeros, tripulación, trabajadores portuarios y residentes locales.

Las instalaciones de alimentación eléctrica constan de contenedores de 40 pies modificados que albergan equipos eléctricos capaces de suministrar energía eléctrica adecuada desde la red eléctrica pública hasta el barco. Un sistema de gestión de cables se encarga de transportar la electricidad físicamente desde el puerto hasta el barco mediante cables y enchufes. La operación de estos equipos se controla de forma remota, permitiendo que las grúas en el muelle se muevan hacia la nave para conectar el cable de alimentación eléctrica.

A pesar de que China comenzó a promover el uso de alimentación eléctrica en puerto para los buques desde 2010, debido a que un crucero de 12 MW que permanece atracado durante ocho horas puede emitir aproximadamente $11.8 \text{ kg/MWh} \times 8 \text{ h} \times 12 \text{ MW} = 1.1$ toneladas de NOx, y un portacontenedores de 3 MW que permanece atracado durante 8 horas también liberaría alrededor de $11.8 \text{ kg/MWh} \times 8 \text{ h} \times 3 \text{ MW} = 660 \text{ kg}$ de NOx, bajo la influencia de sistemas de alimentación eléctrica en puerto, estas

emisiones podrían teóricamente reducirse a niveles cercanos a cero durante este período.⁹⁵

Sin embargo, según el informe "Evaluación de la colaboración entre el aire y el clima en puertos típicos de China en 2020", la tasa de utilización de alimentación eléctrica por parte de los barcos de carga en 2020 varió entre un 3.8% y un 54.7%, lo que está muy por debajo de los objetivos establecidos. Según el estudio de este informe, uno de los problemas identificados radica en que, para que los buques se conecten a sistemas de alimentación eléctrica en puerto, se requiere modificar las instalaciones de suministro eléctrico en el puerto, y la tasa de adopción de estas modificaciones es significativamente baja. Además, se necesita personal técnico a bordo de los barcos para operar estos equipos, lo que ha llevado a un escaso interés en la tecnología en los puertos de China.⁹⁶

Por otro lado, la situación en Róterdam es precisamente lo contrario. Comenzó a promover el uso de equipos de alimentación eléctrica en puerto en los últimos años. A diferencia de China, en lugar de apresurarse a instalar equipos de alimentación eléctrica costosos, Róterdam reconsideró cuidadosamente las instalaciones de alimentación eléctrica para hacerlas más versátiles. Comenzaron promoviendo estas instalaciones principalmente en puertos de cruceros, ya que los cruceros tienen las emisiones más altas cuando están atracados y, al mismo tiempo, valoran mucho las emisiones bajas (por necesidades de marketing).

Figura 31 Sistema de alimentación eléctrica en el contexto portuario de Róterdam

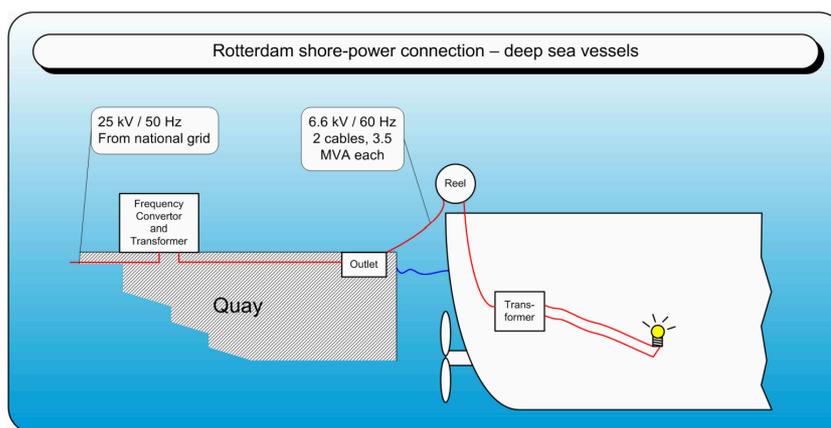


Figura 31 Sistema de alimentación eléctrica en el contexto portuario de Róterdam

⁹⁵ 曾伟良. (2016, November). *ABB岸电电源系统*. PGGI 中国.

