



**Universidad
Europea**

**UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID
ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y
DISEÑO**

MASTER UNIVERSITARIO EN LOGÍSTICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**SISTEMA LOGÍSTICO AVANZADO 4.0 PARA LA
OPTIMIZACIÓN DINÁMICA DE INVENTARIOS Y
PLANIFICACIÓN DE RUTAS: UN ENFOQUE TEÓRICO
PARA LA MEJORA DE PROCESOS.**

Alumno: D. EDUAR JAVID APONTE PAREJO

Director: D. LUIS MIGUEL APARICIO ORTEGA

MARZO 2025

Sistema logístico avanzado 4.0 para la optimización
dinámica de inventarios y planificación de rutas:
Un enfoque teórico para la mejora de procesos.



Eduar Aponte Parejo

TÍTULO: SISTEMA LOGÍSTICO AVANZADO 4.0 PARA LA OPTIMIZACIÓN
DINÁMICA DE INVENTARIOS Y PLANIFICACIÓN DE RUTAS: UN ENFOQUE
TEÓRICO PARA LA MEJORA DE PROCESOS.

AUTOR: EDUAR JAVID APONTE PAREJO

DIRECTOR DEL PROYECTO: LUIS MIGUEL APARICIO ORTEGA

FECHA: 26 de MARZO de 2025

Eduar Aponte Parejo

Resumen general.

El presente trabajo de fin de máster tiene como objetivo desarrollar un planteamiento teórico sobre la implementación de un sistema logístico avanzado 4.0 (SLA 4.0) para la optimización dinámica de inventarios y la planificación de rutas en entornos logísticos modernos. A través de una revisión exhaustiva de la literatura y el análisis de casos de estudio, se examina el impacto de las tecnologías de la logística 4.0, como la inteligencia artificial, los gemelos digitales, el big data, el cloud computing y el edge computing, en la transformación digital, con el propósito de optimizar los procesos logísticos de la gestión de inventarios y la planificación de rutas.

El trabajo destaca cómo la combinación de estas herramientas puede mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y fomentar la sostenibilidad en la cadena de suministro. Además, se analizan los desafíos en su implementación, como la integración de datos, la ciberseguridad y las barreras económicas. Desde una perspectiva conceptual, se propone un modelo teórico del SLA 4.0 que busca transformar la gestión logística mediante la digitalización y la automatización, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). De esta manera, este trabajo ofrece una base teórica para futuras investigaciones y para organizaciones interesadas en adoptar soluciones avanzadas para la optimización de sus operaciones logísticas.

Palabras clave:

- Logística 4.0.
- Transformación digital.
- Sistema logístico avanzado 4.0.

Abstract.

The objective of this master's thesis is to develop a theoretical approach to the implementation of an advanced logistics system 4.0 (SLA 4.0) for the dynamic optimization of inventory management and route planning in modern logistics environments. Through an extensive literature review and the analysis of case studies, the impact of logistics 4.0 technologies such as artificial intelligence, digital twins, big data, cloud computing, and edge computing on digital transformation is examined, with the aim of optimizing logistics processes related to inventory management and route planning.

This study highlights how the integration of these technologies can enhance operational efficiency, reduce costs, and promote sustainability within the supply chain. Additionally, it analyzes the challenges associated with their implementation, including data integration, cybersecurity, and economic barriers. From a conceptual perspective, a theoretical model of SLA 4.0 is proposed, aiming to transform logistics management through digitalization and automation, aligning with the Sustainable Development Goals (SDGs). Thus, this research provides a theoretical foundation for future studies and serves as a reference for organizations seeking to adopt advanced solutions for optimizing their logistics operations.

Keywords:

- Logistics 4.0
- Digital transformation
- Advanced logistics system 4.0

Contenido.

Resumen general.....	3
Abstract.....	3
1. Introducción.....	8
1.1 Contexto y relevancia del tema.....	8
1.2. Problema de investigación.....	9
1.3. Objetivo del trabajo.....	10
1.3.1 Objetivo general.....	10
1.3.2 Objetivo específico.....	10
1.4. Justificación.....	10
2. Marco teórico.....	12
2.1. Logística 4.0: transformación digital en la cadena de suministro.....	12
2.1.1. Definición y evolución de la logística 4.0.....	12
2.1.2. Tecnologías en la logística 4.0: big data, IoT, cloud computing, blockchain y edge computing.....	14
2.1.3. Desafíos y oportunidades en la optimización de inventarios y rutas.....	16
2.2. Logística 4.0: gemelos digitales.....	18
2.2.1. Concepto y características de los gemelos digitales.....	18
2.2.2. Logística 4.0: gemelos digitales aplicables en la cadena de suministro, gestión de inventarios y rutas de transporte.....	19
2.2.3. Beneficios y desafíos de implementación de los gemelos digitales.....	20
2.3. Logística 4.0: inteligencia artificial.....	22
2.3.1. Modelos de predicción de demanda en logística y su impacto en las rutas de transporte.....	23
2.3.2. Softwares aplicables a la gestión de inventarios y rutas dinámicas.....	24
2.3.3. Limitaciones y factores clave para la optimización.....	26
2.4. Logística 4.0: integración tecnológica.....	27
2.4.1. Sinergia entre gemelos digitales e IA para la optimización de inventarios y rutas.....	28
2.4.2. Requisitos técnicos y de infraestructura.....	29
2.5. Logística 4.0: sostenibilidad y ODS.....	30
2.5.1. Principios de la sostenibilidad en la logística.....	30
2.5.2. Impacto de la optimización logística en los ODS.....	31
2.6. Logística 4.0 y computación cuántica.....	32
2.6.1 ¿Qué es la computación cuántica?.....	32
2.6.2 Aplicaciones de la computación cuántica en un SLA 4.0.....	32

Eduar Aponte Parejo

2.6.3 Beneficios y desafíos actuales de la computación cuántica.	33
3. Metodología de investigación	35
3.1. Tipo de estudio: investigación documental y revisiones bibliográficas.	35
3.2. Fuentes de información y criterios de selección.	35
3.3. Procedimiento de análisis.	36
4. Revisión de casos prácticos.	37
4.1. Introducción a los casos prácticos.	37
4.2 Caso práctico 1: Smart Warehouse de Tetra Pak en Asia-Pacífico gestionado por DHL Supply Chain.	37
4.3. Caso práctico 2: dm-drogerie markt.	38
4.4. Caso práctico 3. Optimización de rutas en UPS con ORION.	40
4.5. Lecciones aprendidas.	41
5. Sistema Logístico Avanzado 4.0 (SLA 4.0) para la optimización dinámica de inventarios y rutas.	44
5.1. Digitalización como base del SLA 4.0.	45
5.1.1 SLA 4.0: digitalización en la gestión de inventarios.	45
5.1.2 SLA 4.0: digitalización en la planificación inteligente de rutas.	46
5.1.3 SLA 4.0: digitalización de la interconexión entre la gestión de inventarios y la planificación de rutas.	48
5.2 Roadmap SLA 4.0: un camino estratégico hacia la transformación digital.	49
5.3. Ventajas y beneficios de implementación del SLA 4.0.	52
5.4. Desafíos en la implementación del SLA 4.0.	54
5.5. Optimización logística y desarrollo sostenible: La conexión entre el SLA 4.0 y los ODS	56
5.6. Fases de implementación y presupuesto del SLA 4.0.	59
5.6.1 Fases de implementación del SLA 4.0.	59
5.6.2 Presupuesto de implementación del SLA 4.0.	63
5.7. Computación cuántica y el futuro del SLA 4.0.	67
6. Memoria del proyecto.	69
7. Conclusiones y recomendaciones para futuros proyectos.	72
Referencias bibliográficas.	74

Índice de figuras

Ilustración 1 Mapa de calor almacén inteligente DHL.....	37
Ilustración 2 Steps for building digital Transformation Strategy	50
Ilustración 3 Fases de implementación SLA 4.0.....	63

Índice de tablas

Tabla 1 Evolución de la logística.....	14
Tabla 2 Ponderación por fase para cálculo del presupuesto.....	64
Tabla 3 Presupuesto estimado SLA 4.0	66

1. Introducción.

1.1 Contexto y relevancia del tema.

En la actualidad el mundo se encuentra en un estado de globalización impulsado por la conectividad que ofrece el Internet, la globalización cambió la manera en cómo se compete por los clientes, pasando de una competencia local a una competencia mundial donde se busca resaltar siendo atractivos para el mercado a la vez que los procesos se van optimizando, buscando así una reducción de costos y una mayor sostenibilidad. En este contexto, la logística se ha consolidado como una herramienta clave dentro de las organizaciones para el éxito de estas.

Aunque la logística permite volver más competitiva a una organización, su ejecución no es sencilla de realizar, afrontando diversos desafíos entre los cuales destacan:

- **Gestionar inventarios:** El saber cómo gestionar los inventarios no es una tarea fácil, más aún sabiendo que estos representan una inversión inicial significativa en productos terminados o en proceso, pero también generan costos asociados al almacenamiento, la gestión y la movilización. De acuerdo con IBM, la gestión eficiente de los inventarios tiene como objetivo “tener los productos correctos en el lugar adecuado y en el momento preciso” (IBM, 2021), así pues una correcta gestión de inventarios permite establecer cantidades y tiempos necesarios para satisfacer la demanda.
- **Planificar rutas:** Otro desafío logístico es la planificación de rutas, que resulta fundamental para optimizar la distribución de los productos, Nomadia Group empresa dedicada a la creación y gestión de comunidades digitales señala que “el objetivo principal de una ruta de entrega es optimizar la eficiencia de los desplazamientos y minimizar los costos relacionados con la logística” (Nomadia, 2023).

Adicionalmente, a los desafíos inherentes en la logística, la creciente volatilidad de la demanda y la complejidad de las cadenas de suministro globales dificultan la capacidad de establecer niveles óptimos de inventarios y planificación de rutas. En los últimos años, el comportamiento de los consumidores ha sufrido transformaciones significativas, “los clientes tienen acceso a diversas fuentes para investigar, junto con el desarrollo de aplicaciones especializadas que permiten comparar precios, atributos de los productos y/o servicios casi al instante” (Herrera, 2023). Este nuevo panorama ha incrementado la imprevisibilidad de la demanda, haciendo que los métodos tradicionales de planificación y gestión sean insuficientes para responder eficazmente a los retos actuales. Ante estos desafíos, ha surgido un concepto que, mediante la transformación digital, busca la optimización de procesos para hacer a las empresas más ágiles y competitivas, dicho concepto es la logística 4.0 (en el apartado 2.1 se ampliará la definición). Es importante destacar que la logística 4.0 se apoya en diversas tecnologías para lograr esta optimización, como la inteligencia artificial (IA) y los gemelos digitales, entre otras, que se posicionan como herramientas clave para optimizar los procesos logísticos.

Pero ¿qué es una IA? IBM afirma que la IA es “una tecnología que permite que las computadoras simulen la inteligencia y las capacidades humanas de resolución de problemas” (IBM, 2023). Por su parte, los gemelos digitales son definidos como “una representación virtual de un objeto o sistema diseñado para reflejar un objeto físico con precisión, el cual se actualiza a partir de datos en tiempo real y utiliza la simulación, el machine learning y el razonamiento para tomar decisiones” (IBM, 2021).

Eduar Aponte Parejo

En la logística 4.0, la IA se distingue por su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos de forma continua y en tiempo real, esto permite predecir la demanda con mayor precisión y ajustar las operaciones de inventarios a las fluctuaciones del mercado. De acuerdo con Prakash Venkata investigador publicado en la revista “Journal of Machine Learning for Healthcare Decision Support” los algoritmos de IA analizan datos históricos de ventas, tendencias de mercado y sentimientos en redes sociales para generar pronósticos precisos de la demanda futura (Venkata, 2021). Al incorporar esta capacidad de previsión de la demanda en los sistemas logísticos, las organizaciones pueden optimizar los niveles de inventario, prevenir el desabastecimiento y asegurar la disponibilidad de productos según las necesidades de los clientes. Además, como señala el mismo autor, la IA permite tomar decisiones informadas basadas en datos en tiempo real, ajustando dinámicamente los niveles de inventario para minimizar costos y maximizar la eficiencia (Venkata, 2021).

Por su parte, los gemelos digitales al ofrecer una representación dinámica de los espacios de almacenamiento y recursos logísticos facilitan la optimización del uso del espacio y la planificación eficiente de las operaciones logísticas para las organizaciones. Un ejemplo destacado es el caso del minorista alemán dm-drogerie markt, que utilizó gemelos digitales para optimizar la reposición de productos en más de 2.000 tiendas, esto incluyó la disposición de los estantes y la ubicación precisa de todos los productos, logrando combinar productos en palés mixtos de manera óptima y reducir costos operativos (Dohrmann, 2024).

Además de su impacto en los procesos logísticos para la gestión de inventarios, estas tecnologías impulsan la planificación y optimización de rutas de distribución. Los gemelos digitales permiten realizar una simulación a partir de la cual se evalúan las diferentes opciones de reparto en tiempo real, lo que facilita la selección de la ruta más eficiente, logrando aumentar la satisfacción del cliente y minimizando los costos operativos. Según DHL “la implementación de gemelos digitales para procesos específicos de la cadena de suministro puede reducir el costo, tiempo, recursos y desperdicios previamente incurridos al completar tareas” (Dohrmann, 2024).

La IA complementa esta capacidad mediante el análisis de datos históricos y en tiempo real, como patrones de tráfico o condiciones climáticas; al conectar la IA con bases de datos de herramientas como Google Maps que actualizan su información de manera constante, se puede identificar brechas en las horas pico, permitiendo que los transportes se desplacen más rápidamente y con menor riesgo de retrasos, esto no solo mejora los tiempos de entrega, sino que también optimiza el uso del espacio disponible en los vehículos de transporte, reduciendo costos operativos y emisiones de carbono, en un entorno empresarial cada vez más enfocado en la sostenibilidad, estas soluciones representan una ventaja competitiva.

Tanto la gestión de inventarios como la planificación de rutas son retos interconectados que requieren soluciones integrales para lograr una cadena de suministro eficiente y competitiva.

1.2. Problema de investigación.

La industria 4.0 se puede entender como una integración de tecnologías digitales en los procesos que genera una red inteligente de máquinas y personas buscando la optimización de estos mismos (Universidad Europea Online, 2023), la industria 4.0 ha traído consigo múltiples tecnologías y herramientas que han transformado diversos campos de la industria, incluida la logística, de esta manera la combinación de la logística y las tecnologías propias de la industria 4.0, dan consigo el origen de la logística 4.0, término que se encuentra siendo utilizado en una creciente cantidad de literatura y casos de uso que documentan un alto potencial en la optimización de las operaciones.

Eduar Aponte Parejo

Sin embargo, muchas empresas aún desconocen cómo se pueden aplicar estas tecnologías a sus casos particulares, la falta de comprensión sobre qué son estas herramientas, cómo funcionan y cuáles son sus beneficios para las organizaciones, plantea desafíos significativos, especialmente para aquellas empresas que enfrentan restricciones presupuestarias y logísticas.

Esto genera una importante brecha entre las organizaciones que pueden implementar estas soluciones tecnológicas y aquellas que no, ampliando cada vez más la diferencia en términos de competitividad y eficiencia operativa.

Bajo esta circunstancia, surge una pregunta fundamental: **¿Cómo se puede utilizar la logística 4.0 para optimizar la gestión de inventarios y la planificación de rutas?** La respuesta a esta pregunta no es sencilla, particularmente para empresas con recursos limitados o que no han explorado estas tecnologías previamente.

Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo central analizar cómo la implementación de un sistema logístico avanzado 4.0 (SLA 4.0) puede optimizar tanto la gestión de inventarios como la planificación de rutas. Para ello, se propone un enfoque teórico que integra diversas tecnologías propias de la logística 4.0, entendiendo el SLA 4.0 como una evolución de la logística inteligente. Esta última se define como aquella que “aprovecha las tecnologías digitales y la interconexión de dispositivos para mejorar y optimizar la cadena de suministro” (SimpliRoute, 2023). En este sentido, el SLA 4.0 no solo incorpora estas tecnologías, sino que también las interconecta de manera integral, permitiendo una mayor automatización, adaptabilidad y eficiencia en los procesos logísticos.

1.3. Objetivo del trabajo.

1.3.1 Objetivo general.

Analizar cómo un sistema logístico avanzado 4.0 (SLA 4.0) puede optimizar la gestión de inventarios y la planificación de rutas.

1.3.2 Objetivo específico.

- Identificar los principales retos que enfrentan las empresas en la gestión de inventarios y la planificación de rutas en entornos de logística moderna.
- Revisar la literatura académica y los casos de estudio más relevantes sobre la aplicación de tecnologías de la logística 4.0.
- Evaluar el impacto de las tecnologías en la gestión de inventarios y la planificación de rutas, considerando factores como la eficiencia, costos y sostenibilidad.
- Desarrollar un marco conceptual que integre componentes clave de un sistema de gestión de inventarios y planificación de rutas basado en logística 4.0.

1.4. Justificación.

En un entorno empresarial caracterizado por una creciente competitividad, volatilidad de la demanda y la necesidad de sostenibilidad, las organizaciones enfrentan desafíos cada vez más complejos en sus operaciones logísticas, la logística 4.0 ha nacido como un modelo transformador que hace uso de tecnologías avanzadas para volver más competitivas a las

Eduar Aponte Parejo

organizaciones, como indica Julieth Ballesteros: “Hoy en día uno de los factores más importantes en el mundo empresarial es el desarrollo de la logística interna basada en herramientas tecnológicas que ayudan a mejorar los procesos dentro de la cadena de suministros” (Ballesteros, 2016).

Sin embargo, la adopción de estas tecnologías no es uniforme, muchas empresas especialmente aquellas con limitaciones presupuestarias y logísticas, carecen del conocimiento y las herramientas necesarias para implementar estas soluciones de manera efectiva.

Este trabajo de investigación aborda lo que se puede considerar como una necesidad crítica si no se quiere entrar en un ciclo de obsolescencia, al proporcionar un entendimiento claro sobre cómo un sistema logístico avanzado 4.0 (SLA 4.0) puede transformar la gestión de inventarios y la planificación de rutas, mediante un enfoque teórico fundamentado en una revisión exhaustiva de la literatura y el análisis de casos de uso, este trabajo busca ofrecer una guía de prácticas y estrategias que permitan a las empresas superar las barreras actuales, esto no solo tiene implicaciones en términos de eficiencia operativa y reducción de costos, sino que también responde a la creciente presión por adoptar prácticas sostenibles en las cadenas de suministro.

La logística sostenible, definida como “aquella que apuesta por una última milla con menos impacto medioambiental, movilidad con energías renovables, centros de almacenaje que generen menos desechos y consuman menos energía, y envases ecológicos” (BBVA, 2024) se posiciona como una prioridad estratégica para las organizaciones en un mercado que exige que estas se enfoquen más en su responsabilidad ambiental.

La importancia de esta investigación se manifiesta tanto en el ámbito académico como en el empresarial. En el ámbito académico, contribuye al desarrollo de un marco conceptual que integra tecnologías avanzadas en la logística, abordando un área de creciente interés y proporcionando una base para futuras investigaciones. En el ámbito empresarial, los resultados de este trabajo pueden servir como referencia práctica para diseñar estrategias de implementación, permitiendo que las empresas aprovechen el potencial de estas herramientas en escenarios reales y mejoren su competitividad.

Además, la sostenibilidad y la eficiencia son temas centrales en las agendas corporativas y gubernamentales. Al explorar como un SLA 4.0, puede ayudar a las organizaciones a optimizar recursos, minimizar desperdicios y reducir el impacto ambiental, este trabajo se alinea con los objetivos globales de sostenibilidad y mejora continua. Esto cobra aún más relevancia en el contexto de la digitalización, donde, como señala la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) “el sistema logístico del futuro apunta a la interconectividad de la información, la optimización del tiempo y los recursos, con una fuerte inversión y desarrollo en innovación para mantener su competitividad” (Pérez, Barleta, & Sánchez, 2020).

Finalmente, este proyecto no solo responde a las necesidades actuales, sino que también anticipa las demandas futuras de un mercado que evoluciona rápidamente hacia la digitalización y la sostenibilidad, proporcionando a las empresas herramientas y conocimientos clave para adaptarse a un entorno dinámico y altamente competitivo.

2. Marco teórico.

Como se mencionó en el apartado 1.2, un sistema logístico avanzado (SLA) es aquel que, mediante la implementación de tecnologías avanzadas, busca optimizar los procesos logísticos. En el presente trabajo, se abordará el SLA 4.0, destacando cómo el uso de tecnologías propias de la logística 4.0 impulsa una transformación digital en búsqueda de la optimización en la gestión de inventarios y la planificación de rutas.

La transformación digital ha revolucionado diversos sectores, incluyendo la logística, de acuerdo con Valdés y Perez: “Transformación digital se refiere a la materialización de cambios en los procesos existentes, para hacerlos más eficientes, mejorando la toma de decisiones a partir de los grandes volúmenes de información relevante que las nuevas tecnologías disponibles hacen factibles de gestionar” (Valdés & Pérez, 2020). En un mundo donde las cadenas de suministro son cada vez más complejas y globalizadas surge la necesidad de adoptar herramientas tecnológicas que permitan enfrentar los desafíos de eficiencia, sostenibilidad y competitividad.

El objetivo de este marco teórico es establecer las bases conceptuales y técnicas necesarias para comprender cómo las tecnologías de la logística 4.0, en particular los gemelos digitales y la inteligencia artificial, están redefiniendo procesos como la gestión de inventarios y la planificación de rutas. Asimismo, se analizarán tecnologías fundamentales para el correcto funcionamiento de estas herramientas, especialmente aquellas relacionadas con la recopilación de datos, el almacenamiento y la seguridad de la información, como big data, cloud computing, IoT, blockchain y edge computing.

Además, se explorará una tecnología emergente con un gran potencial para el SLA 4.0: la computación cuántica. A pesar de estar todavía en desarrollo, esta tecnología promete aportar un valor significativo al mejorar la capacidad de procesamiento y optimización en tiempo real, facilitando la toma de decisiones rápidas y precisas en entornos logísticos complejos.

2.1. Logística 4.0: transformación digital en la cadena de suministro.

La logística 4.0 representa una evolución en la gestión de la cadena de suministro, al caracterizarse por la incorporación de tecnologías digitales avanzadas, buscando transformar procesos logísticos tradicionales en sistemas inteligentes e interconectados que promuevan la eficiencia, la sostenibilidad y la flexibilidad para adaptarse a un entorno globalizado y dinámico, abordando no solo los desafíos actuales de las cadenas de suministro, sino que también impulsando la innovación, permitiendo a las empresas responder proactivamente a las demandas del mercado.

2.1.1. Definición y evolución de la logística 4.0.

La logística 4.0 es un concepto derivado de la cuarta revolución industrial, también conocida como Industria 4.0. Este término fue utilizado por primera vez en la feria de Hannover en 2011 y popularizado posteriormente en 2016 por Klaus Schwab, fundador del Foro Económico Mundial, a través de su libro “The Fourth Industrial Revolution”, aunque los términos Industria 4.0 y cuarta revolución industrial suelen usarse sin distinción, es importante diferenciarlos.

La Industria 4.0, según el Foro Económico Mundial (FEM), se refiere a “sistemas de producción “inteligentes” y conectados que están diseñados para detectar, predecir e interactuar con el mundo físico, con el fin de tomar decisiones que apoyen la producción en

Eduar Aponte Parejo

tiempo real” (World Economic Forum, 2022), por su parte, IBM describe este concepto como la transformación digital del sector manufacturero, que ofrece toma de decisiones en tiempo real, mayor productividad, flexibilidad y agilidad (IBM, 2021).

En cambio, la cuarta revolución industrial tiene un alcance más amplio, abarcando la transformación digital de toda la sociedad, incluyendo sectores de servicios y gobiernos. Como indica el FEM: “Redefine la relación entre tecnología y sociedad, explorando fronteras como la edición genómica y la inteligencia artificial” (World Economic Forum, 2016).

Aunque ambos términos están interrelacionados, la Industria 4.0 se centra específicamente en la digitalización del sector industrial y la creación de fábricas inteligentes, mientras que la cuarta revolución industrial abarca una perspectiva más global.

Al centrarse en la logística 4.0 se puede decir que “no es una revolución en las técnicas de gestión de la cadena de valor, sino el nexo de esta última con las nuevas tecnologías y la mejora que en los problemas tradicionales asociados, pueden darnos estos avances” (González, 2020). Cabral Filho afirma que la logística 4.0 es una disciplina que transforma digitalmente todas las etapas de la cadena de suministro, desde la adquisición de materias primas hasta la entrega al cliente final, mediante tecnologías como la inteligencia artificial, el IoT, el análisis de datos en tiempo real y la robótica (Cabral Filho, 2023).

Pero la logística al igual que las sociedades ha ido evolucionando, a continuación se presenta una breve línea del tiempo de la logística, pasando desde sus raíces militares en la antigüedad hasta el siglo XXI:

Período	Suceso clave	Descripción
Siglo VII a.C.–II d.C.	Orígenes en el mundo militar.	Nace la logística en el ámbito militar con el “logístico” griego, encargado de calcular suministros, y el “logista” romano, responsable de abastecer a las tropas.
Siglos XIII-XV	Expansión del comercio y rutas comerciales.	Con la Ruta de la Seda y el auge de las ciudades comerciales europeas, la logística comienza a jugar un papel clave en el transporte de bienes entre Asia y Europa.
Siglo XV-XVII	Era de la navegación y exploraciones.	La navegación marítima impulsa avances logísticos, con la planificación de rutas transoceánicas y el establecimiento de colonias.
Siglo XVIII	Revolución industrial y avances en transporte.	La revolución industrial introduce sistemas de producción en masa, aumentando la necesidad de almacenamiento y distribución eficiente.
Siglo XIX – Principios Siglo XX	Expansión ferroviaria y comercial.	Crecimiento del comercio internacional con la industrialización. Además, se comienza con el desarrollo de los primeros sistemas mecanizados de almacenamiento en grandes industrias.
Década de 1950	Logística militar consolidada.	La logística se mantiene principalmente en el ámbito militar, enfocada en el suministro de tropas. Sin embargo, se inicia la transición de la logística militar a la empresarial.

Eduar Aponte Parejo

Décadas de 1960 y 1970	Nacimiento de la logística empresarial.	Surgimiento de la logística como disciplina empresarial debido al aumento de los costos logísticos, especialmente tras la crisis del petróleo de 1973.
Décadas de 1960 y 1970	Impacto del JIT.	Adopción del modelo de producción Just in Time (JIT) en la industria automotriz, impulsando la eficiencia y reduciendo los costos.
Principios de 1980	Logística integral.	La logística se concibe como un concepto más amplio, integrando aprovisionamiento, producción y distribución.
Década de 1990	Globalización y externalización.	La logística se vuelve internacional y compleja debido a la globalización y la externalización de la producción.
Siglo XXI	Revolución digital.	Las nuevas tecnologías de la información y la comunicación transforman la logística, permitiendo una mayor visibilidad y eficiencia.

Nota: Elaboración propia con la información obtenida de (VIU ROIG & CASTILLO, 2022) y (OnTrack, 2024)
Tabla 1 Evolución de la logística.

2.1.2. Tecnologías en la logística 4.0: big data, IoT, cloud computing, blockchain y edge computing.

Como se ha mencionado anteriormente, la logística 4.0 se sustenta en una serie de tecnologías clave que permiten la transformación digital de la cadena de suministro. En este apartado, se destacan las tecnologías que diversos autores consideran como las principales, dejando de lado los gemelos digitales y la inteligencia artificial, ya que estas tendrán sus propios apartados, los cuales serán el 2.2 y 2.3 respectivamente:

- **Big data:** Google define el big data como “conjuntos extremadamente grandes y diversos de datos estructurados, no estructurados y semiestructurados que siguen creciendo exponencialmente a lo largo del tiempo” (Google, 2022). Sin embargo, los datos por sí solos no muestran información relevante sobre todo si no están completamente estructurados, para que estos datos sean útiles, es necesario analizarlos, es así como surge el análisis del big data.

