



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE LA CONEXIÓN DE LA LOGÍSTICA INVERSA CON LOS PRINCIPIOS LEAN EN EL CONTEXTO DE LA INDUSTRIA 4.0 EN E- COMMERCE

Autor: Javier Alfayate Celis

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Susana Ortiz Marcos

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“ESTUDIO DE LA CONEXIÓN DE LA LOGÍSTICA INVERSA CON LOS
PRINCIPIOS LEAN EN EL CONTEXTO DE LA INDUSTRIA 4.0 EN E-COMMERCE”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Javier Alfayate Celis

Fecha: 10 / 07 /2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 15 / 07 /2025

EL CODIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Susana Ortiz Marcos

Fecha: 15 / 07 /2025

ESTUDIO DE LA CONEXIÓN DE LA LOGÍSTICA INVERSA CON LOS PRINCIPIOS LEAN EN EL CONTEXTO DE LA INDUSTRIA 4.0 EN E-COMMERCE

Autor: Alfayate Celis, Javier.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Co-Director: Ortíz Marcos, Susana.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

Este Trabajo Fin de Máster analiza las sinergias entre la logística inversa, la metodología Lean y las tecnologías de la Industria 4.0, con el fin de optimizar las cadenas de suministro en el sector del e-commerce. Mediante el estudio de dos modelos representativos, un B2C textil y un B2B de fabricación aditiva, y un análisis de correlaciones, el proyecto identifica que la combinación de estos tres ejes es más efectiva cuando se utiliza para gestionar la variabilidad, reducir la incertidumbre y facilitar la toma de decisiones en tiempo real. Se destaca que tecnologías como la Inteligencia Artificial, el IoT y la Nube son cruciales ya que, al proporcionar datos en tiempo real, potencian la aplicación de principios Lean como el control de errores (Poka-Yoke), la estabilización de flujos (JIT, Heijunka) y la mejora continua (Kaizen), transformando así un proceso reactivo en uno adaptativo. Finalmente, en el proyecto se propone un modelo de diagnóstico práctico, diseñado para que las empresas puedan autoevaluar sus operaciones para identificar sinergias y así validar empíricamente el trabajo.

Palabras Clave: Metodología Lean, Industria 4.0, Logística inversa, sinergias, e-commerce, modelo de diagnóstico.

1. Introducción

Con el crecimiento que ha experimentado el e-commerce en los últimos años, la gestión de la logística inversa se ha convertido en un desafío crítico que exige cadenas de suministro más eficientes y sostenibles. Este proyecto aborda este desafío estudiando las sinergias que surgen al combinar la logística inversa con la

metodología Lean y la Industria 4.0. El objetivo es analizar de forma estructurada esta interrelación en dos modelos representativos seleccionados dentro del e-commerce, para identificar las sinergias más fuertes entre los tres conceptos con el objetivo de ayudar a mejorar las cadenas de suministro globales.

2. Definición del Proyecto

El objetivo principal de este proyecto es analizar la interrelación entre los principios Lean, la logística inversa y las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0. Para ello se han realizado los siguientes pasos:

1. Analizar el Estado del Arte de los conceptos a estudiar
2. Identificar dos procesos representativos de e-commerce
3. Analizar las sinergias entre los tres conceptos en cada etapa de los procesos
4. Desarrollar un modelo de diagnóstico para empresas del sector con el objetivo de validar empíricamente el proyecto.

3. Descripción del Modelo

Como se ha mencionado anteriormente, los procesos elegidos fueron un B2C general de textil y un B2B de fabricación aditiva basado en la empresa Xometry. Para el análisis se tuvieron en cuenta las etapas clave de cada proceso de logística inversa, teniendo en cuenta los principales desafíos de cada uno.

En respecto a las tecnologías de la Industria 4.0, las mencionadas son: Cloud, Robots autónomos, IoT, Big Data, IA, AR & VR, Ciberseguridad, RPA, Digital Twin, Control Tower, Blockchain, Fabricación Aditiva y Cobots.

Las técnicas Lean analizadas son las siguientes: VSM, 5S, Kanban, Poka-Yoke, Andon, SMED, 5 Whys, Heijunka, Jidoka, TPM y JIT.