⁹⁶ 刘蔚. (2022). 中国典型港口空气和气候协同力评价报告显示：岸电使用率低问题依然突出. 中国环境报.

5.4 Uso de energía renovable

Como se mencionó anteriormente, el tema de la energía renovable no se trata solo de la propia energía, sino que también incluye la mejora de la eficiencia energética y la reducción de los gastos energéticos. Por lo tanto, desde esta perspectiva, se compararán las fuentes de energía relacionadas con los dos puertos.

En el caso del puerto de Róterdam, su huella de carbono se redujo en un 47% entre 2019 y 2022, no necesariamente debido a una disminución real en las emisiones de carbono, sino gracias a acciones de compensación de carbono. Esto significa que compensaron suficientes emisiones de dióxido de carbono en otros lugares, principalmente mediante la expansión del uso de biocombustibles en los combustibles de los buques, fomentando el uso del transporte público y bicicletas en la zona portuaria, entre otras medidas. Lo más destacado en este aspecto es el uso extensivo de la energía del hidrógeno.⁹⁷ En la Cumbre Mundial del Hidrógeno de 2023, el puerto de Róterdam se unió a una colaboración bilateral entre Brasil y los Países Bajos, lo que resultó en una gran cantidad de proyectos de energía del hidrógeno relacionados con el desarrollo portuario, la logística portuaria y la producción de hidrógeno verde, incluyendo energía eólica marina. y producción de hidrógeno verde. Estos proyectos de energía de hidrógeno y biocombustibles no solo beneficiarán a los Países Bajos, sino que también tendrán un impacto en toda la Unión Europea, ya que incluyen la conexión entre Algeciras en España y el puerto de Róterdam para transportar hidrógeno limpio producido en España.⁹⁸

En el caso de la ciudad de Shanghái, se han implementado varias medidas para reducir el uso de combustibles fósiles en el transporte y promover fuentes de energía más limpias: Se ofrecen subsidios para vehículos eléctricos con el objetivo de incentivar su uso y reducir la dependencia de los combustibles fósiles en el transporte. Se han establecido zonas de bajas emisiones para restringir la circulación de vehículos que utilizan combustibles fósiles, siguiendo un enfoque similar al implementado en Madrid. Se han anunciado políticas de apoyo financiero para la energía solar distribuida hasta 2025, proporcionando subsidios para la electricidad generada a través de paneles solares. Se ha construido un edificio de oficinas que utiliza exclusivamente energía solar para la calefacción, contribuyendo a la limpieza de la calefacción en la región. Se ha establecido y expandido un proyecto de

⁹⁷ Port of rotterdam authority. (n.d.). *Annual Report 2022. 2023.*

⁹⁸ Cepsa. (2022, October 11). Cepsa and the Port of Rotterdam Join up to Create the First Green Hydrogen Corridor between the North and South of Europe. <https://www.cepsa.com/en/press/first-green-hydrogen-corridor>

energía eólica marina en la costa cercana a Shanghái, incluyendo áreas cercanas al puerto de Shanghái. Estas iniciativas están en línea con los objetivos de China de lograr la neutralidad de carbono. Estas medidas son parte de los esfuerzos de Shanghái para avanzar hacia un sistema de energía más sostenible y reducir las emisiones de carbono en línea con los objetivos de neutralidad de carbono de China.⁹⁹

De acuerdo con la comparación entre ambas ciudades, se puede observar que ambas están utilizando fuentes de energía más limpias y renovables en sus esfuerzos por lograr la neutralidad de carbono. Esto es de gran valor para alcanzar los objetivos de neutralidad de carbono, ya que, como se mencionó anteriormente, reducir las emisiones de carbono es una tarea muy desafiante, y compensarlas a través de proyectos de neutralidad de carbono resulta ser una estrategia más factible.

⁹⁹ Ren21. (n.d.). 中国的趋势 《2021 年城市可再生能源全球现状报告》包含的事实.