El análisis del big data, según IBM, es el proceso de transformar grandes volúmenes de datos crudos en información útil, todo esto mediante técnicas avanzadas, donde se identifican patrones, se buscan tendencias y relaciones ocultas en los datos, permitiendo a las organizaciones tomar decisiones más informadas y estratégicas (Mucci & Stryker, ¿Qué es el análisis de big data?, 2024). En la logística 4.0, el análisis del big data permite tomar decisiones de manera más informada con el fin de optimizar de manera integral la cadena de suministro, desde la previsión de la demanda hasta la entrega final.

- **Internet de las cosas (IoT):** Se define como “la red colectiva de dispositivos conectados y a la tecnología que facilita la comunicación entre los dispositivos y la nube, así como entre los propios dispositivos” (Amazon, 2022). De manera complementaria, IBM describe el IoT como “una red de dispositivos físicos,

vehículos y otros objetos integrados con sensores, software y conectividad de red, lo que les permite recopilar y compartir datos” (IBM, 2023).

Cabral Filho afirma que esta tecnología impulsa la transformación digital de la logística, permitiendo el monitoreo en tiempo real de activos y la optimización de procesos, resultando en mayor eficiencia, reducción de costos y mejora de la experiencia del cliente (Cabral Filho, 2023), por consiguiente, la interconexión que ofrece IoT posibilita una recopilación constante de datos, mejorando la visibilidad y el control de la cadena de suministro, permitiendo el monitoreo en tiempo real de activos y la optimización de procesos.

- **Cloud computing:** Se puede definir como “acceso bajo demanda a recursos de computación (servidores físicos o virtuales, almacenamiento de datos, capacidades de red, herramientas de desarrollo de aplicaciones, software, herramientas analíticas con IA y mucho más) a través de Internet con precios de pago por uso” (Susnjara & Smalley, 2024).

En la logística 4.0, el uso de la nube permite centralizar y analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real, facilitando la toma de decisiones informada y la coordinación eficiente entre los diferentes actores de la cadena de suministro. Esto es esencial para gestionar de manera óptima los inventarios, las rutas y los niveles de demanda.

- **Blockchain:** De acuerdo con Amazon, el blockchain consiste en una base de datos avanzada que permite compartir información de forma transparente y segura dentro de una red, creando un registro inmutable y cronológico de transacciones. Su diseño impide modificaciones no autorizadas y garantiza la coherencia de la información. (Amazon, 2023).

Al poder garantizar la transparencia y seguridad de los datos, la implementación del blockchain en la logística 4.0 juega un papel crucial en la gestión de la cadena de suministro, evitando fraudes y errores que puedan ser generados por datos con baja fiabilidad.

- **Edge computing:** El edge computing distribuye el procesamiento de datos cerca de su origen, en dispositivos IoT o servidores locales, con esta proximidad se reduce la latencia, se optimiza el ancho de banda y se agiliza la obtención de información, potenciando aplicaciones empresariales que requieren respuestas rápidas y eficientes. (IBM, 2023).

La latencia en la red se ha de entender como el retraso en la transmisión de datos, el objetivo siempre ha de ser una latencia baja, ya que esta es crucial para operaciones eficientes y aplicaciones de alto rendimiento. Por su parte las latencias altas degradan el rendimiento y pueden causar errores, afectando la productividad empresarial. (Amazon, 2022)

En el ámbito de la logística 4.0 contar con la capacidad de tener la información disponible de manera inmediata con una baja latencia, es crucial porque permite procesar datos en tiempo real directamente en los dispositivos ubicados en almacenes o centros de distribución, mejorando la trazabilidad y la respuesta inmediata ante cambios en la demanda o interrupciones en las rutas.

Eduar Aponte Parejo

De manera general se puede ver cómo estas tecnologías desempeñan un papel fundamental en la transformación digital de la cadena de suministro, permitiendo la integración eficiente y el análisis avanzado de datos para optimizar los procesos logísticos.

El big data facilita la toma de decisiones informadas mediante el análisis de grandes volúmenes de datos, identificando patrones y tendencias ocultas que mejoran la previsión de la demanda y la planificación de rutas, por su parte el IoT impulsa la conectividad y monitoreo en tiempo real de activos logísticos, aumentando la visibilidad y control sobre los procesos.

Asimismo, el cloud computing permite centralizar y analizar datos en tiempo real, facilitando la coordinación entre los distintos actores de la cadena de suministro y optimizando la gestión de inventarios y rutas, esta capacidad se ve complementada con el edge computing, al permitir procesar los datos cerca de su origen, reduciendo la latencia y permitiendo respuestas rápidas a cambios en la demanda o interrupciones en las rutas.

El poder crear una sinergia entre estas tecnologías es esencial para el desarrollo de un SLA 4.0, ya que garantiza una gestión ágil, flexible y eficiente de la cadena de suministro, a la vez que permite incrementar la capacidad de adaptación frente a los desafíos actuales del entorno logístico global.

De igual manera, al integrar el blockchain con otras tecnologías clave, como IoT y big data, un SLA 4.0 puede mejorar significativamente la trazabilidad, seguridad y eficiencia en la gestión de inventarios, transporte y procesos logísticos, asegurando una cadena de suministro ágil y confiable.

2.1.3. Desafíos y oportunidades en la optimización de inventarios y rutas.

Para establecer los desafíos y oportunidades en la optimización de inventarios y rutas, es importante comenzar definiendo el concepto de optimización. Según la Real Academia Española optimizar significa “buscar la mejor manera de realizar una actividad” (RAE, 2020). Al buscar una mejor manera de realizar procesos de manera constante, se asocia la optimización a la mejora continua, principio que enfrenta retos importantes en el contexto de la logística 4.0, aunque también ofrece oportunidades significativas.

Desafíos de la logística 4.0

1. **Barreras técnicas y tecnológicas:** La adopción de tecnologías avanzadas no es uniforme en todas las cadenas de suministro. Según una investigación realizada por Malagón y Orjuela, la escasez de estas tecnologías genera una brecha digital entre empresas y regiones (Malagon & Orjuela, 2023). Además, la integración de sistemas plantea un desafío significativo, como señala DHL: “Garantizar que todos los componentes logísticos trabajen juntos sin problemas es un reto complejo” (DHL, 2023).
2. **Barreras financieras:** La implementación de logística 4.0 requiere una inversión considerable. Actualizar hardware, software y capacitar a los empleados puede ser costoso, además de los costos de mantenimiento continuo y cumplimiento de nuevas regulaciones (DHL, 2023).
3. **Barreras legales y ciberseguridad:** La falta de estándares internacionales y las lagunas legales dificultan la interoperabilidad de los sistemas (Malagon & Orjuela, 2023).

Asimismo, la interconexión de dispositivos en la logística 4.0 aumenta el riesgo de ciberataques, exponiendo datos sensibles de la cadena de suministro (DHL, 2023).

4. **Barreras sociales:** La automatización genera preocupación por la pérdida de empleos y resistencia al cambio entre los empleados. Esto requiere programas de capacitación y desarrollo de habilidades para facilitar la transición a un entorno digital (Malagon & Orjuela, 2023).

Oportunidades de la logística 4.0

1. Eficiencia y productividad.

- a. **Automatización de procesos:** La implementación de robots y vehículos autónomos reduce tiempos y errores en operaciones de almacenaje y transporte (Universidad Europea, 2024).
- b. **Optimización de rutas:** El uso de inteligencia artificial permite calcular rutas más eficientes, reduciendo costos y tiempos de entrega (Universidad Europea, 2024).
- c. **Gestión de inventarios:** El seguimiento en tiempo real y la analítica de datos optimizan los niveles de inventario, evitando roturas de stock y excesos (Universidad Europea, 2024).

2. Transparencia y trazabilidad.

- a. **Seguimiento en tiempo real:** Los dispositivos IoT proporcionan visibilidad total en la cadena de suministro (Universidad Europea, 2024).
- b. **Mayor confianza del cliente:** La trazabilidad fomenta la confianza del cliente al permitirle rastrear los productos desde su origen hasta su destino (Universidad Europea, 2024).
- c. **Gestión de riesgos:** La trazabilidad facilita la detección y resolución de problemas en la cadena de suministro, minimizando pérdidas (Universidad Europea, 2024).

3. Adaptabilidad y flexibilidad.

- a. **Respuesta rápida a la demanda:** La capacidad de analizar datos en tiempo real permite ajustar las operaciones de manera inmediata ante cambios en la demanda (Universidad Europea, 2024).
- b. **Mayor flexibilidad:** La digitalización permite a las empresas responder a las necesidades cambiantes del mercado con mayor agilidad (Universidad Europea, 2024).

4. Sostenibilidad.

- a. **Reducción de emisiones:** La optimización de rutas y la disminución de desplazamientos en vacío contribuyen a reducir la huella de carbono (Universidad Europea, 2024).

- b. **Gestión sostenible de recursos:** El seguimiento en tiempo real fomenta un uso más eficiente de los recursos, reduciendo el desperdicio (Universidad Europea, 2024).

5. Competitividad.

- a. **Mejora de la experiencia del cliente:** La eficiencia, transparencia y flexibilidad mejoran significativamente la satisfacción del cliente (Universidad Europea, 2024).
- b. **Diferenciación:** Las empresas que adoptan la logística 4.0 pueden destacarse al ofrecer servicios más rápidos, fiables y personalizados (Universidad Europea, 2024).
- c. **Mayor resiliencia:** Las cadenas de suministro se vuelven más adaptables frente a cambios y perturbaciones (Universidad Europea, 2024).

La logística 4.0 presenta retos significativos relacionados con barreras tecnológicas, financieras, legales y sociales. Sin embargo, las oportunidades que ofrece en términos de eficiencia, sostenibilidad y competitividad superan ampliamente estos desafíos. Al adoptar tecnologías digitales, las empresas pueden optimizar sus operaciones de inventarios y rutas, mejorar la satisfacción del cliente y construir cadenas de suministro resilientes y sostenibles.

2.2. Logística 4.0: gemelos digitales.

La logística moderna busca constantemente herramientas que mejoren la visibilidad, el control y la optimización de procesos, los gemelos digitales surgen como una tecnología disruptiva, al ofrecer capacidades para modelar, simular y optimizar operaciones logísticas en tiempo real en un escenario virtual.

Esta perspectiva es respaldada por Ramón García, director general del Centro Español de Logística (CEL), quien señala que “desde la formación hasta la simulación de almacenes, los gemelos digitales abren un mundo de posibilidades para la logística” (García, 2024). Por su parte Diogo Aita escritor del boletín FAL para la CEPAL destaca que los gemelos digitales se han vuelto indispensables para las empresas, permitiendo una gestión más eficiente de sus operaciones y una mejora significativa en la productividad (Aita, 2022).

2.2.1. Concepto y características de los gemelos digitales

Los gemelos digitales, como se mencionó anteriormente, son representaciones virtuales de objetos, procesos o sistemas físicos que permiten simular su comportamiento en tiempo real. Es importante destacar que un gemelo digital no es lo mismo que una simulación, esta afirmación se ve respalda por IBM, el cual explica que “la diferencia entre gemelo digital y simulación es en gran medida una cuestión de escala: mientras que una simulación generalmente estudia un proceso en particular, un gemelo digital puede ejecutar cualquier número de simulaciones útiles para estudiar múltiples procesos” (IBM, 2021).

Por lo tanto, los gemelos digitales pueden considerarse como un entorno virtual dinámico que posibilita la simulación de múltiples procesos o sistemas simultáneamente, esta capacidad es posible gracias al uso e integración de datos.

Eduar Aponte Parejo

Para construir un gemelo digital es fundamental aprovechar todas las fuentes de datos disponibles, empleando tecnologías como big data, IoT, blockchain y machine learning para crear modelos predictivos precisos que simulen el comportamiento del sistema en diversos escenarios (Aita, 2022).

Sin embargo los datos utilizados no deben ser únicamente históricos, para que los gemelos digitales funcionen eficazmente, es imprescindible el uso de sensores que monitoreen en tiempo real el estado del sistema, proceso u objeto representado. Amazon señala que los sensores actúan como los “ojos y oídos” del gemelo digital, proporcionando un flujo constante de datos que alimenta el modelo virtual (Amazon, 2022). Esta conexión bidireccional entre el mundo físico y digital garantiza una representación actualizada y precisa del modelo digital, lo que facilita la toma de decisiones basadas en datos confiables.

Además, los gemelos digitales se apoyan en varias tecnologías clave de la logística 4.0, entre las cuales destacan:

- **IoT (internet de las cosas):** Permite la conexión de equipos y la transmisión de datos desde los sensores hacia un software que analiza y actualiza el comportamiento del mundo físico en su representación virtual en tiempo real (Amazon, 2022).
- **IA (inteligencia artificial):** A través de la IA y su rama específica, el machine learning, los gemelos digitales tienen la capacidad de procesar grandes volúmenes de datos rápidamente, identificar patrones y simular escenarios futuros para optimizar actividades y procesos (Amazon, 2022).

Con esta información se puede indicar que las características principales de los gemelos digitales son las siguientes:

- **Interconexión en tiempo real:** Se actualizan constantemente con datos de su contraparte física mediante tecnologías como el IoT.
- **Capacidad de simulación:** Permiten probar diferentes escenarios y predecir resultados antes de su implementación en el mundo físico.
- **Integración con tecnologías avanzadas:** Incorporan analítica de datos, aprendizaje automático y sistemas de IA para optimizar procesos.
- **Representación multidimensional:** No solo replican el estado actual de un sistema, sino que también integran datos históricos y proyectivos.
- **Escalabilidad:** Pueden aplicarse desde unidades operativas pequeñas hasta sistemas logísticos complejos.

2.2.2. Logística 4.0: gemelos digitales aplicables en la cadena de suministro, gestión de inventarios y rutas de transporte.

Los gemelos digitales han demostrado ser una herramienta transformadora en diversas áreas de la logística, revolucionando la manera en que se gestionan los recursos y se toman decisiones. A continuación, se destacan algunas de sus principales aplicaciones:

- **Cadena de suministro:** Los gemelos digitales están redefiniendo la gestión de la cadena de suministro al mejorar la precisión de las previsiones de demanda,

Eduar Aponte Parejo

simular escenarios diversos y optimizar el ciclo de vida de los productos, todo esto al integrar datos de ventas, mercados y factores medioambientales (Sengupta, 2024), la mejora de las previsiones hace que las empresas puedan tomar decisiones más informadas, lo que contribuye a reducir costos y minimizar riesgos.

Se puede decir que “la capacidad de simular diferentes escenarios y prever el impacto de diversas decisiones estratégicas permite una gestión de la cadena de suministro más proactiva y basada en datos, lo cual es vital en un entorno globalizado y volátil” (Castillo, Huamanchumo, & Lecca, 2024). De esta manera, los gemelos digitales potencian la resiliencia y adaptabilidad en un mercado cada vez más competitivo.

- **Gestión de inventarios:** Con capacidades como la previsión de la demanda y una visualización constante del estado del inventario, las empresas pueden anticiparse a cambios en el mercado y ajustar sus operaciones para maximizar el uso del espacio de almacenamiento y evitar el exceso o la falta de stock, esto no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también permite a las organizaciones enfocarse más en brindar un servicio excepcional a los clientes (Sengupta, 2024).

De manera resumida los gemelos digitales mediante algoritmos avanzados de integración, lectura e interpretación de datos ofrecen una visión integral y en tiempo real de los inventarios, permitiendo a las empresas optimizar estrategias de gestión de inventarios, reducir costos operativos y mejorar la satisfacción del cliente al garantizar la disponibilidad de productos.

- **Rutas de transporte:** En el ámbito del transporte “los gemelos digitales permiten simular la operación de una flota de camiones, optimizando rutas, monitoreando el estado de los vehículos y anticipando posibles fallos” (Arangoya, 2024), estos sistemas consideran múltiples factores como volumen de carga, costos operativos y condiciones del tráfico, así al poder optimizar las rutas permitirá a las empresas reducir sus costos de transporte, una mayor eficiencia en los repartos, adicionalmente, los gemelos digitales proporcionan una visibilidad completa de los productos a lo largo de toda la cadena de suministro, desde su origen hasta su destino final; al poder tener una visión completa del transporte se facilita una cadena de suministro circular que promueve la sostenibilidad y minimiza el desperdicio (Sengupta, 2024).

2.2.3. Beneficios y desafíos de implementación de los gemelos digitales.

Replicar el mundo físico en una realidad virtual es un proceso complejo que presenta desafíos técnicos y logísticos significativos. La implementación de los gemelos digitales no solo requiere superar obstáculos técnicos, sino también manejar la integración de datos y garantizar la seguridad de la información. Sin embargo, los beneficios que esta tecnología aporta pueden llegar a justificar el esfuerzo de su implementación. A continuación, se presentan los principales desafíos y ventajas de su implementación:

Desafíos de implementación.

1. **Barreras técnicas:** La implementación de gemelos digitales demanda tecnologías avanzadas que no siempre se encuentran disponibles en las organizaciones, de acuerdo con un reporte presentado por el TechLab del Banco Interamericano de

Eduar Aponte Parejo

Desarrollo (BID), “La diversidad tecnológica en los entornos de TI representa un obstáculo significativo para la integración de gemelos digitales” (Latorre, Rego, De Leo, & Gutierrez, 2024), adicionalmente si se desea implementar los gemelos digitales se deben considerar inicialmente dos aspectos claves para una integración exitosa:

- **Diversidad tecnológica:** La coexistencia de sistemas legados (software o hardware obsoleto que se sigue utilizando) y sistemas modernos exige soluciones personalizadas, entre las soluciones se pueden encontrar las APIs y los Middleware, con estas herramientas se busca garantizar la interoperabilidad (Latorre, Rego, De Leo, & Gutierrez, 2024). Esta interoperabilidad se logra gracias a que tanto las APIs como el Middleware son componentes clave en la arquitectura de software moderno.

-APIs: “mecanismos que permiten a dos componentes de software comunicarse entre sí mediante un conjunto de definiciones y protocolos” (Amazon, 2022).

-Middleware: “software con el que las diferentes aplicaciones se comunican entre sí” (Amazon, 2022).

- **Pruebas rigurosas:** Es necesario realizar pruebas extensivas para asegurar la estabilidad y funcionalidad del sistema integrado (Latorre, Rego, De Leo, & Gutierrez, 2024).

2. **Integración de datos:** La calidad y consistencia de los datos son fundamentales para que un gemelo digital sea eficaz, sin datos precisos y actualizados, el modelo pierde su utilidad. TechLab del BID destaca que “gestionar grandes volúmenes de datos es crucial para garantizar la precisión y utilidad del gemelo digital” (Latorre, Rego, De Leo, & Gutierrez, 2024), sin embargo, no resulta nada sencillo gestionar grandes volúmenes de datos, ya que dicha gestión trae desafíos como:

- **Almacenamiento y escalabilidad:** Se debe contar con sistemas capaces de albergar y manejar grandes volúmenes de datos de forma eficiente. (Latorre, Rego, De Leo, & Gutierrez, 2024).
- **Procesamiento seguro:** Garantizar la protección y precisión de los datos en tiempo real. (Latorre, Rego, De Leo, & Gutierrez, 2024).

3. **Seguridad de la información:** El manejo de datos en tiempo real incrementa el riesgo de ciberataques y pérdida de información sensible. En el contexto de la logística 4.0, la seguridad de los datos es fundamental, de acuerdo con el TechLab del BID, “la seguridad de los datos es crucial debido a la naturaleza confidencial de los gemelos digitales” (Latorre, Rego, De Leo, & Gutierrez, 2024).

Para mitigar riesgos, diversos autores indican que se deben de implementar medidas como encriptación de datos, controles de acceso estrictos y supervisión continua de las vulnerabilidades del sistema.

Beneficios de implementación: A pesar de los desafíos, aplicar gemelos digitales en la logística 4.0 ofrece beneficios significativos que pueden transformar las operaciones logísticas:

Eduar Aponte Parejo

1. **Mayor precisión en la toma de decisiones:** Al analizar escenarios simulados en tiempo real, las empresas pueden implementar estrategias más seguras y efectivas. La capacidad de monitoreo constante permite detectar y resolver problemas de forma proactiva, evitando interrupciones críticas en las operaciones, según Amazon, “los sensores permiten un monitoreo constante que mejora la toma de decisiones en condiciones cambiantes” (Amazon, 2022).
2. **Reducción de costos:** Optimizar procesos antes de su implementación evita errores y pérdidas financieras. Iberdrola empresa líder a nivel mundial en energías renovables afirma que “predecir en un entorno virtual puede repercutir directamente en una reducción de costes y de tiempo que permite una mayor eficiencia y calidad, evitar fallos costosos y optimizar procesos, también favorece el ahorro” (Iberdrola, 2020).
3. **Transparencia y trazabilidad:** Los gemelos digitales mejoran la visibilidad en los procesos logísticos, desde el origen hasta el destino final, esto facilita la planificación a largo plazo y la mejora continua, como indica Iberdrola, “cuando una empresa construye una réplica digital de sus productos, entornos y sistemas que los producen, puede predecir virtualmente todo lo que sucederá en el mundo físico” (Iberdrola, 2020).
4. **Sostenibilidad:** La optimización de rutas y recursos contribuye a una logística más ecológica, reduciendo el desperdicio y el impacto ambiental. Según un estudio de Capgemini (multinacional francesa de servicios de consultoría tecnológica), donde fueron encuestadas más de 1000 compañías, el uso de gemelos digitales ha aumentado en promedio un 16% el desempeño ambiental de las empresas (Capgemini-research-institute, 2023).

2.3. Logística 4.0: inteligencia artificial.

En el apartado 1.1 se definió que la inteligencia artificial (IA) busca simular la inteligencia y capacidades humanas. Sin embargo, si se desea ampliar el concepto de IA, se puede agregar que, según John McCarthy: “Es la ciencia e ingeniería de hacer máquinas inteligentes, especialmente programas informáticos inteligentes. Se relaciona con la tarea similar de usar equipos para comprender la inteligencia humana, pero la IA no tiene que ajustarse a los métodos biológicos observables” (McCarthy, 2007).

Dentro de la IA, el machine learning juega un papel crucial como una rama que desarrolla algoritmos capaces de aprender de los datos sin ser programados específicamente para cada tarea (Amazon, 2022). De manera resumida, se puede decir que el machine learning es una técnica de la IA que le permite aprender de la experiencia basada en datos.

En el contexto de la logística 4.0, la IA juega un papel fundamental al dotar a las empresas de la capacidad de resolver problemas complejos y adquirir experiencia basada en datos. Esto permite mejorar la predicción de la demanda, optimizar las rutas de transporte, y automatizar procesos repetitivos, lo que se traduce en reducción de tiempos y costos. Además, el dinamismo de estas tecnologías facilita la adaptación en tiempo real, incrementando la eficiencia operativa y fomentando una logística más sostenible y ágil, capaz de responder eficazmente a las demandas de un entorno dinámico (Cabral Filho, 2023).

2.3.1. Modelos de predicción de demanda en logística y su impacto en las rutas de transporte.

Poder predecir la demanda se ha convertido en un objetivo clave dentro de la logística, ya que cualquier cambio en la demanda impacta directamente en los procesos logísticos de las organizaciones, lo que hace crucial anticiparse a estos movimientos.

En este contexto, los modelos de predicción basados en IA han demostrado ser herramientas fundamentales, de acuerdo con una investigación que compara métodos tradicionales con modelos de IA para predecir la demanda, se concluyó que “los modelos de IA superan a otros métodos de pronóstico tradicionales gracias a su capacidad para procesar grandes volúmenes de datos rápidamente y aprender de patrones complejos” (Dorado & Velazques, 2020).

La alta capacidad con la que cuenta la IA para analizar datos y poder predecir el comportamiento de la demanda ha sido fundamental para que la logística cumpla con las expectativas de un entorno cada vez más dinámico; entre las técnicas más comunes utilizadas en logística 4.0 por la IA para la predicción de la demanda se encuentran:

- **Modelos ARIMA (autorregresivos integrados de media móvil):** ARIMA es una técnica estadística ampliamente utilizada para el análisis y la predicción de series temporales. Este modelo se basa en patrones históricos para predecir valores futuros y puede incorporar ciclos regulares, como estacionalidades diarias o semanales para mejorar la precisión (Noble, 2024), sin embargo, la calidad y la cantidad de los datos es fundamental para garantizar el éxito de los modelos ARIMA.
- **Regresión lineal múltiple:** La regresión lineal múltiple es una extensión de la regresión lineal tradicional que permite predecir valores numéricos basados en múltiples variables, es ideal para conjuntos de datos de alta dimensionalidad y sigue siendo relevante en el aprendizaje automático (Lu & Li, 2024). Según Karan Thapar, “la regresión lineal múltiple proporciona información valiosa y poder predictivo al modelar relaciones complejas entre variables, lo que la convierte en una herramienta fundamental en la investigación y las aplicaciones prácticas” (Thapar, 2024).
- **Redes neuronales recurrentes (RNN):** Las RNN por sus siglas en inglés (Recurrent Neural Network), son modelos avanzados de aprendizaje diseñados para procesar datos secuenciales (Amazon, 2024), gracias a su capacidad de “memoria”, las RNN pueden analizar series temporales y hacer predicciones precisas sobre eventos futuros, esta característica las convierte en una herramienta potente para identificar patrones en el contexto de la logística (IBM, 2022).

Empresas como IBM y Microsoft ya integran estas técnicas en sus herramientas de predicción logística:

- **IBM Planning Analytics:** Proporciona planificación de la demanda, optimización de inventarios y análisis de escenarios hipotéticos para gestionar interrupciones de manera eficiente (IBM, 2017).
- **Azure Machine Learning de Microsoft:** Facilita a científicos de datos e ingenieros el desarrollo, entrenamiento y despliegue de modelos de machine learning avanzados (Microsoft, 2024).

Eduar Aponte Parejo

Impacto de los modelos predictivos en las rutas de transporte: Los modelos predictivos basados en IA transforman la planificación de rutas mediante:

- **Reducción de trayectos innecesarios:** Al ajustar dinámicamente las rutas según la demanda prevista, mejoran la eficiencia operativa. Según MLTi Logistics (empresa especializada en logística), “al encontrar las rutas más eficientes, la IA puede mejorar la productividad de los conductores y reducir los tiempos de inactividad” (MLTi Logistics, 2024).
- **Mejoras en la puntualidad de las entregas:** La capacidad de anticipar necesidades específicas de los clientes optimiza los tiempos de entrega y eleva la satisfacción del cliente, lo cual fomenta lealtad y recomendaciones (MLTi Logistics, 2024).

Un caso destacado es el uso de IA por parte de UPS, que ajusta diariamente sus rutas utilizando predicciones de demanda, esta estrategia les permite ahorrar combustible, reducir tiempos de entrega y mejorar la sostenibilidad de sus operaciones mediante herramientas como Track-Pod (Foster, 2024).

2.3.2. Softwares aplicables a la gestión de inventarios y rutas dinámicas.

En la actualidad, existen numerosas herramientas y software diseñados para optimizar la gestión de inventarios y las rutas de distribución mediante el uso de tecnologías avanzadas como el machine learning. Estas soluciones no solo simplifican procesos complejos, sino que también mejoran la eficiencia, reducen costos y promueven operaciones más sostenibles. A continuación, se destacan algunas de las tecnologías y softwares más relevantes en este ámbito:

1. **Sistemas de gestión de almacenes (WMS):** Los sistemas de gestión de almacenes (Warehouse Management Systems, WMS) están diseñados para optimizar todas las operaciones relacionadas con el almacenamiento. Según SAP, “se trata de un software que ayuda a las empresas a gestionar y controlar las operaciones diarias de almacén, desde la recepción de mercancías hasta su salida” (SAP, 2023).