Para el análisis entre Lean E industria 4.0 se reestructuraron las técnicas Lean para profundizar más en los procesos. Una de las matrices utilizadas para la comparación es la siguiente:

TEXTIL		Nube	Robots Autónomos	IoT	Big Data	IA	AR & VR	Ciberseguridad	RPA	Gemelo Digital	Control Tower	Blockchain	Fabricación Aditiva	Cobots	
JIT	Pull System	9	5	9	8	7	0	2	5	5	6	2	0	5	63
	SMED en los centros de distribución	6	8	9	5	6	0	2	4	5	4	1	1	7	58
	Heijunka post rebajas	7	5	7	6	6	0	2	4	5	4	2	0	3	51
	Kanban	9	4	8	7	7	0	3	8	6	5	5	0	3	65
Jidoka	Andon digital	9	5	7	4	6	4	4	7	6	6	3	0	6	67
	Poka-Yoke en los sistemas informaticos	7	4	6	6	7	3	6	5	6	5	3	0	5	63
	Clasificación automática de las devoluciones	8	5	8	6	9	5	4	5	5	6	3	2	4	70
	Transporte autónomo en el CD	6	10	7	7	8	0	3	5	6	7	2	0	9	70
	Parada automáticas	5	7	10	5	8	0	2	5	6	5	2	0	5	60
Muda	Gemba digital del flujo completo	9	0	6	8	7	5	5	4	7	9	4	0	0	64
	5 Why's ante errores repetitivos	6	0	5	10	8	2	3	4	5	6	3	0	0	52
	Estándares de trabajo	7	8	5	5	5	0	2	7	4	6	2	0	7	58
	VSM completo	9	0	9	9	7	4	4	6	10	10	4	0	0	72
	Eliminación de pasos manuales	7	6	6	6	6	0	2	8	5	6	2	3	0	57
	Reducción de movimientos innecesarios en los CD	5	6	8	7	9	3	2	3	3	7	2	3	2	60
	Optimización de rutas de recogida	7	5	7	8	8	3	3	6	6	9	4	0	5	71
Kaizen	Formación cruzada	8	0	8	10	10	6	1	3	9	4	1	0	0	60
	Ringi	8	0	5	8	9	0	2	5	6	3	2	0	0	48
	5S físico y digital	7	0	9	5	5	2	3	5	8	5	2	2	0	53
	TPM en las máquinas de los CD y en los sistemas	6	7	8	6	6	6	4	5	6	6	3	6	7	76
	PDCA para mejorar el sistema de devoluciones	8	0	7	7	7	3	5	5	6	7	5	2	0	62

153 85 154 143 151 46 64 109 125 126 57 19 68

Figura 1. Matriz de correlación del proceso textil. Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para el modelo de diagnóstico se establecieron las mismas tablas y matrices usadas en el proyecto como cuestionarios para las empresas, así como los mismos criterios de evaluación. De esta manera estas autoevaluaciones podrán validar empíricamente lo estudiando en el trabajo presente.

4. Resultados

Los resultados del análisis demuestran que la optimización de la logística inversa depende del contexto del e-commerce. En su relación con la Industria 4.0, el modelo textil se necesitan la IA y Big Data para gestionar el gran volumen de devoluciones, mientras que el de fabricación se beneficia más de Cloud y Digital Twin para garantizar la comunicación y precisión técnica requerida en este contexto. Respecto a la metodología Lean, en el textil se priorizan técnicas de control de errores como Poka-Yoke, y el de fabricación se centra en herramientas de análisis como VSM y 5 Whys.

Por otro lado, la mayor correlación entre Industria 4.0 y Lean se da con tecnologías como el IoT, CCloud e IA, ya que el flujo de datos en tiempo real que proporcionan es esencial para ejecutar los principios Lean.

5. Conclusiones

La conclusión principal del estudio es que las sinergias más potentes entre logística inversa, Lean e Industria 4.0 surgen al abordar los retos clave del proceso: la gestión de la variabilidad y la incertidumbre en tiempo real.

En cuanto a las técnicas y tecnologías más importantes se concluye que la Inteligencia Artificial es una tecnología clave para la logística inversa; que técnicas como Poka-Yoke y JIT son vitales para aplicar Lean en los procesos de devolución; y que el IoT, la Nube y la IA son las tecnologías más determinantes para potenciar los principios Lean al proporcionar un flujo de datos constante.