5.5 Certificaciones de puertos verdes

Cuando hablamos del concepto de certificación de puerto verde, no podemos dejar de mencionar la certificación ISO 14001. Esta es una norma publicada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) que se utiliza para demostrar la responsabilidad de la entidad evaluada en cuanto a la gestión ambiental. Algunos de los indicadores más importantes incluyen:

1. La organización debe definir, implementar y mantener objetivos y metas ambientales documentados, cuando sea factible. Estos objetivos y metas deben ser medibles y estar en línea con la política ambiental de la organización, comprometiéndose con la prevención de la contaminación, la mejora continua y el cumplimiento de requisitos legales y otros.

2. Al establecer y revisar los objetivos y metas, la organización debe considerar los requisitos legales y otros, así como sus aspectos ambientales significativos. También debe considerar enfoques tecnológicos alternativos, requisitos financieros, operativos y comerciales, así como las opiniones de las partes interesadas pertinentes.

3. La organización debe desarrollar, implementar y mantener uno o más programas para lograr sus objetivos y metas. Estos programas deben incluir:

a) La definición de las responsabilidades de las funciones y niveles pertinentes dentro de la organización para lograr los objetivos y metas.

b) Los métodos y plazos para alcanzar los objetivos y metas.¹⁰⁰

A través de estos indicadores, surge el concepto de puerto verde, como la certificación PERS de Ecoports que es comúnmente utilizada en los puertos europeos. Esta certificación se basa en la norma ISO 14001 pero se adapta a las características específicas de los puertos, y se centra en una serie de indicadores específicos para evaluar y certificar a los puertos en términos de sostenibilidad ambiental. La Organización de Puertos Marítimos de Europa (ESPO) utiliza el Método de Autodiagnóstico de Puertos (SDM, por sus siglas en inglés) y el Sistema de Revisión Ambiental de Puertos (PERS) para evaluar los logros de los puertos en cuanto a construcción ecológica. Los indicadores de evaluación abarcan cinco aspectos: gestión de la calidad del aire, eficiencia energética y cambio climático, gestión del ruido, gestión de residuos y gestión del agua.

Los puertos que desean participar en la evaluación primero deben someterse a la certificación SDM. Después de completar la certificación SDM,

¹⁰⁰ Jackson, S. L. (1997). The ISO 14001 implementation guide: creating an integrated management system (Vol. 3). John Wiley & Sons.

pueden solicitar la certificación PERS. El proceso de certificación SDM consta de tres pasos: cumplimentación de una lista de verificación, comparación y evaluación. Los puertos completan la lista de verificación SDM (una encuesta para identificar y evaluar los riesgos ambientales del puerto) y luego pueden comparar sus puntajes con los estándares europeos de desempeño ambiental. Esto les permite identificar sus ventajas y desventajas y determinar sus áreas de enfoque para futuras acciones. Finalmente, se someten a la evaluación y las recomendaciones de expertos.¹⁰¹

La certificación PERS es solicitada por el puerto y revisada por la sociedad de clasificación Lloyd's Register. Esta certificación tiene una validez de dos años. Como certificación de dos años de duración, el Puerto de Róterdam ya ha obtenido su quinta certificación en 2023.

Tabla 7 Indicadores de certificación de puerto verde.

Item	Contenido	Indicador
Valor	Estrategia	Planificación
		Propuesto
		Plan de trabajo
	Cultura	Cultura empresarial
		Formación
		Promoción
Acción	Protección ambiental	Prevención de contaminación
		Utilización de recursos y protección ambiental
	Ahorro energético y bajo contenido de carbono	Equipamiento principal
		Proceso de mano de obra
		Equipamiento auxiliar
		Consumo energético
Management	Sistema	Organismos administrativos
		Certificación
	Regimen	Evaluación del objetivos
		Seguimiento estadístico
		Limitaciones de incentivos
Efecto	Nivel	Protección ecoambiental
		Bajo emisiones

Tabla 7 Indicadores de certificación de puerto verde.

¹⁰¹ Darbra, R. M., Ronza, A., Casal, J., Stojanovic, T. A., & Wooldridge, C. (2004). The Self Diagnosis Method: A new methodology to assess environmental management in sea ports. *Marine Pollution Bulletin*, 48(5-6), 420-428.