Un ejemplo es **SAP Extended Warehouse Management (EWM)**, que permite integrar inventarios con las demandas en tiempo real, optimizando la planificación y asignación de recursos (SAP, 2023).

Los beneficios clave incluyen:

- **Reducción de costos y mejora de la eficiencia:** Al acelerar procesos y optimizar recursos, se reducen costos de inventario y mano de obra (SAP, 2023).
 - **Mayor visibilidad y control:** La transparencia en inventarios y operaciones facilita la detección de riesgos y previene interrupciones (SAP, 2023).
 - **Maximización del espacio:** La gestión eficiente del espacio disponible reduce costos y agiliza el cumplimiento de pedidos (SAP, 2023).
2. **Sistemas de gestión del transporte (TMS):** Oracle define los sistemas de gestión del transporte (Transportation Management Systems, TMS) como plataformas

Eduar Aponte Parejo

logísticas que utilizan tecnología para planificar, ejecutar y optimizar el movimiento físico de mercancías (Oracle, 2022).

Un ejemplo es **Oracle Transportation Management**, que ofrece análisis avanzados y planificación dinámica de rutas para asegurar entregas eficientes (Oracle, 2021).

Sus beneficios incluyen:

- **Mejora de la eficiencia logística:** Optimización de rutas y recursos para aumentar la productividad (Oracle, 2021).
 - **Reducción de costos operativos:** Identificación y eliminación de gastos innecesarios en la cadena de suministro (Oracle, 2021).
 - **Mayor satisfacción del cliente:** Precisión en las entregas y agilidad en los procesos logísticos (Oracle, 2021).
3. **Software de predicción de demanda y optimización de inventarios:** Herramientas como **IBM Planning Analytics** y **Microsoft Dynamics 365** integran capacidades de predicción de demanda con optimización de inventarios. Estas soluciones utilizan algoritmos de machine learning para analizar datos históricos y proyectar necesidades futuras.
- **IBM Planning Analytics:** Permite simulaciones para prever escenarios hipotéticos, optimizando niveles de inventario y asignación de recursos mediante inteligencia artificial (IBM, 2021).
 - **Microsoft Dynamics 365:** Ofrece un módulo específico para la gestión de la cadena de suministro, proporcionando una visión unificada y en tiempo real de niveles de inventario y movimientos de productos (Microsoft, 2024).
4. **Sistemas de rutas dinámicas basados en IA:** La IA ha revolucionado la planificación de rutas al permitir adaptaciones en tiempo real según factores como tráfico, demanda o restricciones logísticas.

Un ejemplo de un software que usa la IA para la planificación de rutas es **Track-POD**, utilizado por empresas como UPS, que ofrece herramientas para optimizar rutas, calcular tiempos de llegada y gestionar múltiples paradas. (Foster, 2024).

Los beneficios que este software trae para las empresas son:

- **Mejora de la eficiencia operativa:** Track-POD ayuda a las empresas a optimizar sus operaciones logísticas, reduciendo costos y tiempos de entrega (Foster, 2024).
- **Aumento de la satisfacción del cliente:** Al mejorar la precisión y la puntualidad de las entregas, Track-POD contribuye a aumentar la satisfacción del cliente (Foster, 2024).

- **Mayor visibilidad de la cadena de suministro:** La plataforma proporciona una visión completa de las operaciones logísticas, facilitando la toma de decisiones informadas (Foster, 2024).

Estos son solo algunos ejemplos de softwares que usan la IA para potenciar sus utilidades en la gestión de inventarios y planificación de rutas, ayudando así a mejorar la toma de decisiones con información más precisa y ágil, fomentando también operaciones más eficientes, sostenibles y orientadas al cliente. Estas herramientas permiten a las empresas mantenerse competitivas en un entorno logístico en constante cambio, donde la innovación y la capacidad de adaptación son esenciales.

2.3.3. Limitaciones y factores clave para la optimización.

Aunque la IA y el machine learning ofrecen grandes beneficios en la logística 4.0, su implementación conlleva ciertas limitaciones y requiere atención a factores clave para garantizar su éxito.

Limitaciones

- **Calidad y cantidad de los datos:** Los modelos de machine learning dependen de datos precisos, completos y actualizados, cualquier error puede sesgar los resultados. Según Alisha Madaan, “unos datos de alta calidad, coherentes y fiables garantizan que los sistemas de IA y machine learning puedan aprender con eficacia, realizar predicciones precisas y ofrecer resultados empresariales óptimos” (Madaan, 2024).

Sin embargo, no solo la calidad es crucial, sino también la cantidad de datos disponibles. Como indica Google, el machine learning requiere grandes volúmenes de datos para entrenar los algoritmos de manera efectiva; adquirir y limpiar estos datos es un desafío, especialmente cuando la información se encuentra fragmentada en distintas fuentes dentro de una organización (Google, 2021). Por ello, consolidar datos de manera eficiente es clave para desarrollar modelos más precisos y robustos.

- **Costo de implementación:** Las soluciones de IA requieren inversiones significativas en infraestructura, formación y mantenimiento, no basta con desear implementar IA, es crucial definir una estructura de costos clara desde el inicio. Según Ignacio Barrera, profesor de Platzi, al establecer un presupuesto realista y un plan de escalamiento, las empresas pueden optimizar sus inversiones en IA y garantizar un retorno de inversión (Barrera, 2023).
- **Complejidad operativa:** Integrar los sistemas con tecnologías existentes puede ser un desafío, especialmente en empresas con infraestructuras adquiridas. Como indica Marc Cortés, profesor de ESADE, “la implementación de IA requiere conocimientos técnicos especializados que no todas las empresas poseen. La falta de expertos en IA puede ralentizar la adopción y limitar los beneficios potenciales de esta tecnología” (Cortés, 2025).

Factores clave para la optimización

- **Capacitación del personal:** Es fundamental que el equipo entienda cómo usar e interpretar las herramientas de IA y machine learning, no se puede despedir a un empleado por no saber usar una tecnología que nunca antes ha utilizado, ni

Eduar Aponte Parejo

se puede renunciar a su implementación por falta de personal capacitado. “Las empresas que capaciten a sus colaboradores estarán mejor preparadas para enfrentar los desafíos del futuro y adaptarse a un entorno en constante evolución” (Politecnico de Suramerica, 2024).

- **Integración de datos:** Consolidar información proveniente de sensores, sistemas ERP y CRM es esencial para garantizar modelos efectivos. Como se ha evidenciado a lo largo de esta investigación y como afirma Google, “los datos son el motor de la transformación digital, su integración efectiva permite obtener percepciones valiosas para la toma de decisiones estratégicas y la mejora continua de los procesos” (Google, 2021).
- **Adaptabilidad:** Los algoritmos deben ser lo suficientemente flexibles para ajustarse a las condiciones cambiantes del mercado y la cadena de suministro. En un informe presentado por Gartner se predice que para 2026, las empresas que inviertan en IA adaptativa aumentarán en al menos un 25% su capacidad para desarrollar y desplegar nuevos modelos de IA superando a sus competidores (Perri & Wiles, 2022), esto indica que ya no solo basta con tener o implementar herramientas de IA sino que estas también deben evolucionar e ir desarrollando sus análisis con los cambios que se van presentando.

El poder utilizar IA y machine learning en la predicción de demanda y la optimización de rutas representa un avance significativo para un SLA 4.0, ya que permite alcanzar niveles superiores de eficiencia, precisión y adaptabilidad. Sin embargo, su implementación exitosa requiere superar desafíos técnicos y estratégicos clave, no se trata solo de invertir en tecnología, sino también de garantizar una integración efectiva de datos, la capacitación continua del personal y el desarrollo de estructuras flexibles que puedan adaptarse a las condiciones cambiantes del mercado.

Superar limitaciones como la calidad y cantidad de los datos, los altos costos de implementación y la complejidad operativa es esencial para maximizar los beneficios de estas tecnologías. Asimismo, abordar factores como la integración de sistemas, la adaptabilidad de los algoritmos y la capacitación especializada permitirá a las organizaciones aprovechar al máximo el potencial de la IA y el machine learning, de esta manera al enfocarse en estos aspectos, las empresas estarán mejor preparadas para transformar su cadena de suministro y mantenerse competitivas en un entorno dinámico y en constante evolución.

2.4. Logística 4.0: integración tecnológica.

El poder integrar tecnologías clave dentro de la logística 4.0 como pueden ser los gemelos digitales e IA, es otro factor clave en la transformación logística, al permitir simular, analizar y optimizar operaciones en tiempo real, como lo señala Farsana Akbar técnica en sistemas de la consultora Toobler, compañía experta en soluciones de gemelos digitales en logística: “La IA puede potenciar las capacidades de los gemelos digitales, permitiendo la creación de escenarios hipotéticos y la optimización de procesos de manera más eficiente” (Akbar, 2024).

Sin embargo, según un informe presentado en la Web de McKinsey la mayoría de las empresas todavía implementan estas tecnologías de forma independiente, perdiendo así el enorme potencial de su sinergia combinada. (Cosmas, y otros, 2024).

2.4.1. Sinergia entre gemelos digitales e IA para la optimización de inventarios y rutas.

La integración de gemelos digitales con IA ha transformado la logística moderna, permitiendo crear réplicas virtuales de sistemas logísticos que interactúan con datos en tiempo real para predecir y optimizar procesos clave, como la gestión de inventarios y la planificación de rutas. Según McKinsey, la IA generativa y los gemelos digitales se elevan y refuerzan mutuamente, esto se logra porque los gemelos proporcionan datos y escenarios de prueba, mientras que la IA generativa optimiza la información y genera resultados, con esta combinación se acelera la innovación, se reduce costos y maximiza el valor, impulsando la transformación digital en diversas industrias (Cosmas, y otros, 2024). Esta combinación no solo mejora la eficiencia operativa, sino que permite que ambas tecnologías evolucionen juntas, logrando un impacto significativo en las operaciones logísticas.

Entre los beneficios clave de esta sinergia destacan:

- **Mejora en los análisis y procesamiento de datos en tiempo real:** Los gemelos digitales, cuando son analizados por algoritmos de IA, generan instrucciones precisas y optimizan procesos, reduciendo errores humanos y mejorando la productividad (Akbar, 2024).
- **Análisis predictivo:** Alimentados con datos en tiempo real, los gemelos digitales proporcionan información valiosa para la toma de decisiones estratégicas en logística. Esto permite optimizar rutas, gestionar inventarios de manera más eficiente y mejorar la planificación de la producción (Akbar, 2024).
- **Mejora en la interacción y experiencia del usuario:** La combinación de IA y gemelos digitales permite crear experiencias personalizadas, adaptando las interfaces y funcionalidades a las necesidades específicas de los usuarios (Akbar, 2024).
- **Capacidades avanzadas de simulación:** Los gemelos digitales, potenciados por IA, permiten personalizar las operaciones logísticas con gran precisión. Por ejemplo, es posible diseñar rutas de entrega óptimas teniendo en cuenta factores como el tráfico, las condiciones climáticas y las restricciones de tiempo, mejorando tanto la eficiencia como la experiencia del cliente (Akbar, 2024).

Al centrarse de manera específica en las aplicaciones para la logística de optimización de inventarios y planificación de rutas, se obtiene que:

- **Optimización de inventarios:** Según la CEPAL, los gemelos digitales analizados con IA permiten gestionar inventarios de manera precisa y eficiente al predecir la demanda y personalizar la gestión de productos, se minimizan las roturas de stock y se optimiza el uso del espacio de almacenamiento, logrando mayor rentabilidad y sostenibilidad (Aita, 2022).
- **Planificación de rutas dinámicas:** La IA analiza datos en tiempo real para personalizar rutas de entrega considerando variables como carga, destino y restricciones locales, optimizando recursos y reduciendo costos operativos (Mira, 2024). Los gemelos digitales, por su parte, simulan escenarios para identificar las mejores soluciones, mejorando el flujo del tráfico y reduciendo la congestión (Akbar, 2024).

Se debe comprender que la sinergia que se obtiene entre los gemelos digitales y la IA representa un avance trascendental en la logística 4.0, al poder combinar las capacidades de simulación y análisis predictivo de estas tecnologías, no solo mejoran la eficiencia y reducen costos, sino que también permiten crear experiencias personalizadas que maximizan la satisfacción del cliente.

La adopción de estas herramientas por parte de empresas líderes en logística mundial demuestra su enorme potencial para transformar la logística en un entorno cada vez más competitivo, un claro ejemplo de esto es DHL en su colaboración con Tetra Pak, que resultó en la creación del primer almacén inteligente en Asia Pacífico, este almacén utiliza gemelos digitales para optimizar toda la gestión de la cadena de suministro, desde el almacenamiento hasta la distribución, logrando una logística más eficiente y sostenible (DHL, 2019).

2.4.2. Requisitos técnicos y de infraestructura.

La implementación de una integración entre los gemelos digitales y la IA, no es aislada de otras tecnologías dentro de la logística 4.0, todo lo contrario, estas tecnologías requieren cumplir con ciertos criterios esenciales debido a la gran cantidad de datos y la elevada capacidad de análisis que estas demandan. Entre los requisitos más importantes de acuerdo con la literatura consultada se encuentran:

- **Integración de sensores IoT:** Los sensores desempeñan un papel crucial en la recopilación de datos en tiempo real sobre inventarios, rutas y condiciones operativas (Amazon, 2022). Esta información es esencial tanto para los gemelos digitales como para los algoritmos de IA, permitiendo que ambos sistemas trabajen de manera sincronizada y ofrezcan resultados precisos.
- **Capacidad computacional avanzada:** Como indica Facundo Molina, investigador postdoctoral experto en software, el desarrollo e implementación de gemelos digitales y modelos de IA requiere una capacidad computacional significativa, en particular el uso de GPUs (unidades de procesamiento gráfico) de alto rendimiento, aunque los servicios en la nube ofrecen soluciones flexibles y escalables, es importante considerar que los costos pueden incrementarse con rapidez (Molina, 2024).
- **Interoperabilidad de sistemas:** La interoperabilidad definida como la capacidad de diferentes sistemas y aplicaciones para comunicarse y compartir información de manera fluida y segura (Amazon, 2023) es un requisito crítico para el funcionamiento correcto al momento de integrar la IA y los gemelos digitales a los sistemas logísticos con los que pueda contar la empresa como ERP, CRM y WMS, puesto que esto garantiza que toda la infraestructura funcione como un ecosistema congruente, maximizando su eficacia operativa.
- **Ciberseguridad:** La protección de los datos es imprescindible en la implementación de estas tecnologías; las empresas deben adoptar medidas robustas de ciberseguridad para prevenir riesgos, como filtraciones de información, ataques cibernéticos o interrupciones operativas (Latorre, Rego, De Leo, & Gutierrez, 2024).

Eduar Aponte Parejo

2.5. Logística 4.0: sostenibilidad y ODS.

“La logística 4.0 contribuye a la sostenibilidad al optimizar las rutas de transporte, reducir el consumo de combustible, mejorar el uso de los recursos mediante automatización y análisis de datos, y fomentar prácticas ecológicas en toda la cadena de suministro” (ADEN, 2024), la premisa que ofrece la Escuela de Negocios de Santo Domingo muestra cómo la logística 4.0 combina eficiencia operativa con un compromiso hacia la sostenibilidad, marcando un cambio significativo en cómo las empresas gestionan sus recursos y buscando reducir su impacto ambiental.

La transformación digital también está desempeñando un papel crucial en la sostenibilidad global, de acuerdo con la ONU, esta transformación está revolucionando la manera de interactuar con el entorno natural, facilitando la monitorización de ecosistemas, la optimización de recursos y fomentando patrones de consumo responsables (ONU, 2024), demostrando así que la tecnología no solo beneficia a las empresas al mejorar sus procesos, sino que también puede aportar soluciones concretas a los desafíos ambientales a los que se enfrentan las organizaciones por las actividades realizadas.

De hecho, la transformación digital tiene el potencial de influir significativamente en el progreso hacia los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). De acuerdo con la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), las tecnologías digitales pueden contribuir directamente al logro de 119 de las 169 metas de los ODS, cubriendo áreas clave como la acción climática, la educación, el hambre y la pobreza (UIT & PNUD, 2023)

Con esta perspectiva, es evidente que la logística 4.0 y la digitalización de los sistemas no solo buscan transformar las cadenas de suministro mediante innovación tecnológica, sino que también se convierte en una herramienta clave para avanzar hacia un modelo más sostenible.

2.5.1. Principios de la sostenibilidad en la logística.

La sostenibilidad en la logística busca equilibrar tres aspectos fundamentales: ambiental, social y económico, logrando una gestión integral de la cadena de suministro que reduzca la huella de carbono, promueva prácticas laborales justas y asegure la rentabilidad a largo plazo (Méndez, 2023). Estos principios establecen las bases para una logística responsable y consciente de su impacto global:

- **Económico:** La implementación de prácticas sostenibles puede fortalecer la competitividad empresarial al optimizar recursos, mejorar la calidad de los servicios y atraer a consumidores que valoran el compromiso ambiental, contribuyendo a la rentabilidad, mientras posiciona a la empresa como líderes en sostenibilidad (Méndez, 2023).
- **Social:** La sostenibilidad social en logística fomenta la equidad al mejorar las condiciones laborales, impulsar la diversidad y reducir las desigualdades. Además, promueve una interacción más ética entre las empresas y las comunidades locales, fortaleciendo la cohesión social y las relaciones de confianza (Méndez, 2023).
- **Ambiental:** La sostenibilidad ambiental busca minimizar el impacto ecológico de las operaciones logísticas mediante la reducción de emisiones, el uso eficiente de los recursos y la promoción de la economía circular. Al adoptar la logística 4.0, las empresas pueden acelerar la transición hacia un modelo

sostenible, optimizando procesos y reduciendo su huella ambiental (SAP Concur Team, 2022).

Dentro del marco de la sostenibilidad ambiental, las operaciones logísticas se dividen en dos enfoques principales, uno enfocado más en reducir el impacto ambiental (logística verde) y otro la maximización de residuos desde el retorno del producto por parte del cliente (logística inversa):

- **Logística verde:** Centrada en reducir el impacto ambiental a lo largo de toda la cadena de suministro, abarcando actividades como producción, almacenamiento, transporte y distribución, la logística verde busca implementar procesos más limpios y responsables, garantizando un menor impacto ecológico (SAP España, 2023).
- **Logística inversa:** Orientada a gestionar el flujo de productos y materiales desde el consumidor final hasta el origen, su objetivo es minimizar los residuos y maximizar la reutilización de recursos, promoviendo prácticas como el reciclaje, la remanufactura y la reparación de bienes (SAP España, 2023).

La integración de estos enfoques, potenciados por tecnologías de la logística 4.0, no solo promueve una operación más eficiente, sino que también alinea a las empresas con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

2.5.2. Impacto de la optimización logística en los ODS.

La optimización de procesos logísticos sostenibles no solo transforma la gestión empresarial, sino que también contribuye de manera significativa al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). Según Ignasi Sayol, presidente del clúster logístico de Cataluña, “los ODS, adoptados en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, buscan un mundo más sostenible para 2030” (Sayol, 2023), este propósito se conecta estrechamente con la logística 4.0, que, como se exploró en el apartado 2.5, utiliza la transformación digital para promover la sostenibilidad.

La evolución de la cadena de suministro, que pasó de priorizar costos a enfocarse en la calidad y la sostenibilidad, ha sido posible gracias al apoyo de nuevas tecnologías, estas herramientas permiten optimizar operaciones, reducir el impacto negativo en los ecosistemas, mejorar la eficiencia, disminuir costos a largo plazo y fortalecer la reputación empresarial (Barcelona Catalunya Centre Logístic, 2022)

La implementación de prácticas sostenibles en la logística tiene un impacto directo en diversos ODS, como:

1. **ODS 9 - Industria, innovación e infraestructura:** Las empresas pueden contribuir mediante el diseño de embalajes sostenibles (ecodiseño) y una distribución más eficiente (Barcelona Catalunya Centre Logístic, 2022). Al implementar mejoras en herramientas tan utilizadas en la logística como lo son aquellas relacionadas con el embalaje de los productos, no solo se impulsa la optimización de recursos, sino que también vuelve los sistemas más sostenibles al equilibrar la eficiencia y responsabilidad ambiental de dichos recursos.
2. **ODS 11 - Ciudades y comunidades sostenibles:** La logística 4.0 impulsa el acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles y sostenibles, tanto públicos como privados (Barcelona Catalunya Centre Logístic, 2022). Al poder

planificar rutas logísticas de manera más eficiente se ayudaría a reducir temas como congestión vehicular y mejora en la calidad del aire, promoviendo comunidades con menor impacto por actividades logísticas en la calidad ambiental de su entorno y mejor conectadas.

3. **ODS 12 - Producción y consumo responsables:** La optimización logística fomenta la economía circular al reducir residuos y mejorar la gestión eficiente de recursos naturales (Barcelona Catalunya Centre Logístic, 2022). Prácticas como la logística inversa y la reducción de emisiones destacan como pilares esenciales para lograr un consumo sostenible.
4. **ODS 13 - Acción por el clima:** Reducir la huella de carbono es fundamental para abordar el cambio climático, acciones como la optimización de rutas, la ubicación estratégica de almacenes y la capacitación en sostenibilidad son esenciales (Barcelona Catalunya Centre Logístic, 2022). Tecnologías enfocadas en análisis predictivo y las energías renovables, minimizan emisiones y consolidan el papel de la logística en la mitigación del cambio climático.

2.6. Logística 4.0 y computación cuántica.

Como ha sido mencionado anteriormente, la logística actual enfrenta una complejidad sin precedentes, impulsada tanto por factores internos como externos, las soluciones tradicionales de optimización han demostrado ser insuficientes o no se han desarrollado lo suficiente para abordar los desafíos actuales, lo que ha llevado a explorar diversas tecnologías emergentes. Una de las tecnologías que se ha estado investigando para la aplicación dentro del mundo logístico es la computación cuántica. De acuerdo con una investigación publicada por IBM, esta tecnología promete transformar la logística al gestionar la complejidad de manera más eficiente y efectiva (Othmani, LaDue, & Mevissen, 2022).

2.6.1 ¿Qué es la computación cuántica?

La computación cuántica combina informática, física y matemáticas para resolver problemas complejos con mayor rapidez que los métodos tradicionales (Amazon, 2022). Esta capacidad de respuesta con mayor rapidez para solucionar problemas complejos es la que vuelve tentadora la implementación de computación cuántica dentro de la logística, como señala el Departamento de Transporte de los EE.UU. (USDOT): “Las tecnologías cuánticas para redes, detección y computación transformarán la economía global” (LeMaster & Vakharia, 2024). Aunque aún en desarrollo, esta tecnología está diseñada para procesar grandes volúmenes de datos simultáneamente, desbloqueando nuevas capacidades para resolver problemas en sectores clave como la logística.

2.6.2 Aplicaciones de la computación cuántica en un SLA 4.0.

De acuerdo con un estudio realizado por el Comité Asesor Técnico de Casos de uso de QED-C (Consortio de Desarrollo Económico Cuántico), la computación cuántica tiene el potencial de revolucionar la industria del transporte y la logística al ofrecer soluciones más eficientes y rápidas para problemas complejos de optimización (Quantum Economic Development Consortium (QED-C), 2024), entre las principales aplicaciones se encuentra:

- **Optimización de rutas:** A diferencia de los métodos tradicionales de enrutamiento, la computación cuántica puede procesar múltiples variables simultáneamente para

Eduar Aponte Parejo

encontrar rutas óptimas en tiempo real, reduciendo la congestión y los costos operativos (Quantum Economic Development Consortium (QED-C), 2024).

En un SLA 4.0, el uso de IoT y big data permite recopilar grandes volúmenes de datos sobre tráfico, condiciones climáticas y demandas, al apoyarse en la computación cuántica, se puede procesar esta información simultáneamente para encontrar rutas óptimas en tiempo real, superando las capacidades de los algoritmos clásicos, lo cual se puede traducir en una reducción de costos operativos y tiempos de entrega.

- **Gestión de inventarios y almacenes:** Problemas complejos como la disposición de inventarios, la ubicación estratégica de almacenes y la asignación de recursos pueden resolverse con mayor precisión y velocidad mediante algoritmos cuánticos, mejorando así la eficiencia operativa y reducción de los costos logísticos (Quantum Economic Development Consortium (QED-C), 2024).

Un SLA 4.0 busca la automatización total de sus procesos para aumentar la precisión en la gestión de inventarios mediante sistemas ciberfísicos y análisis predictivo. En este contexto, los algoritmos cuánticos representan un importante respaldo para lograr dicha automatización, ya que permiten resolver de forma más rápida y precisa problemas complejos relacionados con la disposición de inventarios, la asignación de recursos y la ubicación estratégica de almacenes. Esto facilita una respuesta ágil a la demanda y contribuye a la reducción de los costos logísticos.

- **Sostenibilidad y resiliencia:** Según el USDOT, la computación cuántica puede modernizar los sistemas de transporte, haciéndolos más sostenibles y resilientes ante el cambio climático, además de contribuir a la mitigación de su impacto ambiental (LeMaster & Vakharia, 2024).

Un SLA 4.0 tiene como uno de sus pilares hacer la logística empresarial más sostenible mediante la optimización en el uso de los recursos y la reducción del impacto ambiental. Al combinarse con la computación cuántica, es posible diseñar rutas más eficientes y mejorar la planificación logística para hacerla más resiliente, lo que permite responder de manera más eficaz a interrupciones causadas por fluctuaciones en la demanda.

2.6.3 Beneficios y desafíos actuales de la computación cuántica.

Uno de los principales beneficios que se pueden encontrar en la implementación de la computación cuántica para la optimización de procesos es el ahorro de costes, un estudio de McKinsey & Company estima que la computación cuántica podría reducir costos logísticos hasta en un 20% y agilizar las entregas (Quantum Economic Development Consortium (QED-C), 2024). Asimismo, su capacidad para predecir y optimizar operaciones en tiempo real tiene el potencial de mejorar significativamente la experiencia del cliente y la sostenibilidad de las cadenas de suministro.

Sin embargo, a pesar de su potencial, la computación cuántica enfrenta barreras importantes para su adopción masiva:

Eduar Aponte Parejo

- **Avances tecnológicos:** La tecnología cuántica aún necesita mejoras significativas para ser viable a gran escala (Quantum Economic Development Consortium (QED-C), 2024).
- **Análisis de datos:** Al igual que la IA actual y su rama el machine learning, la computación cuántica requiere más investigación para procesar grandes volúmenes de datos de manera eficiente, así como una calidad de los datos bastante elevada para disminuir márgenes de error (Quantum Economic Development Consortium (QED-C), 2024).
- **Colaboración interdisciplinaria:** La integración efectiva de la computación cuántica requiere cooperación entre expertos en tecnología cuántica, logística y formulación de políticas. (Quantum Economic Development Consortium (QED-C), 2024)
- **Costos elevados:** El alto costo de desarrollo e implementación limita su adopción, especialmente para pequeñas y medianas empresas (Quantum Economic Development Consortium (QED-C), 2024).

Al analizar beneficios y desafíos, se puede decir que la computación cuántica ofrece un horizonte prometedor para incorporarse a la logística 4.0, con la promesa de optimizar rutas, mejorar la gestión de inventarios y fomentar la sostenibilidad en la cadena de suministro. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos tecnológicos, económicos y de colaboración que deben ser abordados para aprovechar plenamente su potencial. La cooperación entre empresas tecnológicas, académicas y logísticas será fundamental para acelerar el desarrollo y garantizar que los beneficios de esta tecnología revolucionaria lleguen a toda la industria logística.