STUDY OF THE CONNECTION BETWEEN REVERSE LOGISTICS AND LEAN PRINCIPLES IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0 IN E-COMMERCE

Author: Alfayate Celis, Javier.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Co-Supervisor: Ortiz Marcos, Susana.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

ABSTRACT

This Final Master's Dissertation analyzes the synergies between reverse logistics, the Lean methodology, and Industry 4.0 technologies, in order to optimize supply chains in the e-commerce sector. By studying two representative models, a B2C textile and a B2B additive manufacturing model, and through a correlation analysis, this research identifies that the combination of these three areas is most effective when used to manage variability, reduce uncertainty, and facilitate real-time decision-making. The study highlights that technologies such as Artificial Intelligence, IoT, and the Cloud are crucial because, by providing real-time data, they enhance the application of Lean principles like error-proofing (Poka-Yoke), flow stabilization (JIT, Heijunka), and continuous improvement (Kaizen), thereby transforming a reactive process into an adaptive one. Finally, the project proposes a practical diagnostic model, designed for companies to self-assess their operations in order to identify synergies and empirically validate this research.

Keywords: Lean Methodology, Industry 4.0, Reverse Logistics, synergies, e-commerce, diagnostic model.

1. Introduction:

With the growth that e-commerce has experienced in recent years, managing reverse logistics has become a critical challenge that demands more efficient and sustainable supply chains. This project addresses this challenge by studying the synergies that arise from combining reverse logistics with the Lean methodology and Industry 4.0. The objective is to structurally analyze this interrelationship in two representative models

selected from within e-commerce, in order to identify the strongest synergies among the three concepts with the goal of helping to improve global supply chains.

2. Project Definition

The main objective of this project is to analyze the interrelationship between Lean principles, reverse logistics, and the enabling technologies of Industry 4.0. To do this, the following steps have been carried out:

1. Analyze the State of the Art of the concepts to be studied.
2. Identify two representative e-commerce processes.
3. Analyze the synergies between the three concepts at each stage of the processes.
4. Develop a diagnostic model for companies in the sector with the objective of empirically validating the project.

3. Description of the model

As mentioned previously, the chosen processes were a general B2C textile model and a B2B additive manufacturing model based on the company Xometry. For the analysis, the key stages of each reverse logistics process were taken into account, considering the main challenges of each one.

Regarding the Industry 4.0 technologies, the ones mentioned are: Cloud, Autonomous Robots, IoT, Big Data, AI, AR & VR, Cybersecurity, RPA, Digital Twin, Control Tower, Blockchain, Additive Manufacturing, and Cobots.

The Lean techniques analyzed are the following: VSM, 5S, Kanban, Poka-Yoke, Andon, SMED, 5 Whys, Heijunka, Jidoka, TPM, and JIT.

For the analysis between Lean and Industry 4.0, the Lean techniques were restructured to delve deeper into the processes. One of the matrices used for the comparison is the following:

TEXTIL		Nube	Robots Autónomos	IoT	Big Data	IA	AR & VR	Ciberseguridad	RPA	Gemelo Digital	Control Tower	Blockchain	Fabricación Aditiva	Cobots	
JIT	Pull System	9	5	9	8	7	0	2	5	5	6	2	0	5	63
	SMED en los centros de distribución	6	8	9	5	6	0	2	4	5	4	1	1	7	58
	Heijunka post rebajas	7	5	7	6	6	0	2	4	5	4	2	0	3	51
	Kanban	9	4	8	7	7	0	3	8	6	5	5	0	3	65
Jidoka	Andon digital	9	5	7	4	6	4	4	7	6	6	3	0	6	67
	Poka-Yoke en los sistemas informaticos	7	4	6	6	7	3	6	5	6	5	3	0	5	63
	Clasificación automática de las devoluciones	8	5	8	6	9	5	4	5	5	6	3	2	4	70
	Transporte autónomo en el CD	6	10	7	7	8	0	3	5	6	7	2	0	9	70
	Parada automáticas	5	7	10	5	8	0	2	5	6	5	2	0	5	60
Muda	Gemba digital del flujo completo	9	0	6	8	7	5	5	4	7	9	4	0	0	64
	5 Why's ante errores repetitivos	6	0	5	10	8	2	3	4	5	6	3	0	0	52
	Estándares de trabajo	7	8	5	5	5	0	2	7	4	6	2	0	7	58
	VSM completo	9	0	9	9	7	4	4	6	10	10	4	0	0	72
	Eliminación de pasos manuales	7	6	6	6	6	0	2	8	5	6	2	3	0	57
	Reducción de movimientos innecesarios en los CD	5	6	8	7	9	3	2	3	3	7	2	3	2	60
	Optimización de rutas de recogida	7	5	7	8	8	3	3	6	6	9	4	0	5	71
Kaizen	Formación cruzada	8	0	8	10	10	6	1	3	9	4	1	0	0	60
	Ringi	8	0	5	8	9	0	2	5	6	3	2	0	0	48
	5S físico y digital	7	0	9	5	5	2	3	5	8	5	2	2	0	53
	TPM en las máquinas de los CD y en los sistemas	6	7	8	6	6	6	4	5	6	6	3	6	7	76
	PDCA para mejorar el sistema de devoluciones	8	0	7	7	7	3	5	5	6	7	5	2	0	62