En China, también se ha desarrollado un sistema de evaluación de puertos verdes basado en la certificación ISO 14001, que consta de cuatro ítems principales, siete contenidos y varios indicadores. Se utiliza para evaluar el desempeño de los puertos en diferentes indicadores y determinar si cumplen con los estándares de certificación de puerto verde. El puerto de Shanghái también ha obtenido con éxito esta certificación.¹⁰²

¹⁰² 绿色港口评价指南 Guidance for Green Port Evaluation. (2020). 中华人民共和国交通运输部.

5.6 Impacto de mercado y Responsabilidad social

Cuando hablamos de impactos en los mercados, debemos considerar dos aspectos: el tamaño del mercado en sí y la importancia del puerto en ese mercado. Como sabemos, ambos puertos ocupan posiciones de liderazgo en sus respectivos mercados, siendo el primero en el mundo y el primero en Europa. Primero, necesitamos comparar y entender su posición en términos de ubicación geográfica y cadena de suministro internacional.

En cuanto a su ubicación geográfica, ambos puertos se encuentran en puntos clave de entrada de importantes ríos en la región. Shanghái se ubica en la desembocadura del río Yangtsé, el río más largo de China, mientras que Róterdam se encuentra en la desembocadura del río Rin, y gracias a un canal artificial excavado, se conecta con la cuenca del Danubio hacia el este. Sin lugar a dudas, ambos puertos ocupan posiciones centrales en sus respectivos continentes, facilitando tanto el transporte marítimo como el fluvial.

Sus principales competidores, como Amberes y Ámsterdam para Róterdam, y Hong Kong y Cantón para Shanghái, también se benefician de ubicaciones estratégicas en la desembocadura de ríos importantes, aunque quizás con un alcance menor en términos de áreas fluviales interiores. Esto podría proporcionar algunas ideas sobre la selección de ubicaciones portuarias.

Figura 32 Róterdam y sus competidores principales,



Figura 32 Róterdam y sus competidores principales,
fuente: Croisieuropea

En cuanto a su posición en la cadena de suministro, el puerto de Róterdam está conectado a través de una extensa red de transporte interior con países y ciudades circundantes en Europa, lo que facilita el comercio internacional y la logística. Actúa como una puerta directa tanto de entrada para la Europa continental como de salida hacia el Reino Unido, América del Norte e incluso el Lejano Oriente. Gracias a Róterdam, el transporte de mercancías hacia el interior de Europa suele ser más rápido y eficiente que la descarga directa en las costas mediterráneas, especialmente cuando el destino de los contenedores se encuentra al norte de los Alpes.

Por otro lado, el puerto de Shanghái es el principal puerto de exportación de China y desempeña un papel crucial en la cadena de suministro internacional. Sirve como canal de exportación para la manufactura china y, al mismo tiempo, proporciona una vía conveniente para que productos de todo el mundo ingresen al mercado chino. Esto demuestra su papel fundamental en la conexión entre China y los mercados globales.

Esto también se refleja en el tamaño de sus respectivos mercados. Shanghái se encuentra respaldada por la segunda economía más grande del mundo, China, mientras que Róterdam está respaldada por la Unión Europea, que representa una sexta parte de la economía global. Ambos mercados tienen un peso significativo.

En cuanto a la responsabilidad social, como mencionamos anteriormente, el desarrollo sostenible no se limita únicamente a la protección del medio ambiente. El desarrollo social sostenible también es una parte importante del desarrollo sostenible, y a menudo está más relacionado con la comunidad local.

En primer lugar, en el plan de desarrollo sostenible de Puerto de Shanghái, entienden la responsabilidad social de una manera simplista como la proporción de actividades benéficas. En los asuntos relacionados con la responsabilidad social divulgados en el informe anual, han implementado un 'Plan Invierno Cálido' que involucra a cuatro escuelas primarias en Guizhou y Yunnan (Escuela Primaria de Recursos Hídricos de Guizhou, Escuela Primaria de Tongsun de Guizhou, Escuela Primaria de Banpo de Yunnan y Escuela Primaria de Buka de Yunnan). Esto incluye donaciones de ropa de invierno, pantalones de invierno, zapatos de invierno para los estudiantes, así como la provisión de desayunos nutritivos y donaciones de material educativo. Además, han donado más de 10 millones de yuanes para llevar a cabo actividades benéficas relacionadas con la reducción de la pobreza, como la ayuda a la industria, el empleo y la educación.