En un futuro próximo, la computación cuántica no solo redefinirá cómo se gestionan los sistemas logísticos, sino también cómo se abordan los desafíos globales de sostenibilidad y resiliencia, en el año 2020 DHL afirmaba que “los próximos cinco años serán un período crítico que nos ayudará a determinar la viabilidad de las aplicaciones de computación cuántica en la industria logística a medida que la tecnología madure y se desarrolle” (DHL, 2020)

3. Metodología de investigación

3.1. Tipo de estudio: investigación documental y revisiones bibliográficas.

En el presente trabajo se utilizó una metodología de investigación documental y revisiones bibliográficas, este enfoque permitió recolectar, analizar e interpretar información existente proveniente de diversas fuentes. Aunque existe una vasta cantidad de información sobre la logística 4.0, sus diversas tecnologías (IA, gemelos digitales, edge computing, cloud computing, IoT y big data) y su impacto en la optimización de inventarios y rutas, gran parte de esta información se encuentra dispersa y abordada de manera individual, poca literatura reúne de forma integral los elementos que se pretenden desarrollar en este proyecto. Por ello, esta metodología tiene como objetivo construir un marco teórico sólido que sustente la propuesta central del proyecto.

3.2. Fuentes de información y criterios de selección.

Para garantizar la relevancia y calidad de las fuentes de información, se seleccionó aquella que se alineaba con los objetivos del proyecto, enfocándose en temas clave como logística 4.0, tecnologías de la logística 4.0, optimización de inventarios y planificación de rutas, priorizando publicaciones de los últimos cinco años, aunque en casos excepcionales se utilizaron fuentes más antiguas debido a su contribución al marco conceptual. Asimismo, se dio especial importancia a la fiabilidad de las fuentes, seleccionando aquellas provenientes de instituciones educativas, repositorios universitarios, empresas líderes en logística y tecnología, etc. Todas las fuentes seleccionadas se caracterizaron por ser accesibles a través de bases de datos académicas, repositorios confiables y sitios web reconocidos, garantizando así un enfoque de alta calidad.

Entre las fuentes principales que fueron utilizadas se incluyen:

- **Bases de datos académicas y universitarias:** Plataformas como Google Scholar y ScienceDirect se emplearon para obtener artículos revisados por pares, investigaciones académicas y tesis relacionadas con temas clave como logística 4.0, IA, gemelos digitales, edge computing, cloud computing, IoT, big data, beneficios, desafíos y sostenibilidad.
- **Publicaciones de organizaciones internacionales:** Informes y estudios elaborados por instituciones reconocidas entre las que se encuentran el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y la Organización de las Naciones Unidas (ONU), entre otros que aportaron análisis estratégicos y perspectivas globales.
- **Páginas web de grandes empresas tecnológicas:** Fuentes provenientes de compañías como IBM, Google, Amazon y SAP, que proporcionaron información sobre soluciones tecnológicas innovadoras y casos prácticos en logística y tecnologías emergentes.
- **Blogs, revistas y artículos especializados:** Blogs de universidades, publicaciones de expertos en logística y tecnología, así como análisis de consultoras como McKinsey & Company y DHL, complementaron las perspectivas teóricas con aplicaciones prácticas. Además, se incluyó información de revistas científicas especializadas, especialmente en áreas como la computación cuántica, para ampliar la profundidad del análisis en el tema específico de la computación cuántica aplicada en la logística.

Eduar Aponte Parejo

3.3. Procedimiento de análisis.

El análisis de la información recolectada se llevó a cabo mediante un proceso estructurado que incluyó las siguientes etapas:

- **Revisión inicial y selección de fuentes:** Se realizó una búsqueda exhaustiva utilizando términos clave como logística 4.0, inteligencia artificial, gemelos digitales, IoT, optimización de rutas y gestión de inventarios, entre otros. La información obtenida fue seleccionada en términos de relevancia y utilidad para el marco teórico del proyecto, clasificándose en función de su pertinencia.
- **Organización de la información:** Toda la información relevante se organizó en un documento que recogía las ideas principales de cada fuente, facilitando la estructuración temática del proyecto. Además, se creó una base de datos a partir de las referencias obtenidas, permitiendo un acceso rápido y eficiente a las mismas durante el desarrollo del trabajo.
- **Análisis crítico y síntesis:** Las fuentes seleccionadas fueron sometidas a una lectura analítica para evaluar su consistencia, validez y aplicabilidad. Este análisis permitió establecer relaciones entre conceptos clave, identificar posibles vacíos en la literatura y consolidar las diferentes secciones del trabajo, asegurando una coherencia conceptual.
- **Gestión bibliográfica:** Para gestionar las referencias, se utilizó la función de citar de Microsoft Word, lo que facilitó el registro, organización y el poder citar de manera precisa las fuentes consultadas, garantizando la consistencia en el formato elegido (formato APA).
- **Uso de herramientas tecnológicas:** Para la elaboración de este trabajo de fin de máster (TFM), se utilizaron diversas herramientas de IA con el propósito de mejorar la calidad y coherencia del texto, asegurando que cada apartado cumpliera con las normas gramaticales, ortográficas y estilísticas requeridas en un trabajo académico. Entre las IA empleadas se encuentran Chat GPT, DeepSeek y Gemini, todas especializadas en la generación y corrección de texto, lo que permitió refinar la redacción mediante la revisión de estructuras gramaticales, conexión lógica entre párrafos, ajuste de signos de puntuación, eliminación de ideas redundantes y enriquecimiento del estilo narrativo.

En particular, para la sección “Fases de implementación del SLA 4.0”, se emplearon Chat GPT y DeepSeek con el objetivo de validar que las fases propuestas fueran coherentes y aplicables dentro del contexto del SLA 4.0. Estas herramientas no solo ayudaron a estructurar de manera lógica cada fase, sino que también permitieron comprender cómo podrían integrarse de manera eficiente dentro de la propuesta, proporcionando ejemplos y referencias que facilitaron su desarrollo.

Es importante destacar que, si bien la IA fue utilizada como un recurso de apoyo, la construcción de los contenidos se llevó a cabo mediante un análisis crítico y reflexivo, asegurando que el resultado final mantuviera un enfoque académico sólido y bien fundamentado.

4. Revisión de casos prácticos.

4.1. Introducción a los casos prácticos.

En este apartado, se analizarán casos prácticos que ilustran cómo las teorías y metodologías presentadas anteriormente se han aplicado en situaciones reales. Estos casos demuestran que la implementación de tecnologías de la logística 4.0, como los gemelos digitales y la IA, no son únicamente un concepto teórico o un planteamiento abstracto, sino que representa herramientas concretas que están transformando la logística moderna.

4.2 Caso práctico 1: Smart Warehouse de Tetra Pak en Asia-Pacífico gestionado por DHL Supply Chain.

El primer caso analizado corresponde al almacén inteligente de Tetra Pak en Singapur, uno de los más grandes del mundo, cuya gestión de la cadena de suministro está a cargo de DHL Supply Chain, líder mundial en soluciones logísticas por contrato, este proyecto destaca por ser el primer almacén inteligente de DHL en Asia-Pacífico que implementa la tecnología de gemelo digital, la cual permite comprender y gestionar de manera más eficiente los activos físicos a través de modelos digitales.

DHL Supply Chain, en colaboración con Tetra Pak, desarrolló una solución integrada de cadena de suministro que combina tecnologías como el internet de las cosas (IoT) y el análisis de datos avanzados, mediante esta integración se permite la conexión entre el almacén físico con una representación virtual dinámica que monitorea y simula tanto el estado físico como el comportamiento de los activos en tiempo real, pero esta integración ha sido posible por el uso de lo que DHL establece como seis elementos claves, los cuales son:

1. **Sensores en pasillos y puntos de recogida:** La instalación cuenta con 10 sensores en los 4 pasillos principales y más de 1.000 puntos específicos para la recogida de productos, permitiendo aumentar la eficacia del almacén en un 16%, optimizando la planificación de recursos y minimizando las áreas de alta densidad de movimiento. Esta mejora ha sido posible gracias al análisis de datos mediante mapas de calor, que identifican las áreas con mayor ocupación de personal, inventario y maquinaria, al basarse en esta información, se implementaron medidas para agilizar las operaciones utilizando datos en tiempo real.

Un ejemplo representativo de este mapa de calor se presenta en la Ilustración 1.

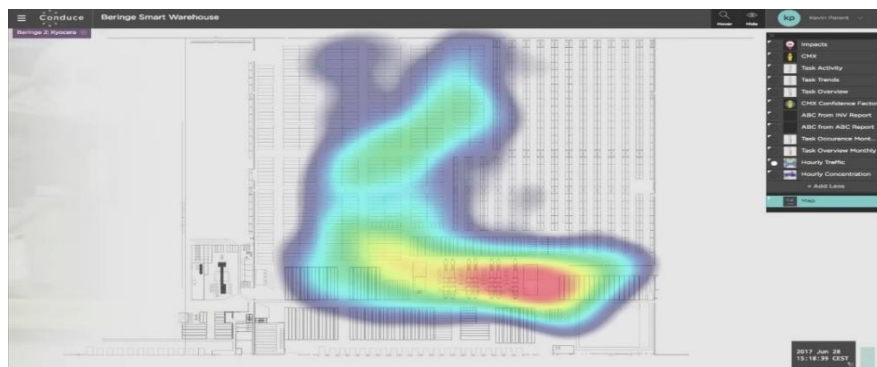


Ilustración 1 Mapa de calor almacén inteligente DHL.

Fuente: DHL Smart Warehouse.

Eduar Aponte Parejo

2. **Monitoreo en tiempo real de áreas restringidas:** El sistema detecta y alerta sobre accesos no autorizados en áreas de acceso controlado, protegiendo productos y equipos sensibles y reduciendo los riesgos de pérdidas o daños.
3. **Control continuo de la temperatura:** El sistema monitorea constantemente la temperatura en todo el almacén, asegurando condiciones óptimas para productos que requieren un almacenamiento especializado.
4. **Visibilidad total del movimiento interno:** Al rastrear el flujo de productos dentro del almacén, se optimiza su ubicación, reduciendo los tiempos de búsqueda y aumentando la eficiencia operativa.
5. **Datos operativos en tiempo real para supervisores:** Los supervisores tienen acceso a información actualizada sobre el rendimiento del equipo y las operaciones generales, lo que facilita decisiones estratégicas, identificación de áreas de mejora y capacitación específica para los equipos.
6. **Mayor seguridad en equipos de manejo de materiales (EMM):** Los equipos están equipados con sensores para detectar obstáculos y prevenir colisiones, lo que mejora la seguridad en el entorno laboral.

Una torre de control centralizada monitorea constantemente el flujo de mercancías entrantes y salientes, así con estas medidas de control y manejo de información en tiempo real se han logrado los siguientes resultados:

- Los productos se colocan en los estantes dentro de los 30 minutos posteriores a su recepción.
- Las mercancías destinadas a entrega estén listas para su envío en menos de 95 minutos.

Además, para mejorar la seguridad y reducir riesgos operativos, DHL implementó un sistema de gestión de contenedores que minimiza la manipulación de cargas pesadas por parte de los empleados, todos los trabajadores fueron capacitados en las nuevas medidas de seguridad, asegurando así una operación eficiente y segura.

Nota: Toda la información se encuentra disponible en la página web de DHL Group (DHL, 2019)

[\(DHL Supply Chain en colaboración con Tetra Pak implementa el primer almacén inteligente con gemelo digital en Asia-Pacífico\)](#)

4.3. Caso práctico 2: dm-drogerie markt.

El segundo caso en ser analizado corresponde a la implementación de un gemelo digital por parte dm-drogerie markt la cual es una cadena alemana de tiendas minoristas que vende diversos artículos para el hogar, alimentos saludables, cosméticos, entre otros, en su sector, dm-drogerie markt es el mayor minorista de Alemania.

Con más de 2.000 tiendas y presencia internacional, la compañía enfrenta desafíos como la competencia creciente, cambios en tendencias de consumo y la necesidad de optimizar sus procesos logísticos. Para lograr superar los desafíos, se decidió implementar una infraestructura basada en gemelos digitales, creando réplicas virtuales de sus sucursales y digitalizando la disposición de estanterías y artículos, con esta transformación digital se tiene como objetivo adaptarse al crecimiento y mejorar la eficiencia operativa (Hannover Messe, 2020).

Eduar Aponte Parejo

Para lograr implementar el gemelo digital dm-drogerie markt ha tenido elementos claves, los cuales son:

- **Planificación estratégica con Supply Chain Suite (SCS):** Con el soporte de Siemens Digital Logistics, se desarrolló un gemelo digital de la red logística, con esta herramienta se logró simular escenarios de crecimiento, analizar la capacidad de los centros de distribución y optimizar el suministro a las tiendas, de igual manera la solución evaluaba estrategias como la centralización de almacenes y los niveles de servicio (Siemens Digital Logistics GmbH, 2021).
- **Optimización de palés:** Gracias a la digitalización completa de las sucursales, lograron mejorar la distribución de productos en palés mixtos para reducir movimientos innecesarios en las tiendas (Siemens Digital Logistics GmbH, 2021).
- **Robots de escaneo de estanterías:** dmTECH (subsidiaria de TI de dm-drogerie markt) integró robots de Ubica Robotics para crear gemelos digitales de sus tiendas. Estos robots, equipados con sensores IoT avanzados y algoritmos de IA, generan información de inventarios y mapas precisos del estado de la tienda. Además, detectan automáticamente productos agotados y optimizan las tareas de reposición y preparación de pedidos (reta europe, 2024).
- **Herramientas para la planificación de rutas:** El buscador en teléfonos inteligentes, conectado a los gemelos digitales, permite a los empleados identificar la ubicación exacta de los artículos, ahorrando tiempo y mejorando la experiencia del cliente (reta europe, 2024).

Los resultados obtenidos por parte de dm-drogerie markt al implementar el gemelo digital en su gestión de inventarios han sido entre otros:

- **Mejora en la eficiencia operativa:** La optimización del manejo de los palés ha permitido un abastecimiento adecuado de las tiendas con la menor cantidad de recursos logísticos, reduciendo los movimientos innecesarios de productos y mejorado la planificación de rutas dentro de las tiendas (Dohrmann, 2024).
- **Transformación digital en las tiendas:** Con la implementación de más de 50 robots autónomos, se ha mejorado la precisión en el seguimiento de inventarios, reduciendo la necesidad de controles manuales y optimizado las tareas de reposición (reta europe, 2024).
- **Reconocimiento internacional:** Este proyecto fue galardonado con el Premio Alemán de Gestión Logística 2020 por su transformación logística, y la sostenibilidad operativa (Siemens Digital Logistics GmbH, 2021) adicionalmente han sido galardonados con el premio a la mejor aplicación de IA y robótica 2024 en los Reta awards 2024 (reta europe, 2024).

La implementación de gemelos digitales, IA, IoT, análisis de datos y tecnología robótica autónoma en dm-drogerie markt es un claro ejemplo de cómo las herramientas de la logística 4.0, pueden transformar los procesos tradicionales en el sector minorista. Estos avances no solo han mejorado la eficiencia y la sostenibilidad de la cadena de suministro para dm-drogerie markt, sino que también han elevado la experiencia del cliente, posicionando a dm-drogerie markt como líder en innovación logística en Europa.

4.4. Caso práctico 3. Optimización de rutas en UPS con ORION.

El tercer caso en ser explorado corresponde a la implementación de un sistema de optimización de rutas mediante inteligencia artificial por parte de UPS (United Parcel Service), la cual es una de las empresas de mensajería y logística más grandes del mundo, con operaciones en más de 220 países y territorios (UPS, 2021). Debido al volumen de entregas diarias y la complejidad de su red logística, UPS ha buscado continuamente innovaciones tecnológicas con el fin de optimizar sus operaciones y reducir costos.

Uno de los desarrollos más destacados de la empresa en este sentido es ORION (On-Road Integrated Optimization and Navigation), un sistema de inteligencia artificial diseñado para optimizar rutas de entrega en tiempo real, aumentando la eficiencia operativa y reduciendo el impacto ambiental (BSR Center for Technology and Sustainability, 2016).

Características y sistemas utilizados.

ORION funciona recopilando, analizando y procesando grandes volúmenes de datos para generar rutas de entrega más eficientes (BSR Center for Technology and Sustainability, 2016).

El sistema opera a través de múltiples componentes tecnológicos:

- **Recopilación y análisis de datos:** ORION procesa información en tiempo real proveniente de diversas fuentes, como sensores IoT instalados en los vehículos, datos históricos de entregas, información geoespacial y condiciones de tráfico (Navarro, 2024).
- **Algoritmos avanzados de optimización:** ORION emplea algoritmos de programación lineal y algoritmos genéticos para evaluar más de 200.000 opciones de ruta por conductor cada día. Su objetivo es minimizar el tiempo de conducción y el consumo de combustible, teniendo en cuenta restricciones como regulaciones locales y patrones de tráfico (Weise, 2019).
- **Modelos predictivos de tráfico y clima:** Utilizando IA el sistema anticipa las condiciones del tráfico y el clima en tiempo real. Esto permite a UPS ajustar las rutas dinámicamente en función de posibles interrupciones, como accidentes, congestión vehicular o cambios climáticos adversos (Navarro, 2024).
- **Optimización de giros a la izquierda:** Una de las estrategias clave de ORION es minimizar los giros a la izquierda, ya que estos aumentan el riesgo de accidentes y generan mayores tiempos de espera en intersecciones. En su lugar, se priorizan rutas con giros a la derecha, reduciendo tiempos de entrega y mejorando la seguridad vial (Navarro, 2024).
- **Generación de rutas personalizadas:** ORION adapta las rutas según la ubicación de las entregas, la prioridad de cada paquete y las condiciones del tráfico en tiempo real. Además, considera las horas de trabajo de los conductores y sus pausas reglamentarias, maximizando la productividad mientras cumple con las normativas laborales (Navarro, 2024).
- **Interfaz con los conductores:** Una vez calculada la ruta óptima, ORION la comunica a los conductores a través de dispositivos móviles integrados en los camiones de UPS. Esto permite actualizaciones en tiempo real y ajustes de ruta cuando sea necesario (Navarro, 2024).

Eduar Aponte Parejo

Desde su implementación, ORION ha generado múltiples beneficios para UPS, tanto en términos de eficiencia operativa como de sostenibilidad:

- **Reducción de costos operativos:** Se estima que el sistema ha permitido ahorrar más de 300 millones de dólares anualmente, optimizando el uso de recursos logísticos (Navarro, 2024).
- **Aumento de la eficiencia de entregas:** ORION ha permitido realizar hasta 10 millones de paradas adicionales cada año, mejorando la capacidad operativa de UPS (Navarro, 2024).
- **Disminución de emisiones de carbono:** Gracias a la optimización del consumo de combustible, se han reducido las emisiones de CO₂ en aproximadamente 10 millones de toneladas anuales (Navarro, 2024).
- **Mejora en la satisfacción del cliente:** La precisión en las entregas ha aumentado significativamente, resultando en un incremento del 30% en la satisfacción del cliente debido a mejores tiempos de entrega (Navarro, 2024).
- **Reducción de accidentes:** La optimización de rutas ha contribuido a una disminución del 5% en los accidentes de tráfico relacionados con las entregas (Navarro, 2024).
- **Aprendizaje continuo y adaptación:** ORION analiza diariamente el rendimiento de las rutas, lo que permite mejoras constantes en la toma de decisiones y en las estrategias operativas (Navarro, 2024).

El caso de UPS y su sistema de optimización de rutas ORION es una clara evidencia de cómo la integración de IA, análisis de datos, sensores IoT y conexión con plataformas externas, logra optimizar el proceso de planificación de rutas en la logística moderna, este sistema ha generado en UPS una mejora sustancial en la eficiencia operativa, reducción de costos asociados al consumo de combustible y la disminución del impacto ambiental, mediante la aplicación de algoritmos avanzados, modelos predictivos y técnicas de aprendizaje automático.

Al comparar el método tradicional de planificación de rutas, que se caracteriza por su dependencia de la experiencia humana, ORION logra analizar múltiples variables en tiempo real, como son el tráfico, el clima, los patrones de entrega y las restricciones, de manera automática digitalmente, lo que ha posibilitado obtener los resultados antes señalados, lo cual se traduce en una operación más eficiente.

4.5. Lecciones aprendidas.

Los casos de Tetra Pak-DHL, dm-drogerie markt y UPS-ORION, son solo un pequeño ejemplo del impacto que puede tener la implementación de tecnologías de la logística 4.0 como gemelos digitales, IA, IoT y big data en la optimización de inventarios y planificación de rutas, estos casos permiten identificar una serie de aspectos claves como:

1. **Integración tecnológica y su impacto en la eficiencia operativa:** La incorporación de tecnologías como los gemelos digitales, en la gestión de almacenes y redes logísticas se ha convertido en un factor clave para optimizar procesos y potenciar la eficiencia operativa. La digitalización de entornos físicos, como en los casos de Tetra Pak-DHL y dm-drogerie markt, ha permitido una administración más precisa del flujo de productos, reduciendo tiempos operativos y facilitando la toma de decisiones basada en datos en tiempo real. Esta capacidad de contar con información en tiempo real resulta

Eduar Aponte Parejo

crucial en sistemas logísticos altamente sensibles a factores externos como fluctuaciones de demanda o interrupciones en la cadena de suministro, donde incluso variaciones mínimas pueden alterar significativamente los procesos logísticos.

La capacidad de adaptación que permite la tecnológica adquiere mayor relevancia al analizar casos como el de UPS, que implementó IA y análisis de datos en la planificación de rutas de entrega mediante algoritmos de optimización, con esto la empresa logró reducir costos operativos y su huella ambiental al eliminar giros innecesarios, ajustar trayectorias según el tráfico en tiempo real y anticipar condiciones climáticas adversas (Navarro, 2024).

En conjunto, estas innovaciones recalcan cómo la integración estratégica de herramientas digitales desde la simulación de escenarios hasta el análisis predictivo transforma la logística tradicional en un ecosistema ágil, adaptable y sostenible. La capacidad de traducir datos en acciones concretas redefine los estándares operativos, posicionando a la tecnología como un pilar indispensable para competir en mercados globales cada vez más dinámicos.

2. Reducción de costos y mejora de la sostenibilidad: Plataformas como ORION de UPS y los sistemas de digitalización de almacenes, como el implementado por Tetra Pak-DHL, han demostrado que la optimización basada en datos no solo reduce costos, sino que también establece nuevos estándares de eficiencia. Por ejemplo, el sistema ORION ha generado ahorros anuales superiores a 300 millones de dólares para UPS (Navarro, 2024), esto se logró por la planificación inteligente de rutas que elimina kilómetros redundantes y maximiza la capacidad de carga. Por su parte, la digitalización del almacén de Tetra Pak incrementó su eficiencia operativa en un 16%, optimizando el uso del espacio físico y automatizando la asignación de recursos desde mano de obra hasta equipos de almacenamiento (DHL, 2019).

Sin embargo, el impacto no solamente ocurre en lo financiero, los avances tecnológicos fomentan la sostenibilidad en sectores tradicionalmente intensivos en recursos. Un claro ejemplo de esto es UPS que logró reducir 10 millones de toneladas de CO₂ anuales mediante rutas optimizadas (Navarro, 2024), no solo minimizando su huella ambiental, sino que también alineando sus operaciones con las metas globales de descarbonización establecidas en los ODS. Por su parte, dm-drogerie markt ha transformado la gestión de sus tiendas mediante sensores IoT y sistemas de reposición automatizada, eliminando desplazamientos innecesarios del personal y reduciendo el tiempo dedicado a la organización de inventarios (Siemens Digital Logistics GmbH, 2021).

Se debe destacar como en estos casos se evidencia que la logística 4.0 no se limita a resolver problemas aislados, sino que va más allá al lograr redefinir cadenas de valor completas. Al integrar sistemas de optimización con métricas de sostenibilidad, las empresas convierten la logística en un motor de competitividad y responsabilidad ecológica. Este enfoque no solo responde a presiones regulatorias o demandas de consumidores, sino que construye ventajas estratégicas a largo plazo, posicionando a la innovación tecnológica como un puente entre la rentabilidad inmediata y la resiliencia futura.

3. Desafíos en la implementación de tecnologías avanzadas: Aunque la adopción de tecnologías como los gemelos digitales y la IA ha demostrado ser transformadora en los procesos logísticos, su implementación enfrenta desafíos que exigen una gestión estratégica. El primero y más común es la inversión inicial en infraestructura, no solo a nivel económico, sino también técnica. Por ejemplo, UPS identificó que las fases de pruebas e implementación de su sistema ORION absorbieron más del 75 % del costo

Eduar Aponte Parejo

total del proyecto (BSR Center for Technology and Sustainability, 2016). Por su parte, dm-drogerie markt y Tetra Pak han requerido una planificación estratégica a largo plazo, además del desarrollo de plataformas especializadas para asegurar una adopción efectiva.

Sin embargo, el reto más complejo es la dependencia de datos precisos y accesibles, como se evidenció en los tres casos la efectividad de estas herramientas depende de la calidad, seguridad y actualización constante de la información. Un ejemplo claro de esto es el gemelo digital de un almacén que solo es útil si refleja en tiempo real variables como niveles de inventario, condiciones de almacenamiento, flujos de trabajo, etc. Lo cual vuelve de vital importancia incorporar un sistema que permita la validación de los datos, ya que errores en los datos de entrada, como demoras en la actualización de inventarios o fallas en la comunicación entre sistemas, pueden generar decisiones erróneas con impactos en cascada.

Pese a que estos desafíos pueden parecer complejos de superar, no invalidan el valor de las soluciones tecnológicas, sino que delinear los requisitos fundamentales para su adopción efectiva. Una manera de superar parte de esos desafíos es buscando alianzas con expertos tecnológicos o en la materia, como fue el caso de dm-drogerie markt con Siemens o Tetra Pak con DHL.

4. Adaptabilidad y escalabilidad como clave del éxito: La capacidad de evolucionar frente a desafíos y escalar soluciones tecnológicas define a las organizaciones líderes en la logística 4.0. Un análisis de casos como UPS, dm-drogerie markt y Tetra Pak demuestra que la implementación de herramientas tecnológicas no es un proyecto finito, sino un ciclo de innovación constante. Por ejemplo, el sistema ORION de UPS ha integrado modelos predictivos avanzados que permiten ajustar rutas en tiempo real, incluso ante eventos inesperados como huelgas o cambios en las condiciones climáticas (Navarro, 2024). De manera similar, dm-drogerie markt escaló su digitalización con robots autónomos que no solo optimizan la reposición de estantes, sino que también generan datos para rediseñar layouts de tiendas según patrones de consumo (reta europe, 2024). Estos ejemplos demuestran que la tecnología en logística opera bajo un enfoque de mejora continua.

Los gemelos digitales, por su parte, requieren actualizaciones periódicas para reflejar cambios en infraestructura, normativas o comportamientos de clientes. Tetra Pak, por ejemplo, ha vinculado su gemelo digital con sensores IoT en tiempo real, permitiendo simular escenarios de escasez de materias primas y ajustar sus planes de producción con semanas de anticipación (DHL, 2019). Esta flexibilidad no solo mitiga riesgos, sino que también acelera la adopción de tecnologías como blockchain para trazabilidad o edge computing para el procesamiento de datos cerca de su origen, como dispositivos IoT o servidores locales, permitiendo obtener información más rápido, mejorar la capacidad de respuesta y optimizar el uso del ancho de banda (IBM, 2023).

Los casos analizados, además de validar el potencial de la logística 4.0, demuestran que esta no se limita a resolver problemas operativos aislados, sino que redefine por completo la gestión de la cadena de suministro, posicionando a la innovación tecnológica como un pilar indispensable para la competitividad y la sostenibilidad en un entorno logístico cada vez más dinámico y exigente.