153 85 154 143 151 46 64 109 125 126 57 19 68

Figure 1. Correlation matrix for the textile process. Source: Own elaboration

Finally, for the diagnostic model, the same tables and matrices used in the project were established as questionnaires for companies, as well as the same evaluation criteria. This way, these self-assessments will be able to empirically validate the findings of this project.

4. Results

The results of the analysis show that the optimization of reverse logistics depends on the e-commerce context. In its relationship with Industry 4.0, the textile model requires AI and Big Data to manage the large volume of returns, while the manufacturing model benefits more from Cloud and Digital Twin to ensure the communication and technical precision required in this context. Regarding the Lean methodology, the textile model prioritizes error-proofing techniques like Poka-Yoke, while the manufacturing model focuses on analysis tools like VSM and 5 Whys. On the other hand, the strongest correlation between Industry 4.0 and Lean occurs with technologies like IoT, Cloud, and AI, as the real-time data flow they provide is essential for executing Lean principles.

5. Conclusions

The main conclusion of the study is that the most powerful synergies between reverse logistics, Lean, and Industry 4.0 arise when addressing the key challenges of the process: managing variability and uncertainty in real-time. Regarding the most important techniques and technologies, it is concluded that Artificial Intelligence is a key technology for reverse logistics; that techniques like Poka-Yoke and JIT are vital for applying Lean in return processes; and that IoT, the Cloud, and AI are the most crucial technologies for enhancing Lean principles by providing a constant data flow.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Motivación	3
1.2 Objetivos y Metodología	3
1.3 Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible.....	5
Capítulo 2. Estado de la cuestión.....	6
2.1 Industria 4.0.....	6
2.1.1 Definición y Fundamentos.....	6
2.1.2 Barreras y Desafíos en la implementación.....	8
2.1.3 Estado de la Adopción Tecnológica.....	11
2.2 Metodología Lean.....	13
2.2.1 Origen y Fundamentos	14
2.2.2 Evolución hacia el Lean Digital.....	15
2.2.3 Desafíos y Adaptación en la Era Digital.....	16
2.3 Logística Inversa	18
2.3.1 Evolución de la logística inversa.....	18
2.3.2 Desafíos en el contexto de E-Commerce	20
2.3.3 Digitalización en la Logística Inversa.....	21
Capítulo 3. Identificación de Procesos	23
3.1 Modelo B2C – Textil.....	23
3.1.1 Etapas principales del modelo de textil.....	25
3.2 Modelo B2B – Fabricación 3D	28
3.2.1 Etapas principales del Modelo de Fabricación	28
3.3 Conclusión.....	31
Capítulo 4. Análisis de Correlaciones.....	32
4.1 Logística Inversa – Industria 4.0	32
4.1.1 Tecnologías Habilitadoras de la Industria 4.0.....	32
4.1.2 Resultado y Justificación del Modelo de Textil.....	34
4.1.3 Resultado y Justificación del Modelo de Fabricación	36