En cuanto al Puerto de Róterdam, ha seleccionado cinco de los diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas como sus

metas para el desarrollo sostenible. Estos cinco objetivos son: el objetivo de una buena salud y bienestar, el objetivo de energía asequible y no contaminante, el objetivo de trabajo decente y crecimiento económico, el objetivo de industria, innovación e infraestructura, y el objetivo de acción por el clima.

Figura 33 Objetivos sostenibles del puerto de Róterdam



Figura 33 Objetivos sostenibles del puerto de Róterdam, fuente: Port of Rotterdam

En cuanto a estos objetivos, los más relacionados con la responsabilidad social son los relacionados con el objetivo de una buena salud y bienestar. El Puerto de Róterdam considera que el valor económico y social de un puerto está estrechamente relacionado con la calidad del entorno habitable, que a su vez depende de factores como la biodiversidad local, los niveles de ruido, la seguridad del transporte marítimo y la calidad del aire. Por lo tanto, desde esta perspectiva, evalúa sus actividades en comparación con:

1. En términos de biodiversidad local, se asegura de que la diversidad de la vida silvestre esté protegida en el área del puerto, con la presencia de aves marinas, aves rapaces y especies de serpientes y sapos protegidas que habitan en el puerto.
2. En cuanto a la calidad del aire, la concentración media anual de dióxido de nitrógeno es de 23.1 microgramos por metro cúbico, cerca del promedio anual de 22.9 microgramos en 2020, y por debajo de los 26.2 microgramos en 2019, todo dentro de los límites legales, lo que demuestra la habitabilidad del puerto en términos de calidad del aire.
3. En lo que respecta a la seguridad del transporte marítimo, aunque no logró su objetivo de cero accidentes marítimos importantes en 2022 debido a un incidente, había tenido éxito en lograrlo en 2021, el año anterior.
4. Sin embargo, no pudo cumplir su objetivo en términos de control del ruido, ya que el Departamento de Protección Ambiental DCMR recibió 6417 quejas sobre ruido en Róterdam.¹⁰³

¹⁰³ Port of rotterdam authority. (n.d.). *Annual Report 2022*. 2023.

A pesar de no haber alcanzado completamente estos objetivos, Róterdam aborda esta cuestión desde una perspectiva más integral y considera que sus objetivos y resultados en términos de responsabilidad social tienen un valor y una relevancia significativos.

6. Conclusiones y Recomendaciones para el Desarrollo Logístico Sostenible

En un mundo en constante cambio, abordar operaciones más sostenibles se ha convertido en una prioridad para empresas y organizaciones debido al cambio climático, la escasez de recursos y la creciente complejidad de las cadenas de suministro globales. Este desafío no solo implica la reducción de las emisiones de carbono, sino también el uso más eficiente de los recursos, la mejora de la calidad ambiental y la promoción de la equidad social y el desarrollo sostenible. La industria logística, como uno de los impulsores clave del comercio mundial, tiene un gran impacto en el logro de objetivos de sostenibilidad.

En el estudio previo sobre los dos puertos más grandes del mundo, el puerto de Róterdam y el puerto de Shanghái, hemos examinado las perspectivas de aplicación de tecnologías innovadoras en el contexto del desarrollo sostenible y los modelos logísticos. En cuanto a la energía, como se mencionó en el artículo, la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables es fundamental para reducir las emisiones de carbono.

Aunque estos avances son significativos, aún no son suficientes. Sin embargo, han presentado una visión de lo que es posible.

En resumen, los principales puertos líderes, como el puerto de Róterdam y el puerto de Shanghái, han demostrado cómo la innovación en la tecnología logística y modelos logísticos pueden desempeñar un papel positivo en la reducción del impacto ambiental. Además, las medidas que se basan en la planificación de políticas locales y regionales para el desarrollo sostenible han demostrado ser factibles y efectivas. Aunque queda un largo camino por recorrer para alcanzar los objetivos de sostenibilidad y la neutralidad de carbono, este trabajo representa una recopilación de los esfuerzos así como de los próximos retos que podrían afrontar los dos puertos para reducir e incluso neutralizar el impacto de la logística en el medio ambiente.