5. Sistema Logístico Avanzado 4.0 (SLA 4.0) para la optimización dinámica de inventarios y rutas.

A lo largo de la revisión bibliográfica realizada en este trabajo se ha evidenciado cómo la cadena de suministro actual atraviesa una transformación radical impulsada por la logística 4.0, cambiando el paradigma de los procesos logísticos en las empresas, convirtiéndose en una innovación clave que no solo ha replanteado las estrategias operativas, sino que también ha abierto nuevas oportunidades para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones.

El cambio más significativo radica en la transición de métodos basados en la experiencia humana hacia sistemas apoyados en el análisis de datos históricos y en tiempo real, lo que permite tomar decisiones más precisas orientadas a la optimización integral de las operaciones. Además, se ha demostrado que las tecnologías de la logística 4.0 alcanzan su mayor potencial cuando se utilizan de manera interconectada, en lugar de tratarlas como soluciones aisladas.

El estudio de casos como UPS, dm-drogerie markt y Tetra Pak-DHL confirma el impacto tangible de estas herramientas tecnológicas en escenarios reales, mostrando que la logística 4.0 no es solo un concepto teórico, sino una realidad operativa consolidada en los últimos años.

Estas evidencias justifican la necesidad de hablar de un sistema logístico avanzado 4.0, capaz de integrar diversas tecnologías de la logística 4.0 para optimizar la gestión de inventarios y la planificación de rutas. Este sistema debe basarse en un modelo interconectado que gestione los procesos de forma dinámica y coordinada, evitando tratarlos como elementos independientes.

El objetivo principal del SLA 4.0 es lograr la reducción de costos, la minimización de errores operativos, la maximización de la eficiencia y un aumento en la sostenibilidad empresarial. El enfoque propuesto se basa en la transformación digital y automatización de los procesos clave, permitiendo la creación de un ecosistema inteligente en el que los inventarios y las rutas de distribución sean gestionados de manera autónoma y adaptativa.

A través de la implementación de IA, gemelos digitales, IoT, big data, cloud computing, edge computing y otras tecnologías 4.0, el sistema podría analizar datos en tiempo real, predecir patrones de demanda, optimizar la disposición de productos en los almacenes y definir rutas de distribución más eficientes, considerando variables como el tráfico, las condiciones climáticas y las restricciones normativas.

La propuesta se sustenta en un marco de automatización inteligente que garantiza la sincronización entre el flujo de inventarios y la planificación de rutas, permitiendo una gestión proactiva de la cadena de suministro. Esto aseguraría respuestas ágiles y eficientes ante cambios en la demanda, optimizando la ocupación de los espacios de almacenamiento y reduciendo los tiempos de entrega.

Con este enfoque, se busca no solo mejorar la eficiencia operativa, sino también incrementar la capacidad de adaptación del sistema logístico ante escenarios variables, asegurando una toma de decisiones fundamentada en datos en tiempo real y maximizando tanto la sostenibilidad como la rentabilidad de las operaciones.

Eduar Aponte Parejo

5.1. Digitalización como base del SLA 4.0.

La digitalización no es solo un componente adicional, sino la columna vertebral del sistema logístico avanzado 4.0, su papel es ser el motor que impulsa la transformación y evolución de la cadena de suministro.

En el SLA 4.0, la digitalización permite integrar diversas tecnologías de la logística 4.0, dejando atrás el modelo tradicional basado en la experiencia humana y prácticas heredadas para adoptar un enfoque orientado a la toma de decisiones basadas en datos. Gracias a ello, el SLA 4.0 garantiza decisiones más precisas y adaptativas, potenciando la flexibilidad estratégica de las organizaciones, además de asegurar un incremento significativo en la sostenibilidad empresarial.

Como se mencionó en el marco teórico, el SLA 4.0 se sustenta en la interconexión de diferentes tecnologías de la logística 4.0, que han sido explicadas a lo largo de este trabajo. Cada una cumple un rol específico tanto en la gestión de inventarios como en la planificación de rutas, y, especialmente, en la interconexión entre ambos procesos. A continuación, se detallan las funciones y las formas en que la digitalización permite implementar estas tecnologías de manera eficiente:

5.1.1 SLA 4.0: digitalización en la gestión de inventarios.

La aplicación de la digitalización en la gestión de inventarios bajo el SLA 4.0 persigue un equilibrio estratégico entre satisfacer la demanda sin incurrir en sobre stock o rupturas de stock a la vez que se optimizan los costos operativos y se mantiene una visibilidad permanente del estado del almacén. Para lograrlo, se requiere implementar tecnologías que monitoreen, analicen y optimicen el flujo de productos con precisión, y en tiempo real, tales como:

A) Gemelos digitales y sensores IoT: La implementación de gemelos digitales es esencial para alcanzar una gestión inteligente de inventarios, ya que funcionan como réplicas virtuales de los almacenes. Esta estrategia se basa en la integración de sensores IoT como RFID, GPS y sensores de temperatura y humedad, que permiten monitorear en tiempo real el estado y la localización de los productos.

Los sensores IoT recopilan y almacenan datos de manera continua, garantizando una trazabilidad precisa y una visibilidad completa de los movimientos de los productos (Canle, 2022). La integración de los gemelos digitales en el SLA 4.0 no solo facilita conocer el estado actual del almacén y los inventarios, sino que también permite anticipar las necesidades de reabastecimiento, evitando tanto las roturas de stock como el sobre almacenamiento.

Además, el control dinámico del inventario mediante gemelos digitales y sensores IoT posibilita la gestión en tiempo real de los movimientos de los productos, diferenciando entre los artículos retirados de las estanterías y los despachados fuera del almacén. Esto asegura que el inventario refleje con precisión el estado actual de los productos y evita diferencias en los registros.

B) IA para aprendizaje automático: La IA desempeña un papel crucial en el SLA 4.0 para la gestión de inventarios, especialmente a través de algoritmos de machine learning que facilitan una clasificación ABC dinámica de los productos.

Eduar Aponte Parejo

De acuerdo con Toyota, la clasificación ABC segmenta los productos en tres categorías: A “Alta rotación”, B “Rotación media” y C “Baja rotación” (Toyota, 2022). De esta manera, la IA puede categorizar los productos automáticamente y ajustar esta clasificación en función de tendencias de compra, condiciones climáticas y eventos locales, asegurando que los artículos de mayor demanda se ubiquen estratégicamente en el almacén para agilizar su acceso y despacho.

Además, el uso de simulaciones “What-If” basadas en IA predictiva y el gemelo digital, permite modelar escenarios críticos como huelgas logísticas, desastres naturales o interrupciones en el suministro. Estas simulaciones facilitarían la implementación de planes de contingencia para garantizar la continuidad de las operaciones, un ejemplo de la relevancia de contar con esta capacidad de previsión es el incidente ocurrido en marzo de 2021, cuando el encallamiento del buque Ever Given en el canal de Suez generó pérdidas globales por 52 mil millones de dólares debido a la interrupción de la cadena de suministro (Marsh, 2021).

C) Edge computing: El uso de edge computing es esencial para asegurar que los datos recopilados se procesen con rapidez, ya que esta tecnología permite analizar la información cerca del punto de origen, es decir, se podría implementar el uso de servidores locales en los propios almacenes. Esto no solo reduciría la latencia, sino que también garantiza que las alertas generadas por el sistema se validen en el menor tiempo posible.

D) Smart bills (IA predictiva): La gestión predictiva de abastecimiento mediante smart bills (facturas inteligentes) tiene como propósito evaluar en tiempo real el desempeño de los proveedores considerando factores como los tiempos de entrega, la calidad y la fiabilidad, de esta manera al detectar riesgos de incumplimiento, la IA activa protocolos automáticos que van desde alertas preventivas hasta órdenes de compra alternativas, asegurando continuidad operativa con inventarios ajustados a la necesidad real.

5.1.2 SLA 4.0: digitalización en la planificación inteligente de rutas.

La planificación de rutas bajo el SLA 4.0 trasciende la simple optimización de trayectos, ya que se busca configurar un ecosistema adaptativo donde converjan la eficiencia operativa, la sostenibilidad ambiental y la transparencia entre clientes y proveedores. Este enfoque se sustenta en tres aspectos fundamentales:

1. Cálculo dinámico de rutas que minimicen emisiones y congestión.
2. Retroalimentación bidireccional con los sistemas de inventario.
3. Interoperabilidad tecnológica para decisiones autónomas.

La clave para alcanzar este objetivo radica en la integración de IA, gemelos digitales, IoT y cloud computing, permitiendo la toma de decisiones basadas en datos actualizados, la sinergia entre estas tecnologías redefine los paradigmas de la distribución física, transformando las flotas en redes neuronales móviles capaces de tomar las mejores decisiones en tiempo real.

A continuación, se detalla cómo se podrían implementar dichas tecnologías:

A) IA para análisis predictivo: Para una planificación óptima de rutas, la IA debería analizar múltiples variables en tiempo real, como el tráfico, las condiciones climáticas, el tipo de carga y la prioridad de las entregas. Esto podría lograrse mediante algoritmos

Eduar Aponte Parejo

predictivos que no solo consideren el historial de tráfico y las restricciones viales, sino que también se adapten dinámicamente a cambios imprevistos, como accidentes o bloqueos.

La conexión de la IA a plataformas de datos en tiempo real mediante APIs facilitaría el ajuste de rutas según las circunstancias, garantizando que los vehículos eviten rutas congestionadas o afectadas por condiciones adversas, optimizando tanto los tiempos de entrega como el consumo de combustible.

La capacidad de la IA para realizar reasignaciones automáticas de entregas sería esencial para mantener la eficiencia operativa, ya que en caso de fallas mecánicas o retrasos inesperados, la IA debería identificar los vehículos cercanos disponibles y reasignar las entregas para minimizar los tiempos de espera. Asimismo, el sistema podría permitir a los clientes modificar el destino de los pedidos en tiempo real, recalculando automáticamente la ruta para validar la viabilidad de la entrega. Esta flexibilidad no solo mejoraría la satisfacción del cliente, sino que también maximizaría la utilización de los recursos logísticos.

B) Gemelos digitales: El uso de gemelos digitales, respaldado por una red de sensores IoT instalados en vehículos y mercancías, permitiría crear réplicas virtuales de las rutas, con esta tecnología se facilitaría el monitoreo en tiempo real de variables como la temperatura, la humedad y el estado de la carga mientras se transportan, garantizando una trazabilidad precisa de los envíos.

Además, los gemelos digitales no solo facilitarían la trazabilidad, sino que también permitirían anticipar problemas potenciales, como el deterioro de productos sensibles a la temperatura o las vibraciones excesivas durante el transporte. La capacidad de simular rutas y evaluar diferentes escenarios mediante machine learning aseguraría que las decisiones tomadas por la IA sean las más eficientes tanto en términos de tiempo como de seguridad.

Asimismo, esta simulación permitiría identificar posibles cuellos de botella y optimizar el uso de la flota de vehículos, garantizando que los recursos se utilicen de manera eficiente.

C) Cloud computing y acceso a datos: En un entorno digitalizado, es fundamental contar con información en tiempo real y contrario al edge computing que puede usar servidores locales en los almacenes, en las rutas de transporte no sería viable esta práctica, es por ello que el uso de cloud computing sería indispensable para el almacenamiento y procesamiento de grandes volúmenes de datos de forma eficiente, ya que esta tecnología permitiría que los vehículos accedieran a información crítica en cualquier momento, sin importar su ubicación, asegurando que las decisiones se basen siempre en datos actualizados.

El cloud facilitaría la transmisión de información sobre el estado del tráfico, las condiciones meteorológicas y las restricciones viales directamente a los sistemas de planificación de rutas, permitiendo ajustes dinámicos. Además, el almacenamiento de datos históricos en la nube posibilitaría el uso de análisis predictivo para mejorar la planificación futura, anticipándose a patrones de demanda y ajustando las rutas en consecuencia.

D) Blockchain para seguridad y trazabilidad: La gestión de inventarios en tránsito sería otro componente esencial del SLA 4.0, permitiendo que el inventario en los vehículos se actualice en tiempo real cada que se realice una entrega o haga un reaprovisionamiento, esto mediante el uso de etiquetas RFID y blockchain.

La implementación de blockchain garantizaría la integridad y seguridad de los datos, eliminando errores manuales y asegurando una sincronización precisa con el gemelo digital.

5.1.3 SLA 4.0: digitalización de la interconexión entre la gestión de inventarios y la planificación de rutas.

Como ha sido comentado anteriormente, la logística 4.0 no aborda los procesos de la cadena de suministro de manera aislada, sino que los integra y gestiona de forma conjunta, demostrando que la verdadera eficiencia de los modelos basados en tecnología radica en la comunicación constante entre los distintos procesos y sistemas, facilitando el intercambio seguro y en tiempo real de datos críticos para la toma de decisiones.

Bajo esta premisa se plantea que la ventaja competitiva del SLA 4.0 radica en la interconexión digital efectiva entre la gestión de inventarios y la planificación de rutas, buscando garantizar que los datos fluyan de manera continua y segura entre ambos procesos, permitiendo decisiones coordinadas y optimizadas. Para lograrlo, se proponen los siguientes mecanismos:

A) Sincronización en tiempo real: La interconexión debe basarse en la sincronización inmediata de los sistemas, por ejemplo, cuando el gemelo digital del almacén registre una salida de productos, el gemelo digital de distribución recibiría automáticamente esta información y generaría una ruta optimizada. Esta sincronización permitiría que la planificación de rutas se ajuste dinámicamente según la disponibilidad de inventario, evitando retrasos y garantizando una gestión eficiente.

Además, para asegurar la precisión y seguridad en los envíos, el modelo debería incorporar auditorías inteligentes que validen las cantidades y condiciones de los productos en cada etapa del proceso, de esta manera antes de cargar los vehículos, el sistema ejecutaría un control cruzado entre el gemelo digital del almacén y el gemelo digital de distribución para evitar faltantes o excesos, así una vez que el pedido llegue al cliente, este confirmaría la recepción, en dado caso, se llegase a detectar alguna diferencia en la cantidad recibida, el sistema emitiría una alerta automática para su análisis.

B) Blockchain como garantía de seguridad: Para el SLA 4.0, el blockchain jugaría un papel clave en la interconexión entre la gestión de inventarios y la planificación de rutas, ya que sería la tecnología encargada de garantizar la integridad y seguridad de la información compartida.

El blockchain permitiría asegurar que los datos utilizados sean confiables y puedan ser aprovechados para tomar decisiones informadas, minimizando los riesgos asociados a la gestión de inventarios y la planificación de rutas. Además, al garantizar la inmutabilidad de los datos, esta tecnología facilitaría la trazabilidad completa de los productos desde el almacén hasta el cliente final, reduciendo errores y posibles fraudes en la cadena de suministro.

C) IA “el director de orquesta logístico”: La IA desempeñaría un papel fundamental en la planificación de rutas, ajustándolas en función de la disponibilidad de inventario y las condiciones en tiempo real, como el tráfico, el clima y los incidentes viales.

Si un producto no estuviera disponible en un almacén específico, el sistema buscaría automáticamente otra sucursal o centro de distribución cercano que tuviera existencias, ajustando la ruta para minimizar los tiempos de entrega, adicionalmente, si un producto

Eduar Aponte Parejo

tuviera baja rotación y estuviera almacenado en exceso en una ubicación específica, la IA recomendaría su reasignación a otro almacén o su inclusión en futuras entregas, optimizando así el uso del espacio disponible, este enfoque dinámico garantizaría que los vehículos se desplacen con la máxima eficiencia, reduciendo los kilómetros recorridos sin carga y disminuyendo los costos operativos.

Por otro lado, el modelo predictivo de IA no solo gestionaría las entregas, sino que también analizaría tendencias de consumo y proyecciones de demanda, permitiendo que los almacenes se preparen anticipadamente con el inventario necesario.

Si la IA detectara que ciertos productos tienen alta demanda en una región específica, el sistema sugeriría reabastecer los almacenes cercanos antes de que las existencias se agoten. Además, si un producto presentara una alta tasa de devoluciones, el sistema ajustaría la planificación de rutas para recogerlo y reasignarlo dentro del inventario, evitando pérdidas por desabastecimiento o sobre stock.

Una vez analizada la implementación de la digitalización en la gestión de inventarios, la planificación de rutas y su integración, se puede afirmar que esta constituye el núcleo operativo y estratégico del SLA 4.0, redefiniendo los procesos logísticos de la siguiente manera:

- En la gestión de inventarios, el uso de gemelos digitales, sensores IoT y algoritmos de IA permite mantener un equilibrio dinámico entre demanda y stock, mientras que el edge computing y las smart bills optimizan la toma de decisiones en tiempo real.
- En cuanto a la planificación de rutas, la simulación predictiva, cloud computing y el blockchain convierten las flotas en redes autónomas adaptativas, reduciendo las emisiones y aumentando la eficiencia operativa.
- Finalmente, la integración de ambos procesos se basa en una sincronización precisa, donde la IA coordina las operaciones, el blockchain garantiza la trazabilidad y los gemelos digitales reflejan con exactitud cada movimiento físico en su contraparte virtual, este enfoque integrado no solo mejora la eficiencia y flexibilidad del sistema logístico, sino que también fortalece su sostenibilidad, minimizando desperdicios y optimizando el uso de los recursos disponibles.

5.2 Roadmap SLA 4.0: un camino estratégico hacia la transformación digital.

La implementación del SLA 4.0 va más allá de la adopción tecnológica; requiere una reestructuración cultural y operativa que alinee a las personas, los procesos y los datos en un modelo centrado en la optimización dinámica de la gestión de inventarios y la planificación de rutas. Para lograrlo, resulta fundamental establecer una estrategia clara mediante un roadmap o hoja de ruta, ya que, como indica ADEN, el proceso de digitalización comienza con la definición de una estrategia clara, una hoja de ruta personalizada para cada organización, considerando que la transformación digital es única para cada entidad, adaptándose a sus necesidades y objetivos específicos (ADEN, 2024).

Según el Banco Santander, un roadmap o hoja de ruta es un documento que sirve como guía para la ejecución de un proyecto, detallando todos los pasos necesarios para convertir una idea en una realidad. (Santander Universidades, 2022). En este contexto, la digitalización es la columna vertebral del SLA 4.0, pero su implementación debe estar respaldada por una estrategia bien definida que garantice resultados sostenibles y alineados con la optimización dinámica.

Eduar Aponte Parejo

Solo con una estrategia bien definida se podrá garantizar el éxito de la transformación digital, permitiendo que cada fase tecnológica se implemente de manera eficaz y alineada con los objetivos organizacionales. Para estructurar esta estrategia hacia un entorno logístico inteligente y digitalizado, se seguirán los pasos de transformación tecnológica de SAP, organizados en siete etapas interconectadas (ilustración 2).

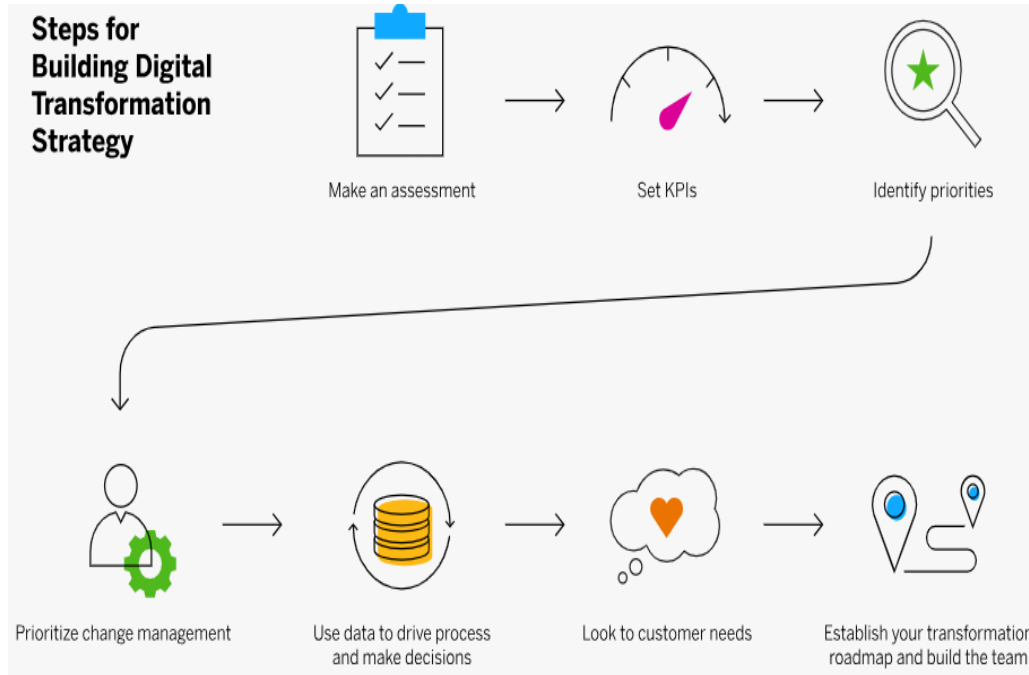


Ilustración 2 Steps for building digital Transformation Strategy

FUENTE: SAP

1) Evaluación del estado actual.

El primer paso en la hoja de ruta del SLA 4.0 es realizar una auditoría exhaustiva de los activos, sistemas y procesos logísticos existentes. Esto permitirá determinar el nivel de madurez tecnológica y definir las capacidades a desarrollar para alcanzar la transformación digital, algunas evaluaciones que se pueden realizar son:

- **Análisis de infraestructura:** Identificación de herramientas tecnológicas ya implementadas y su compatibilidad con el SLA 4.0.
- **Evaluación de procesos:** Diagnóstico de flujos operativos en la gestión de inventarios y planificación de rutas.
- **Análisis de la competencia:** Benchmarking de estrategias de digitalización exitosas en el sector.
- **Identificación de brechas:** Definición de carencias tecnológicas y formación del personal en tecnologías 4.0.

2) Definición de KPI realistas: medir lo que importa.

Existe una frase célebre que establece “lo que no se mide, no se puede mejorar”. La transformación digital requiere indicadores clave de rendimiento (KPIs) alineados con los

Eduar Aponte Parejo

objetivos del SLA 4.0, los cuales deben ser SMART (específicos, medibles, alcanzables, relevantes y temporales). Algunos puntos a los cuales deben apuntar los KPIs son:

- **Eficiencia en inventarios:** Nivel de reducción del stock muerto y mejora en la exactitud de registros.
- **Optimización de rutas:** Reducción de tiempos de entrega y consumo de combustible.
- **Automatización de decisiones:** Evaluación de la precisión de modelos predictivos en la planificación de rutas.

3) Priorización de iniciativas: de lo urgente a lo estratégico.

Dado que la transformación digital es un proceso gradual, se deben identificar iniciativas de alto impacto que generen resultados tangibles en las primeras etapas de implementación del SLA 4.0, tales como:

- **Automatización de tareas repetitivas:** Uso de IA con machine learning para la previsión de demanda y ajuste dinámico de rutas.
- **Integración de IoT en almacenes:** Implementación de sensores IoT en almacenes para visibilidad en tiempo real, reduciendo errores de inventario.
- **Pruebas piloto en planificación de rutas:** Simulación con gemelos digitales para evaluar distintos escenarios antes de la ejecución.

4) Gestión del cambio: reprogramar el ADN organizacional.

Como afirman Carmody, Greco y Montgomery, la transformación digital exige un cambio de mentalidad colectivo (Carmody, Greco, & Montgomery, 2024). La digitalización del SLA 4.0 requiere que toda la organización adopte una mentalidad basada en datos, superando la resistencia al cambio mediante:

- **Capacitación del personal:** Desarrollo de competencias digitales en logística 4.0
- **Cultura organizacional:** Promoción de una mentalidad de innovación y toma de decisiones basadas en datos.
- **Liderazgo digital:** Los directivos deben actuar como facilitadores del cambio.

5) Uso de datos: el combustible del SLA 4.0.

La analítica de datos es un pilar esencial en la transformación digital del SLA 4.0, la correcta interpretación de la información permite mejorar la eficiencia operativa y anticipar tendencias mediante:

- **Big data y analítica avanzada:** Uso de datos estructurados y no estructurados para la optimización dinámica de rutas e inventarios.
- **Modelos predictivos:** Implementación de IA para anticipar cambios en la demanda.
- **Rutas auto adaptativas:** Integración de APIs de tráfico y estado de carga (sensores IoT) para recalcular trayectos al instante.

Eduar Aponte Parejo

6) Cliente como eje: personalización logística.

La digitalización no solo debe centrarse en la optimización interna, sino también en mejorar la experiencia del cliente, por este motivo es esencial que el SLA 4.0 cuente con:

- **Trazabilidad en tiempo real:** Blockchain e IoT para ofrecer visibilidad total del estado del pedido.
- **Personalización de servicios:** IA para ajustar la logística según las preferencias del cliente.
- **Feedback proactivo:** Análisis de reseñas en redes sociales para ajustar la reposición de productos.

7) Roadmap ejecutable: de la teoría a la acción

Un plan estratégico bien definido es esencial para la transformación del SLA 4.0, por este motivo se debe realizar:

- **Desarrollo de un roadmap detallado:** Definición de plazos, recursos y responsables.
- **Selección de proveedores tecnológicos:** Alianzas con especialistas en tecnologías 4.0.
- **Formación de equipos interdisciplinarios:** Integración de expertos en logística, datos y tecnología.

Al validar los pasos que SAP establece para crear una estrategia de transformación digital en el SLA 4.0, se puede observar que esta no es un simple Check list tecnológico, sino un ecosistema vivo donde cada etapa refuerza la interconexión entre inventarios y rutas con las personas, clientes y toma de decisiones basadas en datos.

5.3. Ventajas y beneficios de implementación del SLA 4.0.

A continuación se detallan las principales ventajas que se pueden llegar a obtener si se implementa el SLA 4.0:

1. **Eficiencia operativa y optimización de los procesos:** El SLA 4.0 automatiza tareas repetitivas y sincroniza en tiempo real la gestión de inventarios y rutas, permitiendo un control logístico continuo y preciso. Como señala Amazon, la implementación de tecnologías como la IA “permite a las empresas reducir el tiempo manual dedicado a los procesos empresariales repetitivos y minimizar los errores humanos. Con menos intervención humana, las empresas ahorran tiempo y dinero, optimizan recursos y mejoran los flujos de trabajo” (Amazon, 2023).

Por su parte, la implementación de gemelos digitales mejora la eficiencia operativa al ofrecer una representación virtual de los almacenes y flotas, lo que reduce tiempos de respuesta y permite operar de manera ininterrumpida sin las limitaciones humanas.

Asimismo, la clasificación ABC dinámica basada en machine learning, optimiza la segmentación del inventario según la demanda, agilizando el picking y reduciendo los tiempos de preparación de pedidos. Sander Aerts, director logístico de Toyota, destaca que la automatización en los almacenes mejora la eficiencia al proporcionar visibilidad total de los artículos y su ubicación, permitiendo que las máquinas agilicen tareas repetitivas y liberando al personal para actividades de mayor valor (Aerts, 2022).

Eduar Aponte Parejo

- 2. Toma de decisiones proactiva basada en datos:** El uso de analítica predictiva y gemelos digitales transforma datos brutos en información estratégica, mejorando la toma de decisiones en la empresa. Como indica Tim Mucci, de IBM, “la toma de decisiones basada en datos se ha convertido en un pilar fundamental para el éxito empresarial. Al priorizar el uso de datos y análisis sobre la intuición, las organizaciones pueden tomar decisiones más informadas y estratégicas” (Mucci, ¿En qué consiste la toma de decisiones basada en datos?, 2024).