4.2	Logística Inversa – Lean	39
4.2.1	<i>Técnicas propuestas de la metodología Lean</i>	39
4.2.2	<i>Resultado y Justificación del Modelo de Textil</i>	41
4.2.3	<i>Resultado y Justificación del Modelo de Fabricación</i>	44
4.3	Industria 4.0 – Lean.....	47
4.3.1	<i>Elección de las técnicas y tecnologías analizadas</i>	47
4.3.2	<i>Criterio utilizado para la asignación de puntuaciones</i>	49
4.3.3	<i>Matriz del Modelo de Textil</i>	51
4.3.4	<i>Matriz del Modelo de Fabricación</i>	52
Capítulo 5. Resultados		53
5.1	Sinergias entre Logística inversa e I4.0.....	53
5.1.1	<i>Modelo de Textil</i>	53
5.1.2	<i>Modelo de Fabricación</i>	54
5.1.3	<i>Conclusión</i>	54
5.2	Sinergias entre Logística inversa y Lean.....	55
5.2.1	<i>Modelo de Textil</i>	55
5.2.2	<i>Modelo de Fabricación</i>	56
5.2.3	<i>Conclusión</i>	56
5.3	Correlación entre Industria 4.0 y Lean	56
5.3.1	<i>Tecnologías con más impacto</i>	57
5.3.2	<i>Sinergias en Just-In-Time</i>	57
5.3.3	<i>Sinergias en Jidoka</i>	58
5.3.4	<i>Sinergias en Muda</i>	59
5.3.5	<i>Sinergias en Kaizen</i>	59
5.3.6	<i>Conclusión</i>	60
5.4	Síntesis general.....	60
Capítulo 6. Modelo de Diagnóstico		62
6.1	Criterios para el Modelo.....	63
6.1.1	<i>Metodología para la implantación</i>	63
6.1.2	<i>Requisitos necesarios para la implantación</i>	64
6.2	Definición del Modelo.....	66

6.2.1 Cuestionario para el análisis de sinergias entre Logística inversa y I4.0	67
6.2.2 Cuestionario para el análisis de sinergias entre Logística inversa y Lean.....	68
6.2.3 Cuestionario para el análisis de sinergias entre Lean y I4.0.....	69
6.2.4 Metodología de uso del modelo.....	70
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	71
7.1 Conclusiones	71
7.2 Posibles trabajos futuros.....	73
Capítulo 8. Bibliografía.....	74

Índice de figuras

Ilustración 1. ODS alineados con el proyecto	5
Ilustración 2. Visión de la Industria 4.0. Fuente: (NTT DATA, 2023).....	8
Ilustración 3. Principales barreras contra la adopción tecnológica. Fuente: (NTT DATA, 2023).....	9
Ilustración 4. Tendencias de inversión en tecnologías de la I4.0. Fuente:(NTT DATA, 2023)	12
Ilustración 5. Ejemplo de red logística. Fuente: (Nanayakkara et al., 2022).....	19
Ilustración 6. Modelo de logística inversa del sector textil. Fuente:(Marriott et al., 2025) 24	
Ilustración 7. Resumen de etapas clave. Fuente: Elaboración propia	31
Ilustración 8. Cuestionario para el análisis de sinergias entre Logística inversa y I4.0. Fuente: Elaboración propia.....	67
Ilustración 9. Cuestionario para el análisis de sinergias entre Logística inversa y Lean. Fuente: Elaboración propia.....	68
Ilustración 10. Cuestionario para el análisis de sinergias entre I4.0 y Lean en un proceso de fabricación. Fuente: Elaboración propia.....	69
Ilustración 11. Cuestionario para el análisis de sinergias entre I4.0 y Lean en un proceso de textil. Fuente: Elaboración propia	69

Índice de tablas

Tabla 1. Posibles rutas de retorno. Fuente: Elaboración propia	27
Tabla 2. Tecnologías habilitadoras con más relevancia en el proceso B2C. Fuente: Elaboración propia.....	34
Tabla 3. Tecnologías habilitadoras con más relevancia en el proceso B2B. Fuente: Elaboración propia.....	36
Tabla 4. Técnicas Lean con más relevancia en el proceso B2C. Fuente: Elaboración propia	41
Tabla 5. Técnicas Lean con más relevancia en el proceso B2B. Fuente: Elaboración propia	44
Tabla 6. Técnicas Lean elegidas para el análisis de correlación para el modelo B2B. Fuente: Elaboración propia.....	48
Tabla 7. Técnicas Lean elegidas para el análisis de correlación para el modelo B2C. Fuente: Elaboración propia.....	48
Tabla 8. Resumen del criterio de puntuación. Fuente: Elaboración propia.....	50
Tabla 9. Matriz de correlación del modelo B2C. Fuente: Elaboración propia.....	51
Tabla 10. Matriz de correlación del modelo B2B. Fuente: Elaboración propia.....	52
Tabla 11. Criterio de puntuación propuesto para los cuestionarios. Fuente: Elaboración propia	70