Este enfoque proactivo basado en datos permite anticipar tendencias, reducir riesgos y optimizar procesos, garantizando mayor precisión y eficiencia operativa. Por ejemplo, la IA predice fluctuaciones de demanda y ajusta inventarios en tiempo real, evitando sobrecostos por exceso de stock o pérdidas por desabastecimiento.

- 3. Resiliencia y adaptabilidad ante disrupciones:** El modelo propuesto fortalece la continuidad operativa mediante modelos predictivos capaces de simular y anticipar escenarios críticos, como huelgas, desastres naturales o crisis globales. Esta capacidad permite ajustes dinámicos en los inventarios y rutas de distribución, asegurando una gestión eficiente en entornos de alta incertidumbre.

Un ejemplo de la importancia de esta capacidad fue el impacto del COVID-19 en la cadena de suministro, que ocasionó “interrupciones en la cadena de suministros y el mercado, en donde los niveles de inventario se vieron cortados o, por otra parte, aumentados en exceso” (Hasbum, y otros, 2022).

- 4. Colaboración en el ecosistema logístico:** El SLA 4.0 fomenta la integración de proveedores y clientes mediante el uso de blockchain, garantizando transparencia y trazabilidad en la cadena de suministro.

Además, la implementación de smart bills y APIs de comercio electrónico permite la automatización de compras en caso de fallos en el abastecimiento, creando una red logística más ágil y eficiente.

Como señala Fulfillment Hub USA la colaboración en la cadena de suministro es un factor clave para el éxito empresarial, ya que permite “optimizar procesos, reducir costos, mejorar la eficiencia y anticiparse a los cambios del mercado” (Fulfillment Hub USA, 2024).

- 5. Seguridad y control de la información:** La integración de blockchain en la gestión de inventarios y rutas de transporte garantiza la inmutabilidad de los registros fortaleciendo la seguridad y transparencia en la cadena de suministro. Este enfoque minimiza errores administrativos y costos de transacción, agilizando los procesos logísticos.

Según IBM, esta tecnología proporciona múltiples beneficios para las empresas, especialmente en términos de “confianza, seguridad y trazabilidad de los datos dentro de una red empresarial”, reduciendo costos operativos al eliminar intermediarios y automatizar procesos (IBM, 2022).

- 6. Precisión y escalabilidad mediante IA:** La implementación de IA en el SLA 4.0 permite optimizar y escalar procesos operativos con mayor precisión y eficiencia.

Como señala el Consejo Profesional de Administración Pública de Colombia, “La inteligencia artificial está transformando la manera en que las empresas optimizan sus

Eduar Aponte Parejo

procesos, desde la producción hasta la gestión de la cadena de suministro, la IA permite mejorar la eficiencia y reducir costos” (Consejo Profesional de Administración Pública de Colombia, 2024).

7. **Procesamiento de datos en tiempo real:** El acceso inmediato a datos en tiempo real optimiza la toma de decisiones y mejora la capacidad de respuesta ante cambios en la demanda o condiciones de distribución.

Tal como menciona Hewlett Packard Enterprise (HPE): “Las organizaciones se benefician enormemente de los datos en tiempo real, ya que permiten mejorar las operaciones, optimizar resultados y mejorar la experiencia del cliente” (HPE, 2023).

El SLA 4.0 trasciende la optimización técnica, es un ecosistema estratégico que combina datos, tecnología y colaboración humana. Desde la reducción de costos hasta la mitigación de riesgos, sus beneficios se verán materializados en una cadena de suministro ágil, sostenible y preparada para los desafíos del siglo XXI.

5.4. Desafíos en la implementación del SLA 4.0.

La implementación del SLA 4.0 promete transformar la gestión de inventarios y la planificación de rutas, mejorando la eficiencia operativa y optimizando la toma de decisiones. Sin embargo, este proceso enfrenta desafíos significativos que deben abordarse con estrategias adecuadas. A continuación, se detallan algunos de los principales desafíos identificados:

1. **Complejidad en la integración tecnológica:** El SLA 4.0 requiere la sincronización de múltiples tecnologías como IA, IoT, blockchain y gemelos digitales, lo que demanda un diseño complejo y una planificación detallada para garantizar su interoperabilidad, ya que todos estos son sistemas heterogéneos. Los sistemas heterogéneos “Se refieren a entornos en los que diferentes componentes, dispositivos o elementos poseen características, arquitecturas o capacidades distintas” (Quiroz, 2023).

Coordinar múltiples sistemas dentro de una empresa es un desafío clave, como lo demuestra el caso de Zappos, que en 2021 sufrió interrupciones en su cadena de suministro debido a problemas de integración entre su nuevo sistema de gestión de inventario y su plataforma de atención al cliente, resultando en decisiones ineficaces de reabastecimiento, afectando la disponibilidad de productos populares. Al final, la empresa solucionó la crisis desarrollando una API personalizada para transmitir datos en tiempo real entre sus sistemas (Psico-smart, 2024).

Este caso refleja que los problemas de integración pueden afectar seriamente la operación, pero también que existen soluciones efectivas, como el uso de interfaces bien estructuradas y pruebas piloto previas a la implementación total.

2. **Resistencia al cambio organizacional:** Uno de los principales retos en la adopción de la transformación digital es la resistencia de los empleados a modificar procesos y roles tradicionales. Estudios de McKinsey y Harvard Business Review revelan que la mayoría de los proyectos de transformación empresarial fracasan, no por fallas tecnológicas, sino por falta de planificación, comunicación y gestión del cambio. La clave del éxito radica en priorizar la transformación cultural, asegurando la participación y aceptación de todos los equipos involucrados (SAP, 2021).

Además, la falta de personal capacitado representa una barrera para la adopción de tecnologías avanzadas. Un estudio de Microsoft e IDC (firma mundial de inteligencia

Eduar Aponte Parejo

de mercado) realizado a más de 2.000 empresas líderes en la implementación de IA, reveló que el 52% considera que la escasez de talento es el mayor obstáculo para implementar y escalar la IA (Microsoft, 2023).

Esto resalta la importancia de invertir en capacitación del talento humano y en programas de adaptación organizacional para maximizar el éxito del SLA4.0.

3. **Dependencia de datos precisos y privacidad:** El éxito del SLA 4.0 depende de la disponibilidad y precisión de los datos, lo que puede verse afectado por errores en la captura, falta de estandarización o registros incompletos. Como indica ScienceDirect, la dependencia de los datos “puede generar problemas en la ejecución simultánea de instrucciones y debe gestionarse para garantizar la ejecución correcta del programa” (ScienceDirect, 2021).

Además, la recolección masiva de datos plantea desafíos legales y éticos, la normativa GDPR (Reglamento General de Protección de Datos) en la Unión Europea establece requisitos estrictos sobre la recopilación, almacenamiento y gestión de información personal, con sanciones que pueden alcanzar el 4% de los ingresos globales en caso de incumplimiento (UE, 2018).

Para mitigar estos riesgos, es esencial que las empresas adopten estrategias de gobernanza de datos, como la anonimización de información sensible y el cumplimiento de estándares de ciberseguridad.

4. **Costo elevado de implementación inicial:** La adopción de tecnologías 4.0 requiere una inversión significativa en infraestructura, software y capacitación del personal, lo que puede ser prohibitivo para pequeñas y medianas empresas. Sin embargo, como menciona Forbes, “aún persiste la falsa creencia de que incursionar en tecnología 4.0 exige grandes inversiones. Lo cierto es que siempre será más costoso no hacerlo” (Forbes, 2019). El Connected Manufacturing Forum, un evento que reúne a líderes industriales globales ha identificado que aquellas empresas que han retrasado la transformación digital ahora enfrentan un rezago competitivo, ya que la falta de innovación dificulta su sostenibilidad en el mercado (Forbes, 2019).

Por lo tanto, aunque el costo inicial pueda parecer elevado, la falta de inversión en tecnología puede representar un riesgo mayor a largo plazo.

5. **Falta de claridad en el ROI (retorno de inversión):** Un desafío común en la implementación de proyectos tecnológicos es que los beneficios no siempre son visibles a corto plazo. Un informe de Gartner predice que para 2028 más del 50% de las empresas que han desarrollado modelos de IA desde cero abandonarán sus esfuerzos debido a los altos costos y la complejidad técnica (Wiles, 2023). Sin embargo, estudios de Microsoft e IDC (Microsoft, 2023) demuestran que:
 - El 92% de las implementaciones de IA tardan menos de 12 meses en completarse.
 - Las empresas comienzan a obtener retorno de inversión en un promedio de 14 meses.
 - Por cada dólar invertido en IA, se obtiene un rendimiento promedio de 3,5 veces.

Esto demuestra que, aunque la inversión inicial pueda ser alta, los beneficios operativos y estratégicos se consolidan a mediano y largo plazo, justificando el esfuerzo financiero inicial.

Eduar Aponte Parejo

6. **Interoperabilidad de sistemas y protocolos:** Un aspecto clave del SLA 4.0 es la integración fluida de múltiples sistemas y herramientas, lo cual es complejo debido a la falta de estándares universales. Como menciona ScienceDirect, “lograr la interoperabilidad de datos puede ser un desafío debido a la heterogeneidad entre los modelos y la necesidad de mediación de datos para manejar diferencias en nombres, escalas y representaciones” (ScienceDirect, 2022).

La plataforma SOAINT enfatiza que la adopción de estándares comunes y la modernización de sistemas son esenciales para garantizar una integración eficiente, permitiendo una mejor comunicación entre los diferentes sistemas y reduciendo el riesgo de incompatibilidades (SOAINT, 2024).

Si bien la implementación del SLA 4.0 representaría un avance significativo en la gestión logística, también conlleva desafíos técnicos, organizacionales y económicos que deben ser abordados con una planificación estratégica adecuada.

Sin embargo, a pesar de los desafíos, las tendencias globales indican que no invertir en el SLA 4.0 puede representar un riesgo aún mayor, ya que las empresas que no modernicen sus procesos enfrentarán una pérdida de competitividad frente a aquellas que sí adopten tecnologías emergentes.

La clave para una implementación exitosa radica en:

- Diseñar estrategias de integración tecnológica eficientes.
- Invertir en capacitación y cambio cultural dentro de la organización.
- Implementar sistemas de gobernanza de datos para garantizar calidad y seguridad.
- Realizar una evaluación realista del retorno de inversión a largo plazo.

Con una ejecución adecuada, el SLA 4.0 no solo mejorará la eficiencia y sostenibilidad de la gestión de inventarios y la planificación de rutas, sino que también generará ventajas competitivas duraderas en el mercado global.

5.5. Optimización logística y desarrollo sostenible: La conexión entre el SLA 4.0 y los ODS

La implementación del SLA 4.0 no solo transforma la gestión de inventarios, la planificación de rutas y su interconexión, sino que también actúa como un puente estratégico para alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) establecidos por la ONU.

Pero ¿Cómo logra el SLA 4.0 ayudar a la consecución de los ODS? La clave está en el uso de tecnologías de la logística 4.0, lo cual permite a las empresas reducir emisiones contaminantes, minimizar desperdicios y optimizar el uso de recursos naturales. De hecho, la ONU ha reconocido que las soluciones digitales pueden contribuir al logro de la mayoría de los ODS.

Entre todos los objetivos, se ha identificado que el SLA 4.0 impacta directamente en el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), ODS 12 (Producción y consumo responsables) y ODS 13 (Acción por el clima). A continuación, se detalla cómo este sistema transforma la sostenibilidad operativa y contribuye a estos ODS.

1. **ODS 9 - Industria, innovación e infraestructura:** El ODS 9 busca construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación tecnológica (UN, 2015). En este contexto, el SLA 4.0 contribuye mediante la digitalización de la infraestructura logística y el fortalecimiento de la cadena de suministro de la siguiente manera:

- **Digitalización de infraestructuras logísticas:** La implementación de gemelos digitales y algoritmos de IA permite monitorear y optimizar los flujos de productos mediante réplicas virtuales de almacenes y centros de distribución. Esto no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también reduce la necesidad de construir nuevas infraestructuras, maximizando el uso de las existentes.
- **Blockchain en la gestión de proveedores:** La trazabilidad en tiempo real de materiales y productos garantiza cadenas de suministro más transparentes y sostenibles, promoviendo prácticas como el uso de materiales reciclados y la adopción de energías renovables en la producción.
- **Resiliencia ante crisis:** La digitalización permite anticipar y mitigar riesgos en la cadena de suministro, asegurando la continuidad operativa ante eventos disruptivos como desastres naturales, crisis sanitarias o interrupciones logísticas globales.
- **Mantenimiento predictivo con IoT:** Sensores inteligentes en maquinaria y vehículos detectan fallos antes de que ocurran, reduciendo el desperdicio de recursos energéticos y garantizando la operación eficiente de la infraestructura logística.

Estas acciones están alineadas con la meta 9.4 de los ODS, que busca “actualizar la infraestructura y reconvertir las industrias para que sean sostenibles” (UN, 2015).

2. **ODS 11 - Ciudades y comunidades sostenibles:** El ODS 11 se enfoca en lograr ciudades inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles (UN, 2015). La logística urbana juega un papel clave en este objetivo, y la implementación del SLA 4.0 introduce mejoras que optimizan la planificación de rutas y reducen el impacto ambiental de la siguiente manera:
 - **Reducción de la congestión y emisiones:** La planificación dinámica de rutas con el SLA 4.0 minimiza la circulación innecesaria de vehículos de carga, disminuyendo la congestión y reduciendo emisiones de CO₂, a la vez que se analizan datos de tráfico, contaminación y demanda en tiempo real para redirigir flotas lejos de zonas congestionadas o sensibles ambientalmente, aumentando aún más su capacidad para reducir la huella de carbono y ayudando a mejorar la calidad del aire urbano
 - **Distribución urbana sostenible:** La optimización de hubs logísticos urbanos permite el reabastecimiento eficiente con base en la demanda real, reduciendo la necesidad de grandes almacenes en zonas urbanas y minimizando los viajes de larga distancia.
 - **Mayor eficiencia en la última milla:** Al integrar tecnologías de análisis predictivo, se acortan los tiempos de entrega y se reducen los costos logísticos, mejorando la experiencia del cliente y contribuyendo a ciudades más organizadas y eficientes.

Eduar Aponte Parejo

- **Logística inversa automatizada:** En el SLA 4.0 se identifican productos devueltos o en desuso y los reintegran al ciclo productivo mediante rutas optimizadas, evitando que terminen en vertederos urbanos.

Estas acciones impactan directamente en la meta 11.6, que busca “reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, prestando especial atención a la calidad del aire” (UN, 2015). Esto se logra al transformar la logística urbana de un factor de congestión a un motor de sostenibilidad.

3. **ODS 12 - Producción y consumo responsable:** El ODS 12 promueve modelos de producción y consumo sostenibles, reduciendo el desperdicio de recursos naturales (UN, 2015). El SLA 4.0 optimiza estos procesos al mejorar la gestión de inventarios y la planificación logística de la siguiente manera:

- **Optimización del inventario para reducir desperdicios:** La digitalización permite prever patrones de demanda y ajustar los niveles de inventario en tiempo real, evitando excesos de stock y reduciendo productos vencidos o deteriorados.
- **Menor consumo de materiales y energía:** Al integrar blockchain y gemelos digitales, se optimiza el uso de insumos, minimizando errores administrativos y reduciendo el consumo innecesario de embalajes.
- **Fomento de la logística circular:** La digitalización del SLA 4.0 facilita la recuperación, reutilización y reciclaje de productos, promoviendo un modelo de economía circular en la cadena de suministro.

El SLA 4.0 está alineado con la meta 12.2, que busca “lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales” (UN, 2015). Esto se logra al convertir la logística en un filtro que prioriza la eficiencia de recursos sobre el volumen.

4. **ODS 13 - Acción por el clima:** El ODS 13 insta a adoptar medidas urgentes contra el cambio climático (UN, 2015). En este sentido, el SLA 4.0 juega un papel clave en la transición hacia procesos logísticos más ecológicos mediante:

- **Rutas de bajo carbono:** El SLA 4.0 identifica trayectos que minimizan el consumo de combustible y las emisiones de CO₂, priorizando opciones más sostenibles.
- **Transición hacia flotas eléctricas y combustibles alternativos:** Gracias al análisis predictivo, se facilita la adopción de vehículos eléctricos y biocombustibles, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles.
- **Medición y compensación de impacto ambiental:** La digitalización permite calcular la huella de carbono en tiempo real, facilitando estrategias de compensación ambiental como la reforestación o la inversión en energías renovables.

Estas iniciativas están alineadas con la meta 13.2, que busca “incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas y estrategias nacionales” (UN, 2015). Esto

Eduar Aponte Parejo

demuestra que la logística mediante un SLA 4.0 puede ser un sector líder en la descarbonización.

Si bien se ha explicado cómo el SLA 4.0 impacta en cada ODS de manera individual, es importante resaltar que estos no actúan de forma aislada, sino que están interconectados. El verdadero valor del SLA 4.0 radica en su capacidad para generar sinergias tecnológicas que contribuyen simultáneamente a múltiples ODS. Algunos ejemplos de esta interconexión son:

- **Optimización de rutas y reducción de emisiones:** Al mejorar la planificación de rutas, se minimiza el consumo de combustible, reduciendo así las emisiones de CO₂ y contribuyendo al ODS 13 (Acción por el clima). A su vez, esta disminución de emisiones impacta en la calidad del aire urbano, alineándose con el ODS 11 (Ciudades y comunidades sostenibles).
- **Gestión eficiente del inventario y reducción del sobre stock:** La digitalización y el análisis de demanda en tiempo real evitan la acumulación innecesaria de productos, reduciendo la presión sobre los recursos naturales y apoyando el ODS 12 (Producción y consumo responsables). Al mismo tiempo, esta optimización mitiga los efectos del cambio climático, reforzando el ODS 13 (Acción por el clima).

Esto demuestra que el SLA 4.0 no es solo una herramienta tecnológica, sino un ecosistema de transformación sistémica. Al digitalizar la gestión de inventarios, la planificación de rutas y su interconexión, no solo mejora la eficiencia operativa de las empresas, sino que también tiene un impacto directo y positivo en la sostenibilidad.

A medida que la industria logística evoluciona, la adopción de sistemas como el SLA 4.0 dejará de ser únicamente una ventaja competitiva para convertirse en una necesidad que permita a las empresas cumplir con los estándares globales de sostenibilidad.

5.6. Fases de implementación y presupuesto del SLA 4.0.

La implementación del SLA 4.0 representa un proceso complejo que requiere una planificación estratégica y un presupuesto bien estructurado que garantice la optimización dinámica de inventarios, la planificación de rutas y su interconexión. Como se ha mencionado en este trabajo, la transformación digital en la logística no solo implica la adopción de tecnologías avanzadas, sino también un cambio en los procesos operativos y en la capacitación del talento humano, por tal motivo se hace necesario incorporarlos tanto en el plan de implementación como en el presupuesto.

Si bien la inversión inicial puede ser considerable, los beneficios a mediano y largo plazo en términos de eficiencia operativa, reducción de costos y optimización de recursos justifican su implementación.

5.6.1 Fases de implementación del SLA 4.0.

La implementación del SLA 4.0 es un proceso gradual y estructurado diseñado para garantizar la integración eficiente de tecnologías digitales avanzadas en la gestión de inventarios y la planificación de rutas.

Dado que un cambio de esta magnitud impacta directamente en la operatividad de la empresa, es fundamental adoptar un modelo de implementación por fases, lo que permite realizar pruebas controladas, ajustes estratégicos y una transición fluida hacia la automatización de la cadena de suministro. Cada fase tiene un propósito específico y

acciones concretas, asegurando que la transformación digital no solo sea tecnológicamente viable, sino operacionalmente efectiva y sostenible.

Fase 1- Diagnóstico y análisis inicial (duración 2 meses): Antes de adoptar cualquier tecnología, es fundamental comprender el estado actual de la empresa en términos de infraestructura, procesos logísticos y capacidades del personal. Esta fase permite identificar áreas críticas donde la digitalización generará el mayor impacto, asegurando que la transformación sea realista y alineada con las necesidades de la organización, para esto se proponen realizar las siguientes acciones o actividades:

- **Identificar procesos críticos:** Evaluar deficiencias en la gestión de inventarios y planificación de rutas para determinar las prioridades de automatización, de igual manera se deben analizar los cuellos de botella como stock sin rotación o rutas redundantes en la distribución.
- **Analizar la viabilidad tecnológica:** Estudiar la compatibilidad de las tecnologías 4.0 con los sistemas existentes en la compañía, al hablar de sistemas se destacan ERP y WMS. Además, se debe evaluar si la infraestructura actual soporta estas tecnologías o si es necesaria una actualización, por ejemplo, verificando si los servidores permiten edge computing o si deben renovarse.
- **Definir objetivos estratégicos:** Se han de establecer los KPIs para medir la eficiencia del SLA 4.0 en términos de precisión de inventario, reducción de costos logísticos y optimización de tiempos de entrega. Estos indicadores deben alinearse con el Roadmap definido previamente.
- **Evaluar la infraestructura:** Se debe realizar una auditoría de los sistemas actuales para detectar brechas tecnológicas y necesidades de actualización.

Una vez finalice esta fase se debe contar con un documento de diagnóstico detallado, el cual debe incluir las oportunidades y riesgos, definiendo los recursos tecnológicos y humanos necesarios para la transformación digital del SLA 4.0. Sin un diagnóstico preciso, la implementación podría desviarse hacia soluciones incongruentes con las necesidades reales de la empresa.

Fase 2- Diseño del modelo de integración y pilotaje (duración 4 meses): Antes de implementar el SLA 4.0 a gran escala, es crucial desarrollar un modelo de integración y realizar pruebas piloto para validar la interoperabilidad tecnológica en un entorno controlado, una buena manera de realizar el pilotaje es mediante pruebas de:

- **Interconexión de sistemas:** Se debe realizar el diseño de la integración entre gestión de inventarios, planificación de rutas y la cadena de suministro mediante plataformas digitales en la nube.
- **Definición de arquitectura tecnológica:** Seleccionar las herramientas para el manejo e integración de las tecnologías 4.0 para centralizar el procesamiento de datos y generar modelos predictivos.
- **Pruebas piloto en gestión de inventarios:** Implementación de gemelos digitales y sensores IoT en un almacén modelo para monitoreo en tiempo real, mientras se realizan simulaciones de reabastecimiento y control de stock con IA.

Eduar Aponte Parejo

- **Pruebas de IA predictiva en planificación de rutas:** Pruebas de la optimización de rutas de distribución con análisis en tiempo real de tráfico, clima y restricciones logísticas.
- **Pruebas piloto en la interconexión de la gestión de inventarios y planificación de rutas:**
 - Integración de gemelos digitales y blockchain para garantizar la sincronización entre inventario disponible y la asignación de rutas.
 - Implementación de un sistema de respuesta dinámica, donde los cambios en la demanda o disponibilidad de productos ajustan automáticamente las rutas.
 - Validación de la interoperabilidad de APIs de inventarios y planificación de rutas, asegurando la coordinación entre sistemas de almacenamiento y transporte.

Con esta fase se busca obtener una validación de modelos predictivos de inventario, planificación de rutas y su interconexión, asegurando que la tecnología propuesta funciona en condiciones reales antes del despliegue total. Adicionalmente, el obtener un piloto exitoso genera confianza y justifica la inversión necesaria para la siguiente etapa.

Fase 3 - Adquisición e instalación de tecnologías (duración 10 meses): Una vez se hayan validado los modelos pilotos, se inicia la adquisición de hardware y software para expandir la transformación digital, las acciones clave que se proponen para realizar en esta fase son:

- **Implementación de sensores IoT:** Para monitoreo en tiempo real de inventarios y vehículos de distribución.
- **Integración de blockchain:** Para garantizar trazabilidad y seguridad en la cadena de suministro.
- **Despliegue de IA y gemelos digitales:**
 - Sincronización de inventarios y planificación de rutas mediante APIs interconectadas.
 - Creación de modelos de simulación para optimizar la eficiencia operativa.
- **Automatización de compras:** Implementación de smart bills, permitiendo reabastecimiento automático basado en umbrales de stock críticos.
- **Implementación de cloud computing y edge computing:**
 - Cloud computing: Centralización del almacenamiento y procesamiento de datos en servidores en la nube, permitiendo acceso en tiempo real a información sobre inventarios y rutas.
 - Edge computing: Implementación o actualización de servidores locales en los almacenes para reducir la latencia en el procesamiento de datos.

En esta fase se realiza todo el proceso de negociar con proveedores, crear relaciones con especialistas en tecnología 4.0, evitar cuellos de botella en la cadena de suministro de hardware, y realizar otras pruebas en sistemas críticos. Esto con el fin de contar con una

Eduar Aponte Parejo

infraestructura tecnológica completamente funcional, lista para su despliegue operativo a gran escala.

Fase 4 - Puesta en marcha (duración 4 meses): En esta fase se despliega el SLA 4.0, de esta manera se busca la transición hacia una gestión de inventarios y planificación de rutas automatizada y optimizada con toma de decisiones basada en análisis de datos en tiempo real. Es importante destacar que en esta fase se deben de ir realizando ajustes paramétricos para cumplir con los diferentes requisitos que requiera cada compañía

Fase 5 - Capacitación del personal (duración 2 meses, en paralelo al comienzo de la puesta en marcha): La tecnología por sí sola no garantiza el éxito del SLA 4.0; es fundamental preparar al personal para su correcta operación y minimizar la resistencia al cambio. Para ello, se debe transformar la cultura organizacional hacia un modelo basado en datos y digitalización, mediante programas de formación en transformación digital y manejo de herramientas tecnológicas, complementados con estrategias de gestión del cambio que faciliten la adopción del sistema.

Fase 6 - Evaluación y optimización continua (duración indefinida): Una de las principales ventajas de la digitalización en el SLA 4.0 es su capacidad de adaptación y mejora continua. Sin embargo, para maximizar su eficiencia, es fundamental mantenerlo actualizado frente a cambios del mercado y avances tecnológicos. Para ello, se deben implementar las siguientes acciones:

- **Monitoreo de KPIs:** Evaluación de métricas como precisión en la gestión de inventarios, reducción de costos logísticos y tiempos de entrega.
- **Actualización de infraestructura tecnológica:** Ajustes periódicos para optimizar el rendimiento y la interoperabilidad del SLA 4.0.
- **Estrategias de mejora continua:** Incorporación de nuevos algoritmos de IA y tecnologías emergentes, como computación cuántica, para optimizar rutas y procesos en tiempo real.

La optimización es un proceso constante, por lo que el SLA 4.0 debe ser adaptable y escalable, evolucionando continuamente para enfrentar nuevos desafíos logísticos y tecnológicos.

Se puede observar cómo cada fase del SLA 4.0 funciona como un engranaje en un reloj suizo, donde:

- El diagnóstico sienta las bases.
- El pilotaje afina los detalles.
- La adquisición de tecnología escala la solución.
- La capacitación garantiza la correcta operación del sistema.

Por este motivo, el SLA 4.0 no es un cambio inmediato, sino un proceso progresivo que requiere análisis, pruebas, despliegue y mejora continua. Para ilustrar esta transición, el siguiente diagrama de Gantt muestra la secuencia y duración de cada fase clave en la implementación del SLA 4.0, asegurando que la gestión de inventarios y la planificación de rutas se transformen de manera eficiente, sostenible y rentable. Este enfoque estructurado permite visualizar los tiempos estimados para cada etapa, facilitando una integración ordenada y efectiva dentro de la cadena de suministro.

Fase	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 6	Mes 7	Mes 8	Mes 10	Mes 12	Mes 14	Mes 16	Mes 17	Mes 18	Mes 20
Diagnóstico y análisis inicial													
Diseño del modelo de integración y pilotaje													
Adquisición e instalación de tecnologías													
Puesta en marcha													
Capacitación del personal y gestión del cambio													

Ilustración 3 Fases de implementación SLA 4.0

Fuente: Elaboración propia.

5.6.2 Presupuesto de implementación del SLA 4.0

La implementación del SLA 4.0 requiere una planificación financiera estructurada que garantice la asignación adecuada de recursos en cada fase del proyecto. La transformación digital en la gestión de inventarios y planificación de rutas implica la adquisición de tecnología, capacitación del personal y adaptación de la infraestructura actual. A continuación, se presenta un desglose del presupuesto basado en las fases de implementación del SLA 4.0, justificando cada inversión según su importancia en el éxito del sistema.

Es importante considerar que estos costos son estimaciones teóricas. Para establecer un valor de referencia, se utilizará la información proporcionada por Search Labs IA de Google sobre los costos de transformación digital. Según esta IA, los proyectos de este tipo pueden oscilar entre \$50.000 y \$500.000 dólares. Además, en algunos casos, las grandes empresas destinan entre el 3% y el 5% de sus ingresos anuales a iniciativas de transformación digital. (Google Search Labs IA, 2025)

Para este ejercicio teórico, se utilizará un presupuesto máximo de \$500.000 dólares, distribuyendo los costos en porcentajes según la complejidad de cada fase. Los porcentajes fueron obtenidos mediante una consultoría con el gerente financiero y administrativo de uno de los principales puertos en la ciudad de Barranquilla, Colombia, quien cuenta con más de 10 años de experiencia en el desarrollo de proyectos de transformación digital.

La distribución del presupuesto se realizó con base en un análisis de ponderación multicriterio, considerando los siguientes factores:

- Complejidad (40% de peso)
- Recursos requeridos (40% de peso)
- Duración de la fase (20% de peso)

Cada fase fue evaluada en una escala del 1 al 10 para cada criterio, y el puntaje total determinó el porcentaje asignado. A continuación, se muestra la tabla de ponderación:

Fase	Complejidad (40%)	Recursos (40%)	Duración (20%)	Puntaje total	% Asignado
Diagnóstico y análisis inicial	3	2	1	7	10%
Diseño y pilotaje	5	3	2	10	15%
Adquisición e instalación	10	10	10	30	45%
Puesta en marcha	5	3	2	10	15%
Capacitación	2	1	1	5	7%
Optimización continua	2	2	2	6	8%

Nota: Elaboración propia

Tabla 2 Ponderación por fase para cálculo del presupuesto

Justificación de la distribución del presupuesto por fase.

Fase 1 - Diagnóstico y análisis inicial (10% del presupuesto total - \$ 50.000 dólares)

Esta fase presenta una complejidad baja, ya que se centra en evaluar la infraestructura existente y detectar áreas de mejora. Dado que requiere una inversión tecnológica mínima y su duración es relativamente corta, su ponderación refleja estos factores.

Los principales costos asociados a esta fase incluyen:

- **Consultoría tecnológica y logística:** Evaluación de procesos logísticos y tecnológicos realizada por expertos en logística 4.0.
- **Software de diagnóstico y análisis de procesos:** Herramientas especializadas para identificar cuellos de botella mediante el análisis de datos.
- **Evaluación de compatibilidad tecnológica:** Revisión de sistemas como ERP, WMS y edge computing para determinar posibles actualizaciones.

Fase 2 - Diseño del modelo de integración y pilotaje (15% del presupuesto total - \$ 75.000 dólares)

Esta fase tiene como objetivo validar la interoperabilidad tecnológica mediante pruebas piloto antes de la implementación total. Para ello, es necesario desarrollar APIs para la integración de sistemas, implementar gemelos digitales, sensores IoT y blockchain en un entorno controlado, así como realizar pruebas de IA predictiva para optimizar rutas y demanda.

Además de la inversión en tecnología, es crucial contar con mano de obra especializada para la instalación, configuración y supervisión del pilotaje. Ingenieros en sistemas, analistas de datos, especialistas en logística y técnicos en IoT juegan un papel clave en la validación de los modelos y el análisis de los resultados obtenidos.

Debido a la necesidad de desarrollar prototipos funcionales y realizar pruebas en entornos controlados, esta fase presenta una complejidad media. La incorporación de

Eduar Aponte Parejo

software avanzado y sensores IoT también incrementa la demanda de recursos tecnológicos, lo que justifica su ponderación.

Los principales costos asociados a esta fase incluyen:

- Software de simulación y modelado de gemelos digitales.
- Sensores IoT para pruebas piloto.
- Licencias de software de IA y machine learning.
- Infraestructura en la nube para pruebas de interconexión.
- Capacitación del equipo piloto en IA y gemelos digitales.
- Costos de mano de obra especializada para implementación, supervisión y ajustes del pilotaje.

Fase 3 - Adquisición e instalación de tecnologías (45% del presupuesto total - \$ 225.000 dólares)

Esta es la fase de mayor inversión, ya que abarca la adquisición e instalación de los sistemas y equipos tecnológicos que permitirán la digitalización de los procesos logísticos. En esta etapa, se implementan sensores IoT, servidores edge computing y plataformas de IA, además de la integración de blockchain para garantizar trazabilidad y seguridad. También se desarrolla el gemelo digital, fundamental para la simulación y optimización de operaciones.

Además de los costos tecnológicos, esta fase requiere una inversión significativa en mano de obra especializada para la instalación, configuración y puesta en marcha de las nuevas infraestructuras. La complejidad técnica y la duración prolongada del proceso justifican la alta asignación presupuestaria.

Los principales costos asociados a esta fase incluyen:

- Adquisición de sensores IoT para monitoreo de inventarios y rutas.
- Infraestructura de servidores edge computing.
- Implementación de plataformas de IA y blockchain.
- Licencias de software para planificación y gestión logística.
- Desarrollo del gemelo digital para simulaciones logísticas.
- Integración de sistemas heterogéneos con edge y cloud Computing.
- Costos de mano de obra para instalación, configuración y puesta en marcha.

Fase 4 - Puesta en marcha (15% del presupuesto total - \$ 75.000 dólares)

En esta fase, se realizan ajustes y optimización del sistema para garantizar que el SLA 4.0 funcione correctamente en condiciones reales. Esto incluye la calibración de la automatización de inventarios y rutas, así como la sincronización entre edge y cloud computing para mejorar la eficiencia operativa.

Dado que se trata de la optimización de un sistema ya instalado, la complejidad y los requerimientos tecnológicos son moderados, pero se requiere soporte técnico especializado para garantizar el correcto desempeño de los modelos predictivos y la integración de tecnologías.

Los principales costos asociados a esta fase incluyen:

- Supervisión y soporte técnico para ajustes operativos.
- Actualización de modelos predictivos en IA y machine learning.
- Ajustes en los gemelos digitales de almacenes y vehículos.

Eduar Aponte Parejo

- Optimización de la sincronización de Edge y Cloud computing.

Fase 5 - Capacitación del personal (7% del presupuesto total - \$ 35.000 dólares)

La adaptación tecnológica por parte del personal es un factor clave para el éxito del SLA 4.0. Para ello, es fundamental implementar programas de formación en transformación digital, uso de herramientas tecnológicas 4.0 y gestión del cambio organizacional.

Si bien la capacitación es un aspecto esencial, su complejidad es baja, ya que no requiere una gran cantidad de recursos tecnológicos ni una duración prolongada en comparación con otras fases del proyecto.

Por este motivo, la inversión en esta etapa se destina a:

- Cursos y certificaciones en transformación digital.
- Capacitación en tecnologías 4.0.
- Estrategias de gestión del cambio y liderazgo digital.

Fase 6 - Evaluación y optimización continua (8% del presupuesto total - \$ 40.000 dólares, inversión continua)

Esta fase tiene una complejidad de baja a moderada, ya que se centra en el mantenimiento y mejora continua del SLA 4.0. Dado que es un sistema dinámico, requiere monitoreo constante y actualización tecnológica para garantizar su eficiencia operativa y relevancia a lo largo del tiempo.

Al tratarse de una fase de carácter permanente, se deben considerar costos asociados a:

- Software de monitoreo y analítica de datos.
- Optimización y actualización de IA y algoritmos de planificación.
- Mantenimiento y mejora de infraestructura digital.

Resumen del presupuesto

A partir de la distribución de costos y su respectiva justificación, el presupuesto total de \$500.000 dólares se distribuye de la siguiente manera:

Fase	% del presupuesto	Valor estimado (USD)
Diagnóstico y análisis inicial	10%	\$50.000
Diseño del modelo de integración y pilotaje	15%	\$75.000
Adquisición e instalación de tecnologías	45%	\$225.000
Puesta en marcha	15%	\$75.000
Capacitación del personal	7%	\$35.000
Evaluación y optimización continua	8%	\$40.000
Valor total	100%	\$500.000

Nota: Elaboración propia

Tabla 3 Presupuesto estimado SLA 4.0

Eduar Aponte Parejo

Este presupuesto no debe considerarse un gasto, sino una inversión en resiliencia logística. Cada dólar que sea invertido contribuye a la optimización de inventarios y planificación de rutas, asegurando que la empresa no solo sobreviva, sino que lidere en la era 4.0.

El presupuesto de implementación del SLA 4.0 está diseñado para garantizar una transformación digital escalonada y eficiente, priorizando la adopción tecnológica, capacitación del talento humano y mejora continua. Invertir en una estructura sólida desde el inicio permitirá reducir costos logísticos, minimizar desperdicios y aumentar la eficiencia operativa a largo plazo.

Es importante destacar que este presupuesto también considera los costos asociados a los posibles riesgos en cada fase del proyecto. Desde el diagnóstico hasta la optimización continua, se han contemplado márgenes de inversión para mitigar imprevistos como problemas de compatibilidad tecnológica, ajustes en infraestructura, resistencia al cambio organizacional y desafíos en la integración de sistemas. Esto permite que el SLA 4.0 se implemente de manera segura y con menor impacto ante dificultades operativas.

5.7. Computación cuántica y el futuro del SLA 4.0.

La computación cuántica es una de las tecnologías emergentes con mayor potencial para transformar la logística moderna, especialmente dentro de un SLA 4.0. Su capacidad para procesar datos de manera exponencialmente más rápida que los sistemas clásicos la posiciona como un recurso estratégico en la optimización de la gestión de inventarios y la planificación de rutas. Sin embargo, debido a que esta tecnología aún se encuentra en una etapa de desarrollo y adopción temprana, su implementación en el SLA 4.0 no fue viable dentro del presente trabajo.

A pesar de ello, su potencial hace que sea una línea de investigación clave para el futuro. La computación cuántica introduce una nueva dimensión en la resolución de problemas altamente complejos que desafían los algoritmos tradicionales, incluso aquellos basados en análisis predictivos. Puesto que, a diferencia de la computación clásica, que procesa información de manera secuencial, los sistemas cuánticos pueden analizar simultáneamente múltiples escenarios y variables, proporcionando soluciones más eficientes en tiempos significativamente reducidos.

Uno de los principales aportes que podría tener esta tecnología en el SLA 4.0 es la optimización de la planificación de rutas dinámicas. Actualmente, la asignación de rutas logísticas depende de algoritmos que consideran variables como condiciones meteorológicas, congestión vehicular, costos de combustible y disponibilidad de recursos. Sin embargo, a medida que el volumen de datos y la cantidad de restricciones aumentan, estos sistemas enfrentan limitaciones de procesamiento. La computación cuántica, al operar con modelos de optimización combinatoria avanzados, permitiría evaluar múltiples combinaciones posibles en segundos, facilitando la selección de las rutas más eficientes en tiempo real y reduciendo costos operativos (Quantum Economic Development Consortium (QED-C), 2024).

Por su parte, la gestión de inventarios dentro de un SLA 4.0 enfrenta un desafío constante en la búsqueda del equilibrio entre la disponibilidad inmediata de productos y la minimización de costos de almacenamiento. En un futuro, la computación cuántica podría ser clave para resolver problemas como:

- **Clasificación ABC multidimensional:** No solo basada en la rotación de productos, sino integrando factores como huella de carbono, estacionalidad y riesgo geopolítico de los proveedores para una gestión más precisa. (Quantum Economic Development Consortium (QED-C), 2024)

Eduar Aponte Parejo

- **Predicción de demanda con entrelazamiento cuántico:** Identificación de correlaciones no lineales entre eventos aparentemente desconectados, mejorando la anticipación de tendencias de consumo. (Quantum Economic Development Consortium (QED-C), 2024)

Más allá de la eficiencia operativa, la computación cuántica también puede contribuir a la sostenibilidad y resiliencia del SLA 4.0. Según el Departamento de Transporte de EE.UU. esta tecnología permitirá en el futuro diseñar rutas más eficientes y reducir el impacto ambiental del transporte mediante un uso optimizado de combustibles y energías alternativas. (LeMaster & Vakharia, 2024).

Si bien la computación cuántica aún no se ha aplicado en la logística del día a día, su potencial es innegable. En el contexto del SLA 4.0, su integración en el futuro representaría un salto cualitativo en la gestión de inventarios y planificación de rutas, permitiendo decisiones más rápidas y eficientes. No obstante, esta tecnología no reemplazaría el SLA 4.0, sino que funcionaría como un coprocesador estratégico. En informática, un coprocesador es un componente especializado que descarga ciertas tareas del procesador principal, optimizando el rendimiento del sistema (ScienceDirect, 2023). De manera similar, la computación cuántica en el SLA 4.0 podría encargarse de los cálculos más exigentes, como la optimización de rutas dinámicas y la predicción de demanda, mientras que los sistemas convencionales seguirían ejecutando las funciones operativas habituales.

A medida que la computación cuántica continúe evolucionando, su adopción en la logística será inevitable, redefiniendo no solo la manera en que se optimizan los procesos actuales, sino también la forma en que se enfrentan los desafíos futuros de un mercado global cada vez más dinámico y exigente.

6. Memoria del proyecto.

En este apartado se recopila el proceso de desarrollo del trabajo de fin de máster (TFM) titulado “Sistema logístico avanzado 4.0 para la optimización dinámica de inventarios y planificación de rutas: Un enfoque teórico para la mejora de procesos”. Donde se busca detallar las motivaciones que impulsaron la investigación, la planificación llevada a cabo, los desafíos enfrentados, las herramientas utilizadas y los hallazgos más relevantes obtenidos durante su desarrollo.

1. Origen e importancia del proyecto: La idea de este trabajo surge a partir de la experiencia propia en el área de control de inventarios en uno de los principales puertos del río Magdalena en Barranquilla Colombia, el cual cuenta con una empresa especializada en la producción de alimentos concentrados para animales. Si bien la empresa implementa diversas tecnologías, aún persisten procesos manuales que generan ineficiencias en la gestión de inventarios y planificación de rutas. Un claro ejemplo de ello es el tiempo y los costos asociados a la realización de auditorías de inventario, que requieren la detención de operaciones por al menos un día completo.

Además, existen problemas de interconexión con las empresas transportadoras. Estas justifican retrasos debido a la falta de preparación de pedidos en tiempo y forma, así como a problemas de accesibilidad a la empresa, lo que impide una planificación eficiente de rutas. Estas deficiencias han resultado en un aumento de quejas en los últimos meses.

El proyecto se fundamenta en la importancia de desarrollar un modelo teórico aplicable, que con la inversión adecuada, pueda optimizar la sinergia entre diversas operaciones logísticas mediante la implementación de la logística 4.0.

2. Etapas clave en el desarrollo del trabajo: El desarrollo del TFM siguió una serie de fases esenciales, las cuales son:

- **Búsqueda de información:** La primera fase consistió en recopilar información sobre tecnologías 4.0 aplicadas a la logística. Aunque el conocimiento previo adquirido en la maestría sirvió de base, se identificaron vacíos argumentales que dificultaban la consolidación de un modelo coherente.
- **Análisis de casos prácticos:** Se estudiaron implementaciones reales de tecnologías 4.0 en diversas industrias. La observación de cómo estas soluciones han optimizado procesos logísticos amplió la visión sobre su aplicabilidad y efectividad.
- **Desarrollo del proyecto:** Se estructuró y redactó el trabajo de manera progresiva. Fue un proceso desafiante, ya que plasmar las ideas con precisión y coherencia requirió múltiples revisiones y modificaciones.

3. Herramientas y metodologías utilizadas: Dado que se trata de un proyecto teórico, la investigación se centró en la recopilación, análisis y estudio de diversas tecnologías aplicadas en la logística 4.0. La metodología se basó en la revisión de literatura académica, artículos especializados y casos prácticos documentados.

Para mejorar la claridad conceptual y estructural del trabajo, se implementaron herramientas de inteligencia artificial como Chat GPT, DeepSeek y Gemini, las cuales permitieron dar coherencia a secciones complejas, eliminar ideas redundantes y refinar la argumentación de algunos apartados.

Eduar Aponte Parejo

Adicionalmente, en el desarrollo del apartado “5.6.1 Fases de implementación del SLA 4.0”, las estimaciones de duración de las fases se realizaron con apoyo de estas herramientas de IA. Sin embargo, para el apartado “5.6.2 Presupuesto de implementación del SLA 4.0” los valores porcentuales del presupuesto fueron establecidos en conjunto con el gerente financiero y administrativo del puerto antes mencionado. Estos valores fueron determinados con base en la experiencia del gerente en proyectos de transformación digital, considerando los siguientes criterios:

- **Diagnóstico y análisis inicial (10%):** Se asignó este porcentaje debido a la necesidad de realizar estudios de viabilidad y auditorías tecnológicas, tareas esenciales pero con una inversión menor en comparación con las fases posteriores.
- **Diseño del modelo de integración y pilotaje (15%):** Se destinó un porcentaje mayor por la necesidad de pruebas piloto y simulaciones que permitan validar la operatividad del sistema antes de su implementación a gran escala.
- **Adquisición e instalación de tecnologías (45%):** Representa el mayor porcentaje del presupuesto, ya que incluye la compra del hardware y software, además de su integración con los sistemas existentes.
- **Puesta en marcha (15%):** Se consideró una inversión relevante en ajustes operativos, soporte técnico y optimización de modelos predictivos para asegurar una transición eficiente.
- **Capacitación del personal (7%):** Se estimó este porcentaje dado que la formación en nuevas herramientas tecnológicas y gestión del cambio organizacional es crucial, aunque menos costosa que las fases de implementación.
- **Evaluación y optimización continua (8%):** Se destinó este porcentaje para monitoreo de KPIs, actualizaciones tecnológicas y mejoras en los algoritmos de IA, asegurando la evolución del sistema sin costos excesivos de mantenimiento.

La metodología empleada permitió comprender el estado actual de estas tecnologías y su aplicabilidad teórica en la optimización de procesos logísticos, además de proporcionar una estimación de costos basada en referencias prácticas del sector.

4. Obstáculos encontrados y soluciones aplicadas: El proceso de desarrollo no estuvo exento de dificultades. Entre los principales obstáculos se encuentran:

- **Falta de información clara sobre interconexión de procesos:** Se requirió un análisis exhaustivo de diversas fuentes para integrar los conceptos de manera coherente.
- **Exceso de información superficial sobre logística 4.0:** Muchas fuentes presentaban explicaciones generales sin profundidad técnica, lo que obligó a revisar múltiples referencias académicas para obtener datos precisos.
- **Escasa documentación sobre sistemas logísticos avanzado (SLA):** Se desarrolló un concepto propio basado en la combinación de múltiples enfoques existentes.

5. Hallazgos más relevantes: Durante el desarrollo del proyecto se identificaron aspectos clave sobre la logística 4.0, tales como:

- **La digitalización debe ir acompañada de un cambio cultural:** La resistencia del personal puede ser una barrera para la transformación digital.
- **Interconexión tecnológica:** La sinergia entre IA, Gemelos digitales, IoT y otras tecnologías multiplica su potencial.
- **Computación cuántica:** Su aplicación en logística tiene un gran potencial aún poco explorado.
- **SAP Roadmap:** Un modelo adaptable a distintos proyectos de transformación digital.
- **Importancia de estrategias bien definidas:** La implementación de tecnología sin un plan estructurado puede generar más problemas que beneficios.

7. Conclusiones y recomendaciones para futuros proyectos.

El presente trabajo ha permitido analizar cómo un sistema logístico avanzado 4.0 (SLA 4.0) puede optimizar la gestión de inventarios y la planificación de rutas. A partir del análisis realizado, se ha demostrado que el SLA 4.0, fundamentado en la interconexión de tecnologías como inteligencia artificial, gemelos digitales, big data, IoT, blockchain, edge y cloud computing, mejora significativamente la eficiencia operativa al integrar procesos y crear un ecosistema logístico adaptativo. Este sistema trasciende la automatización aislada y permite una toma de decisiones basada en datos en tiempo real. Por ejemplo, la IA predictiva ajusta los niveles de inventario según patrones de demanda, mientras que los gemelos digitales simulan escenarios operativos para minimizar costos y maximizar la eficiencia en la distribución.

De igual manera, se han identificado los principales retos que enfrentan las empresas en la gestión de inventarios y la planificación de rutas dentro de la logística moderna. Entre estos desafíos destacan la volatilidad de la demanda, la complejidad de las cadenas globales y la creciente presión por reducir emisiones. Estos factores impactan directamente los costos operativos y la capacidad de respuesta al mercado. Sin embargo, el SLA 4.0 aborda estos retos mediante tecnologías que proporcionan visibilidad total de la cadena de suministro, resiliencia ante disrupciones y una reducción significativa de la huella ambiental.

Casos de estudio como el almacén inteligente de DHL-Tetra Pak, la digitalización de dm-drogerie markt y el sistema ORION de UPS han demostrado que la logística 4.0 no es un concepto teórico, sino una realidad operativa. Estas implementaciones han generado mejoras del 16% en eficiencia, ahorros anuales superiores a 300 millones de dólares y reducciones de hasta 10 millones de toneladas de CO₂, validando el impacto positivo de estas tecnologías en la logística moderna.

En cuanto a la evaluación del impacto de estas tecnologías, se determinó que su interconexión facilita la predicción de la demanda y la automatización de procesos logísticos, lo que se traduce en una reducción de costos y una mayor eficiencia operativa. Además, la optimización de las rutas de distribución permite disminuir el consumo de combustible, lo que impacta positivamente en la sostenibilidad empresarial.

Como resultado de la investigación, se ha desarrollado un marco conceptual para un SLA 4.0 que integra de manera efectiva componentes clave en la gestión de inventarios y la planificación de rutas. Dicho marco se basa en tres pilares fundamentales:

1. **Digitalización de inventarios:** Integración de IA, gemelos digitales, IoT y edge computing para lograr trazabilidad de los inventarios en tiempo real.
2. **Digitalización de la planificación de rutas:** Uso de IA predictiva, gemelos digitales, blockchain y cloud computing para una adaptación dinámica en la distribución.
3. **Digitalización de la interconexión sistémica:** Implementación de APIs y modelos de simulación que sincronizan inventarios y distribución, eliminando las barreras organizacionales.

A lo largo del trabajo se ha reafirmado que la logística 4.0 no se limita a la adopción aislada de herramientas tecnológicas, sino que requiere la creación de un sistema sinérgico. El SLA 4.0 demuestra cómo la convergencia de las tecnologías 4.0 genera un valor superior al de sus componentes individuales. Por ejemplo, los gemelos digitales no solo replican almacenes

Eduar Aponte Parejo

físicos, sino que, combinados con IA, permiten predecir demandas futuras y ajustar rutas de distribución antes de que ocurran cuellos de botella. Esta interconexión permite a las empresas operar con agilidad en entornos volátiles, transformando la cadena de suministro en un activo estratégico.

Adicionalmente, se destaca la importancia de la computación cuántica como una tecnología emergente con gran potencial para la logística 4.0. Aunque su aplicabilidad aún es limitada, su desarrollo podría representar un salto cualitativo en la capacidad de procesamiento de datos y toma de decisiones en tiempo real, factores clave para la evolución de los sistemas logísticos avanzados. Si bien el SLA 4.0 se sustenta en tecnologías actuales, la computación cuántica se perfila como un futuro disruptor. Su capacidad para resolver problemas de optimización complejos, como la planificación de rutas con miles de variables, podría revolucionar la logística. Aunque aún se encuentra en fase experimental, su integración con tecnologías 4.0 permitiría modelar cadenas de suministro globales con una precisión sin precedentes. Se recomienda monitorear su evolución, ya que su madurez técnica podría redefinir los estándares de eficiencia y sostenibilidad en la próxima década.

En conclusión, el trabajo ha demostrado que la implementación de un SLA 4.0 permite abordar los retos actuales de la logística moderna, mejorando la gestión de inventarios y la planificación de rutas a través de la interconexión de tecnologías avanzadas. Esto no solo favorece la eficiencia operativa y la reducción de costos, sino que también impulsa la sostenibilidad y refuerza la competitividad global de las empresas que lo implementan. La aplicación del SLA 4.0 puede llegar a posicionar a las empresas como líderes en innovación y responsabilidad ambiental, ya que al reducir costos operativos y emisiones no solo mejoran su rentabilidad, sino también su reputación corporativa, alineándose con las demandas de los consumidores y las regulaciones globales. Además, la resiliencia generada por modelos predictivos y gemelos digitales mitiga riesgos en escenarios críticos, como crisis sanitarias o interrupciones geopolíticas.

Recomendaciones para futuros proyectos

1. **Priorizar la interoperabilidad:** Invertir en estándares abiertos (APIs, middleware) para evitar la dependencia de proveedores únicos.
2. **Fomentar la capacitación continua:** Desarrollar programas de formación en IA y análisis de datos para cerrar brechas de talento.
3. **Explorar alianzas tecnológicas:** Colaborar con startups y centros de investigación para integrar innovaciones como la computación cuántica.
4. **Desarrollar sistemas de logística colaborativa:** Fomentar plataformas de intercambio de datos en tiempo real entre empresas para optimizar el uso de recursos y mejorar la eficiencia del transporte.
5. **Evaluar el impacto social de la digitalización logística:** Investigar cómo la automatización afecta el empleo en el sector logístico y desarrollar estrategias para la reubicación y formación del talento humano.

Referencias bibliográficas.

- ADEN . (12 de Diciembre de 2024). *5 Estrategias para Implementar la Digitalización*.
Obtenido de ADEN Escuela de negocios en Santo Domingo:
<https://www.aden.org/business-magazine/digitalizacion-5-estrategias-para-implementar/>
- ADEN. (5 de Septiembre de 2024). *Logística 4.0: Transformación Digital en el Comercio Internacional*. Obtenido de ADEN: <https://www.aden.org/business-magazine/logistica-4-0-transformacion-digital-en-el-comercio-internacional/>
- Aerts, S. (6 de Abril de 2022). *Cómo reducir drásticamente los errores de picking en el almacén*. Obtenido de Toyota Forklifts: <https://blog.toyota-forklifts.es/como-reducir-errores-picking-almacen>
- Aita, D. (5 de Agosto de 2022). *Digitalización en puertos: aplicación de gemelos digitales en la complejidad logística*. Obtenido de Repositorio Digital Comisión Económica para América Latina y el Caribe: <https://hdl.handle.net/11362/48050>
- Akbar, F. (10 de Octubre de 2024). *Transform Your Business with the Capabilities of Digital Twin and AI*. Obtenido de Toobler: <https://www.toobler.com/blog/digital-twin-and-ai>
- Amazon. (29 de Abril de 2022). *¿Qué es el aprendizaje automático?* Obtenido de aws:
<https://aws.amazon.com/es/what-is/machine-learning/>
- Amazon. (20 de Mayo de 2022). *¿Qué es el middleware?* Obtenido de aws:
<https://aws.amazon.com/es/what-is/middleware/>
- Amazon. (29 de Abril de 2022). *¿Qué es IoT (Internet de las cosas)?* Obtenido de AWS:
<https://aws.amazon.com/es/what-is/iot/>
- Amazon. (22 de Octubre de 2022). *¿Qué es la computación cuántica?* Obtenido de aws:
<https://aws.amazon.com/es/what-is/quantum-computing/>
- Amazon. (17 de Septiembre de 2022). *¿Qué es la latencia de red?* Obtenido de aws:
<https://aws.amazon.com/es/what-is/latency/>
- Amazon. (17 de Septiembre de 2022). *¿Qué es la tecnología de gemelos digitales?* Obtenido de aws: <https://aws.amazon.com/es/what-is/digital-twin/#:~:text=Los%20gemelos%20digitales%20se%20basan,los%20datos%20en%20tiempo%20real>
- Amazon. (28 de Enero de 2022). *¿Qué es una interfaz de programación de aplicaciones (API)?*
Obtenido de aws: <https://aws.amazon.com/es/what-is/api/>
- Amazon. (5 de Octubre de 2023). *¿Qué es la automatización inteligente?* Obtenido de aws:
<https://aws.amazon.com/es/what-is/intelligent-automation/>
- Amazon. (5 de Octubre de 2023). *¿Qué es la inteligencia artificial (IA)?* Obtenido de aws:
<https://aws.amazon.com/es/what-is/artificial-intelligence/>
- Amazon. (6 de Septiembre de 2023). *¿Qué es la interoperabilidad?* Obtenido de aws:
<https://aws.amazon.com/es/what-is/interoperability/>

Eduar Aponte Parejo

Amazon. (14 de Agosto de 2023). *¿Qué es la tecnología de cadena de bloques?* Obtenido de aws: https://web.archive.org/web/20250000000000*/https://aws.amazon.com/es/what-is/blockchain/?aws-products-all.sort-by=item.additionalFields.productNameLowercase&aws-products-all.sort-order=asc

Amazon. (5 de Enero de 2024). *¿Qué es una RNN (red neuronal recurrente)?* Obtenido de aws: <https://aws.amazon.com/es/what-is/recurrent-neural-network/>

Arangoya. (15 de Octubre de 2024). *Qué son los gemelos digitales y cómo están revolucionando la gestión logística.* Obtenido de Arangoya: <https://arangoya.org/que-son-gemelos-digitales-revolucion-gestion-logistica/>

Ballesteros, J. (2016). *COMO LA LOGÍSTICA CONTRIBUYE AL DESARROLLO DE LA COMPETITIVIDAD DE UNA EMPRESA.* BOGOTA D.C.: FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y CONTABLES ESPECIALIZACIÓN EN LOGÍSTICA INTERNACIONAL.

Barcelona Catalunya Centre Logístic. (2022). *Declaración BCL por la Agenda 2030 y los ODS en la Logística.* Barcelona: Barcelona-Catalunya Centre Logístic (BCL).

Barrera, I. (16 de Junio de 2023). *Costos de desarrollo y ejecución en un proyecto de IA.* Obtenido de Platzi: <https://platzi.com/clases/7960-estrategias-negocios-ia/63317-costos-de-desarrollo-y-ejecucion-en-un-proyecto-de/>

BBVA. (29 de JULIO de 2024). *¿Qué es la logística sostenible? Otra alternativa para ayudar al planeta.* Obtenido de BBVA: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-logistica-sostenible-otra-alternativa-para-ayudar-al-planeta/>

BSR Center for Technology and Sustainability. (30 de Marzo de 2016). *Looking Under the Hood: ORION Technology Adoption at UPS.* Obtenido de BSR: <https://www.bsr.org/en/case-studies/center-for-technology-and-sustainability-orion-technology-ups>

Cabral Filho, D. A. (2023). Logística 4.0: fundamentos e importancia. *Brazilian Journal of Business, Curitiba, v. 5, n. 3, 1808-1820.*

Canle, E. (8 de Septiembre de 2022). *Sensores IoT: qué son, para qué sirven, tipos, características y más.* Obtenido de Tokio School: <https://www.tokioschool.com/noticias/sensores-iot/>

Capgemini-research-institute. (2 de Junio de 2023). *Digital twins: Adding intelligence to the real world.* Obtenido de Capgemini: <https://www.capgemini.com/be-en/insights/research-library/digital-twins/>

Carmody, K., Greco, L., & Montgomery, R. (22 de Mayo de 2024). *Defining your 'true north': A road map to successful transformation.* Obtenido de McKinsey & Company: <https://www.mckinsey.com/capabilities/transformation/our-insights/defining-your-true-north-a-road-map-to-successful-transformation>

Castillo, L., Huamanchumo, A., & Lecca, M. (2024). 80DOI: <https://doi.org/10.17268/goi4.0.2024.05> El Impacto de la Aplicación de la Tecnología de

Eduar Aponte Parejo

- Gemelos Digitales en la Cadena de Suministro 4.0: Una Revisión Sistemática.
GESTIÓN DE OPERACIONES INDUSTRIALES VOL03N°01, 80–92.
- Consejo Profesional de Administración Pública de Colombia. (28 de Agosto de 2024).
Optimización de Procesos Empresariales con Inteligencia Artificial. Obtenido de
Consejo Profesional de Administración Pública de Colombia:
<https://www.cpae.gov.co/noticias/optimizacion-de-procesos-empresariales-con-inteligencia-artificial>
- Cortés, M. (2 de Enero de 2025). *Ventajas y retos de la IA en las empresas*. Obtenido de
Beyond by esade: <https://www.esade.edu/beyond/es/ventajas-retos-inteligencia-artificial-empresas/>
- Cosmas, A., Cruz, G., Cubela, S., Huntington, M., Rahimi, S., & Tiwari, S. (11 de Abril de
2024). *Digital twins and generative AI: A powerful pairing*. Obtenido de McKinsey
Digital: <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/tech-forward/digital-twins-and-generative-ai-a-powerful-pairing>
- DHL. (16 de Julio de 2019). *DHL Supply Chain partners Tetra Pak to implement its first digital
twin warehouse in Asia Pacific*. Obtenido de DHL GROUP:
https://group.dhl.com/en/media-relations/press-releases/2019/dhl-supply-chain-partners-tetra-pak-implement-first-digital-twin-warehouse-asia-pacific.html?_gl=1*989d3n*_gcl_au*Mzk1MDIxMTg1LjE3MzEwMzM4OTg
- DHL. (24 de Septiembre de 2020). *Quantum computing could transform the logistics industry
within the next decade*. Obtenido de DHL LOGISTICS OF THINGS:
<https://lot.dhl.com/quantum-computing-could-transform-the-logistics-industry-within-the-next-decade/>
- DHL. (30 de Septiembre de 2023). *Logistics 4.0: Overcoming challenges when adopting smart
technology*. Obtenido de Discover Delivered by DHL:
<https://www.dhl.com/discover/en-nz/logistics-advice/logistics-insights/overcoming-logistics-4-0-technologies-challenges>
- Dohrmann, K. (29 de Agosto de 2024). *Logistics Trend Radar 7.0*. Obtenido de DHL Group:
<https://www.dhl.com/de-en/home/innovation-in-logistics/>
- Dorado, S., & Velazques, V. (2020). *PRONÓSTICO DE DEMANDA UTILIZANDO
INTELIGENCIA ARTIFICIAL*. Cali: UNIVERSIDAD ICESI FACULTAD DE
INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL.
- Dotactiv. (2 de Agosto de 2016). *Diferencias entre realogramas, planos guía y planogramas*.
Obtenido de dotActiv: <https://www.dotactiv.com/blog/realograms-plano-guides-planograms>
- Forbes. (7 de Octubre de 2019). *¿Es caro invertir en Industria 4.0? Es más caro no hacerlo*.
Obtenido de Forbes Mexico: <https://forbes.com.mx/es-caro-invertir-en-industria-4-0-es-mas-carro-no-hacerlo/>
- Foster, M. (26 de Febrero de 2024). *How Do Couriers Like UPS Plan Their Routes?* Obtenido
de Track-POD: <https://www.track-pod.com/blog/couriers-routes/>

Eduar Aponte Parejo

- Fulfillment Hub USA. (11 de Septiembre de 2024). *La importancia de la colaboración en la cadena de suministro*. Obtenido de Fulfillment Hub USA:
<https://fulfillmenthubusa.com/la-importancia-de-la-colaboracion-en-la-cadena-de-suministro/>
- García, R. (2024). El avance para la logística a través de gemelos digitales. *Industria Química*, 26-28.
- González, F. (Abril de 2020). *Logística 4.0*. Obtenido de ESIC Business & Marketing School:
<https://www.esic.edu/rethink/comercial-y-ventas/logistica-4-0-que-es-y-que-ventajas-tiene-su-uso-con-la-tecnologia>
- Google. (18 de Abril de 2021). *¿Qué es el aprendizaje automático (AA)?* Obtenido de Google Cloud: <https://cloud.google.com/learn/what-is-machine-learning?hl=es-419>
- Google. (12 de Abril de 2021). *¿Qué es la integración de datos?* Obtenido de Google Cloud:
<https://cloud.google.com/learn/what-is-data-integration?hl=es-419>
- Google. (17 de Enero de 2022). *¿Qué es Big Data?* Obtenido de Google Cloud:
<https://cloud.google.com/learn/what-is-big-data?hl=es>
- Google Search Labs IA. (16 de Marzo de 2025). *Información sobre costos de transformación digital*. Obtenido de Google Search Labs IA.
- Hannover Messe. (27 de Octubre de 2020). *dm-drogerie markt received the German Logistics Award*. Obtenido de HANNOVER MESSE:
<https://www.hannovermesse.de/en/news/news-articles/dm-drogerie-markt-received-the-german-logistics-award>
- Hasbum, I., Arévalo-Pena, J., Brenes-Rojas, A., ChavarríaCordero, R., Leiva-Chinchilla, M., Sánchez-Tobal, F., . . . Viquez-Dormond, L. (2022). Impacto del COVID-19 en la cadena de suministros: metodologías y estrategias aplicadas por las empresas antes y durante la pandemia. *Tecnología en Marcha Vol. 35, especial. COVID-19*, 196-204.
- Herrera, G. (29 de SEPTIEMBRE de 2023). *¿Cómo ha cambiado el comportamiento de los consumidores?* Obtenido de Postgrados univesidad Andres Bello:
<https://www.postgradounab.cl/noticias/como-ha-cambiado-el-comportamiento-de-los-consumidores/>
- HPE. (3 de Diciembre de 2023). *¿Qué es el procesamiento en tiempo real?* Obtenido de Hewlett Packard Enterprise: <https://www.hpe.com/lamerica/es/what-is/real-time-processing.html>
- Iberdrola. (20 de Octubre de 2020). *Gemelos digitales, claves en la Cuarta Revolución Industrial*. Obtenido de Iberdrola: <https://www.iberdrola.com/innovacion/gemelos-digitales>
- IBM. (16 de Noviembre de 2017). *IBM Planning Analytics*. Obtenido de IBM:
<https://www.ibm.com/products/planning-analytics>
- IBM. (21 de JUNIO de 2021). *¿Qué es la gestión de inventario?* Obtenido de IBM:
<https://www.ibm.com/mx-es/topics/inventory-management>
- IBM. (6 de Mayo de 2021). *¿Qué es la Industria 4.0?* Obtenido de IBM:
<https://www.ibm.com/es-es/topics/industry-4-0>

Eduar Aponte Parejo

- IBM. (11 de Diciembre de 2021). *¿Qué es un gemelo digital?* Obtenido de IBM:
<https://www.ibm.com/es-es/topics/what-is-a-digital-twin>
- IBM. (4 de Agosto de 2021). *Planificación y análisis de la cadena de suministro.* Obtenido de IBM: <https://www.ibm.com/mx-es/products/planning-analytics/supply-chain-planning>
- IBM. (30 de Junio de 2022). *¿Cuáles son los beneficios de blockchain?* Obtenido de IBM:
<https://www.ibm.com/es-es/topics/benefits-of-blockchain>
- IBM. (29 de Diciembre de 2022). *¿Qué es una red neuronal recurrente (RNN)?* Obtenido de IBM: <https://www.ibm.com/es-es/topics/recurrent-neural-networks>
- IBM. (19 de Diciembre de 2023). *¿Qué es el edge computing?* Obtenido de IBM:
<https://www.ibm.com/es-es/topics/edge-computing>
- IBM. (4 de Diciembre de 2023). *¿Qué es el Internet de las cosas (IoT)?* Obtenido de IBM:
<https://www.ibm.com/mx-es/topics/internet-of-things>
- IBM. (7 de Enero de 2023). *¿Qué es la inteligencia artificial (IA)?* Obtenido de IBM:
<https://www.ibm.com/mx-es/topics/artificial-intelligence>
- Koerber. (Agosto de 2022). *dm-drogerie markt GmbH + Co. KG.* Obtenido de Koerber:
<https://koerber-supplychain.com/es/referencias/dm/building-the-retailer-of-the-future-sainsburys-selects-koerber-for-logistics-transformation/>
- Latorre, L., Rego, E., De Leo, L., & Gutierrez, M. (Septiembre de 2024). *Reporte de tecnología: gemelos digitales.* Obtenido de BID: <https://publications.iadb.org/es/reportes-de-tecnologia-gemelos-digitales>
- LeMaster, D., & Vakharia, P. (2024). *Quantum Technologies in Transportation.* Washington: Office of the Assistant Secretary for Research and Technology U.S. Department of Transportation.
- Lu, P., & Li, B. (28 de Agosto de 2024). *Linear Regression component.* Obtenido de Microsoft Learn: <https://learn.microsoft.com/es-es/azure/machine-learning/component-reference/linear-regression?view=azureml-api-2>
- Madaan, A. (27 de Septiembre de 2024). *El imperativo de la validación de datos de IA: Garantizar la integridad de la IA para impulsar resultados empresariales óptimos - Calidad y coherencia de los datos de IA.* Obtenido de econONE :
<https://econone.com/es/data-analytics/resources/blogs/ai-data-quality/#:~:text=En%20el%20universo%20de%20la,y%20ofrecer%20resultados%20empresariales%20C3%B3ptimos>
- Malagon, C., & Orjuela, J. (2023). Challenges and Trends in Logistics 4.0. *Revista Ingeniería Volumen 28* .
- Marsh. (14 de Junio de 2021). *Cierre del Canal de Suez por encallamiento del buque Ever Given: Lecciones aprendidas.* Obtenido de Marsh:
<https://www.marsh.com/co/industries/marine/insights/cierre-canal-suez-lecciones-aprendidas.html>
- McCarthy, J. (12 de Noviembre de 2007). *WHAT IS ARTIFICIAL INTELLIGENCE?* Obtenido de Stanford University: <https://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai.pdf>

Eduar Aponte Parejo

- Méndez, D. (28 de Noviembre de 2023). *Sostenibilidad en la Logística: Qué es, importancia y beneficios*. Obtenido de CEUPE European Business School.
- Microsoft. (18 de Diciembre de 2023). *Los proyectos de IA empresarial pueden generar ROI de hasta 350%*. Obtenido de Microsoft: <https://news.microsoft.com/es-xl/los-proyectos-de-ia-empresarial-pueden-generar-roi-de-hasta-350/>
- Microsoft. (19 de Septiembre de 2024). *What is Azure Machine Learning?* Obtenido de Microsoft Learn: <https://learn.microsoft.com/es-es/azure/machine-learning/overview-what-is-azure-machine-learning?view=azureml-api-2#work-with-llms-and-generative-ai>
- Microsoft. (8 de Septiembre de 2024). *Your essential guide to inventory control*. Obtenido de Microsoft: <https://www.microsoft.com/en-us/dynamics-365/topics/small-and-mid-sized-business/inventory-control>
- Mira, J. (6 de Noviembre de 2024). *La inteligencia artificial (IA) en la logística*. Obtenido de Toyota-forklifts: <https://blog.toyota-forklifts.es/inteligencia-artificial-en-logistica>
- MLTi Logistics. (30 de Mayo de 2024). *PLANIFICACIÓN DE RUTAS CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL*. Obtenido de MLTi Logistics: <https://mlti.com.mx/planificacion-de-rutas-con-inteligencia-artificial/>
- Molina, F. (12 de Febrero de 2024). *La abrumadora demanda de poder computacional que exige la IA*. Obtenido de The Conversation: <https://theconversation.com/la-abrumadora-demanda-de-poder-computacional-que-exige-la-ia-221772>
- Mucci, T. (23 de Julio de 2024). *¿En qué consiste la toma de decisiones basada en datos?* Obtenido de IBM: <https://www.ibm.com/es-es/think/topics/data-driven-decision-making>
- Mucci, T., & Stryker, C. (5 de Abril de 2024). *¿Qué es el análisis de big data?* Obtenido de IBM: <https://www.ibm.com/es-es/topics/big-data-analytics>
- Navarro, V. (6 de Octubre de 2024). *UPS y el Algoritmo ORION: La Ruta de Datos que Ahorró Millones*. Obtenido de SABIDURIA: <https://www.sabiduria.ar/blog/data-analytics/ups-orion.php>
- Noble, J. (24 de Mayo de 2024). *Presentación de los modelos ARIMA*. Obtenido de IBM: <https://www.ibm.com/mx-es/topics/arima-model>
- Nomadia. (22 de SEPTIEMBRE de 2023). *Planificación de Rutas de Entrega: La Guía Completa*. Obtenido de Nomadia Smart Mobility Solutions: <https://www.nomadia-group.com/es/recursos/blog/planificacion-de-rutas-de-entrega-la-guia-completa/>
- OnTrack. (19 de Abril de 2024). *La evolución de la logística en la historia*. Obtenido de ONTRACK Global: <https://ontrack.global/evolucion-de-la-logistica-en-la-historia/>
- ONU. (2 de Diciembre de 2024). *Digitalización para la sostenibilidad*. Obtenido de ONU programa para el medio ambiente: <https://www.unep.org/es/topics/digital-transformations/digitalizacion-para-la-sostenibilidad>
- Oracle. (25 de Enero de 2021). *Transportation Management*. Obtenido de Oracle: <https://www.oracle.com/scm/logistics/transportation-management/>

Eduar Aponte Parejo

- Oracle. (2 de Octubre de 2022). *¿Qué es un sistema de gestión del transporte?* Obtenido de Oracle: <https://www.oracle.com/co/scm/logistics/transportation-management/what-is-transportation-management-system/>
- Othmani, I., LaDue, M., & Mevissen, M. (21 de Agosto de 2022). *Exploring quantum computing use cases for logistics*. Obtenido de IBM: <https://www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/en-us/report/quantum-logistics>
- Pérez, G., Barleta, E., & Sánchez, R. (21 de ABRIL de 2020). *La revolución industrial 4.0 y el advenimiento de una logística 4.0*. Obtenido de Repositorio Digital Comisión económica para América Latina y el Caribe: <https://hdl.handle.net/11362/45454>
- Perri, L., & Wiles, J. (27 de Octubre de 2022). *Por qué la inteligencia artificial adaptativa es importante para tu empresa*. Obtenido de Gartner: <https://www.gartner.es/es/articulos/por-que-la-ia-adaptativa-es-importante-para-tu-empresa#:~:text=La%20IA%20adaptativa%20crea%20una,capacidades%20de%20inteligencia%20de%20decisiones>
- Politecnico de Suramerica. (11 de septiembre de 2024). *Por qué todas las empresas se deberían capacitar en IA*. Obtenido de Politecnico de Suramerica: <https://www.polisura.edu.co/por-que-todas-empresas-se-deberian-capacitar-en-ia#h-capacitarse-en-ia-es-asegurar-el-futuro-de-las-empresas>
- Psico-smart. (28 de Agosto de 2024). *¿Cuáles son los principales desafíos en la adopción de tecnologías de gestión de talento y cómo superarlos?* Obtenido de Vorecol: <https://psico-smart.com/articulos/articulo-cuales-son-los-principales-desafios-en-la-adopcion-de-tecnologias-de-gestion-de-talento-y-como-superarlos-130905#2.-la-integraci%C3%B3n-de-sistemas:-desaf%C3%ADos-t%C3%A9cnicos-y-soluciones-->
- Quantum Economic Development Consortium (QED-C). (2024). *Quantum Computing for Transportation and Logistics*. Arlington, VA.
- Quiroz, C. (16 de Junio de 2023). *Sistemas Heterogéneos*. Obtenido de Genially: <https://view.genially.com/648bbaa12e0076001899ab69/presentation-sistemas-heterogeneos>
- RAE. (5 de Agosto de 2020). *Optimizar*. Obtenido de Diccionario de la lengua española: <https://dle.rae.es/optimizar>
- reta europe. (25 de Abril de 2024). *Winner Best AI & Robotics Application 2024*. Obtenido de EHI Retail Institute: <https://www.reta-europe.com/best-ai-robotics-application-2024-dm-drogerie-markt-dmtech/>
- Santander Universidades. (12 de Octubre de 2022). *Roadmap: qué es, para qué sirve y cómo elaborarlo*. Obtenido de Santander Open Academy: <https://www.santanderopenacademy.com/es/blog/roadmap-que-es.html>
- SAP. (21 de Octubre de 2021). *¿Qué es la transformación digital?* Obtenido de SAP: <https://www.sap.com/latinamerica/insights/what-is-digital-transformation.html>
- SAP. (17 de Octubre de 2023). *¿Qué es un sistema de gestión de almacenes (WMS)?* Obtenido de SAP: <https://www.sap.com/latinamerica/products/scm/extended-warehouse-management/what-is-a-wms.html>

Eduar Aponte Parejo

SAP. (7 de Febrero de 2023). *SAP Extended Warehouse Management (SAP EWM)*. Obtenido de SAP: <https://www.sap.com/latinamerica/products/scm/extended-warehouse-management.html>

SAP Concur Team. (09 de Mayo de 2022). *¿Qué es la logística verde? Claves para entenderla*. Obtenido de SAP Concur: https://www.concur.co/blog/article/logistica-verde?&cookie_preferences=gdpr

SAP España. (30 de Marzo de 2023). *¿Por qué es importante tener una logística sostenible?* Obtenido de SAP: <https://news.sap.com/spain/2023/03/logistica-sostenible/>

Sayol, I. (30 de Enero de 2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en la Logística*. Obtenido de Ignasi Sayol: <https://ignasisayol.com/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible-ods-en-la-logistica/>

ScienceDirect. (31 de Octubre de 2021). *Data Dependency*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/data-dependency>

ScienceDirect. (27 de Enero de 2022). *Data Interoperability*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/data-interoperability>

ScienceDirect. (24 de Noviembre de 2023). *Coprocesador*. Obtenido de ScienceDirect: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/coprocessor>

Sengupta, K. (30 de Mayo de 2024). *Unlocking the true potential of digital twins in supply chains*. Obtenido de MAERSK: <https://www.maersk.com/insights/digitalisation/2024/05/30/digital-twins-supply-chain>

Siemens Digital Logistics GmbH. (2021). *SUCCESS STORY Generating Capacities, Integrative Network Planning at dm-drogerie markt*. Frankenthal Germany: Siemens Digital Logistics GmbH 2021.

SimpliRoute. (19 de Marzo de 2023). *Smart Logistics: Qué Es y sus Ventajas*. Obtenido de SimpliRoute: <https://simpliroute.com/es/blog/smart-logistics>

SOAINT. (31 de Julio de 2024). *Interoperabilidad en la Era Digital: Desafíos y Soluciones en Seguridad de Datos*. Obtenido de SOAINT: <https://soaint.com/blog/interoperabilidad-en-la-era-digital-desafios-y-soluciones-en-seguridad-de-datos/>

Susnjara, S., & Smalley, I. (14 de Febrero de 2024). *¿Qué es la computación en la nube?* Obtenido de IBM: <https://www.ibm.com/es-es/topics/cloud-computing>

Thapar, K. (23 de Agosto de 2024). *Understanding Multiple Linear Regression in Machine Learning*. Obtenido de Pickl.AI: <https://www.pickl.ai/blog/understanding-multiple-linear-regression-in-machine-learning/>

Toyota. (08 de Noviembre de 2022). *Método de clasificación ABC: qué es y cómo optimizar el inventario*. Obtenido de Toyota-Forklifts.es: <https://blog.toyota-forklifts.es/clasificacion-abc-para-optimizar-flujos-inventario#:~:text=La%20clasificaci%C3%B3n%20ABC%20es%20una,de%20manipulaci%C3%B3n%20de%20los%20art%C3%ADculos>

Eduar Aponte Parejo

- UE. (3 de Octubre de 2018). *Reglamento general de protección de datos*. Obtenido de Your Europe: https://europa.eu/youreurope/business/dealing-with-customers/data-protection/data-protection-gdpr/index_es.htm
- UIT & PNUD. (17 de Septiembre de 2023). *La tecnología digital contribuye directamente a la consecución del 70 % de las metas de los ODS, según la UIT, el PNUD y sus socios*. Obtenido de PNUD: <https://www.undp.org/es/comunicados-de-prensa/la-tecnologia-digital-contribuye-al-70-de-las-metas-de-los-ods-segun-la-uit-el-pnud-y-sus-socios>
- UN. (22 de Marzo de 2015). *Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles*. Obtenido de UN: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
- UN. (22 de Marzo de 2015). *Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles*. Obtenido de UN: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>
- UN. (22 de Marzo de 2015). *Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos*. Obtenido de UN: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- UN. (22 de Marzo de 2015). *Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación*. Obtenido de Naciones Unidas: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>
- Universidad Europea. (22 de Enero de 2024). *Qué es la logística 4.0 y qué beneficios aporta a las empresas*. Obtenido de Universidad Europea: <https://universidadeuropea.com/blog/que-es-la-logistica-4-0/>
- Universidad Europea Online. (2 de Octubre de 2023). *¿Qué es la industria 4.0 y cuáles son sus características?* Obtenido de Universidad Europea Online: <https://colombia.universidadeuropea.com/blog/industria-4-0/>
- UPS. (16 de Junio de 2021). *Más de 100 años de innovación*. Obtenido de UPS: <https://about.ups.com/us/es/our-company/our-history.html#:~:text=Es%20un%20mundo%20grande%20y%20hermoso&text=Actualmente%20UPS%20opera%20en%20m%C3%A1s,territorios%20de%20todo%20el%20mundo>
- Valdés, L., & Pérez, G. (17 de Septiembre de 2020). *Transformación digital en la logística de América Latina y el Caribe*. Obtenido de Repositorio Digital Comisión económica para América Latina y el Caribe: <https://hdl.handle.net/11362/46018>
- Venkata, P. (2021). Artificial Intelligence for Real-Time Logistics and Transportation Optimization in Retail Supply Chains: Techniques, Models, and Applications. *Journal of Machine Learning for Healthcare Decision Support*, vol. 1, 88-126.
- VIU ROIG, M., & CASTILLO, C. (2022). Evolución de la logística: pasado, presente y futuro. *Oikonomics [en línea]*.
- Weise, J. (24 de Noviembre de 2019). *ORION: Route Optimization at UPS And Drivers Are Still Not Turning Left ...* Obtenido de Joachim Weise: <https://joachimweise.github.io/post/2019-11-30-ups-orion/>

Eduar Aponte Parejo

Wiles, J. (15 de Agosto de 2023). *Adopta este enfoque para evaluar el ROI de la IA generativa*.
Obtenido de Gartner: <https://www.gartner.es/es/articulos/adopta-este-enfoque-para-evaluar-el-roi-de-la-ia-generativa>

World Economic Forum. (19 de Enero de 2016). *What is the fourth industrial revolution?*
Obtenido de World Economic Forum: <https://www.weforum.org/stories/2016/01/what-is-the-fourth-industrial-revolution/>

World Economic Forum. (3 de Mayo de 2022). *¿Qué es la "Industria 4.0" y qué significará para los países en desarrollo?* Obtenido de World Economic Forum:
<https://es.weforum.org/stories/2022/05/que-es-la-industria-4-0-y-que-significara-para-los-paises-en-desarrollo/>