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, tanto el sector industrial como el comercio electrónico han experimentado grandes transformaciones impulsadas por la globalización, la evolución tecnológica y las crecientes demandas de sostenibilidad. La Industria 4.0 aparece como la respuesta a la necesidad de integrar tecnologías avanzadas en los procesos productivos y logísticos, promoviendo operaciones inteligentes y conectadas. Por otra parte, la metodología Lean se ha consolidado como un enfoque eficaz para la mejora continua, enfocándose en la eliminación de desperdicios y la optimización de procesos. La combinación de estos dos conceptos ofrece soluciones únicas para redefinir la logística inversa, un componente crucial en la gestión eficiente y sostenible de las cadenas de suministro modernas, tanto en el ámbito industrial como en el del comercio electrónico.

La logística inversa se refiere al proceso de planificar, implementar y controlar eficientemente el flujo de materiales, productos e información desde el punto de consumo hasta el punto de origen, con el propósito de recuperar valor o desechar adecuadamente los residuos. Este proceso es fundamental en la economía circular, ya que facilita la reutilización, el reciclaje y la reducción de desechos, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y económica. En el sector del e-commerce, la logística inversa es un factor clave debido al volumen creciente de devoluciones y a las altas expectativas de los consumidores en términos de rapidez y transparencia. Sin embargo, la logística inversa tradicional enfrenta grandes desafíos, como la variabilidad en la calidad y cantidad de los productos devueltos, la complejidad en la clasificación y procesamiento de estos materiales, y la necesidad de sistemas de información adecuados para gestionar eficientemente estos flujos.

La Industria 4.0 introduce nuevas tecnologías que permiten dar solución a estos desafíos de manera efectiva. La implementación del Internet de las Cosas (IoT), el Big Data y la inteligencia artificial permiten una mayor visibilidad y control sobre los procesos logísticos.

Por ejemplo, en el comercio electrónico, la utilización de sensores y dispositivos conectados facilita el monitoreo en tiempo real de los productos devueltos, mejorando la trazabilidad y optimizando las rutas de retorno. Además, el análisis de datos permite predecir patrones de devolución y ajustar los recursos necesarios para su gestión, aumentando la eficiencia operativa y reduciendo costes del proceso.

Introducir los principios Lean en este entorno tecnológico mejora aún más los beneficios. Lean se centra en la eliminación de actividades que no agregan valor, la mejora continua y la estandarización en los procesos. Al aplicar estos conceptos en conjunto con las herramientas de la Industria 4.0, es posible diseñar sistemas de logística inversa más ágiles y adaptativos tanto para la industria manufacturera como para el comercio electrónico. Por ejemplo, la automatización de procesos rutinarios mediante robots reduce tiempos y errores, mientras que la inteligencia artificial puede optimizar rutas de devolución de productos, reduciendo así el tiempo y los costes de este proceso. Esta sinergia entre Lean y las tecnologías avanzadas facilita la creación de cadenas de suministro más resilientes y sostenibles, capaces de responder a las exigencias del mercado digital.

A pesar de las ventajas teóricas, la implementación práctica de estas tecnologías presenta desafíos que requieren una investigación detallada. La resistencia al cambio organizacional, la necesidad de grandes inversiones en tecnología y formación, y la complejidad en la integración de estos sistemas son obstáculos que las empresas deben superar. Además, actualmente no se dispone de una gran cantidad de estudios que aborden las sinergias de la logística inversa, los principios Lean y las tecnologías de la Industria 4.0 en los contextos de cadenas de suministro de procesos de fabricación y las plataformas de comercio electrónico.

Este Trabajo de Fin de Máster se propone un análisis estructurado de la relación entre estas tres dimensiones clave. Para ello, se estudiará el estado del arte de cada una por separado, se seleccionarán dos modelos de e-commerce, uno B2B y otro B2C, para analizar sus procesos de logística inversa, y se construirán matrices de correlación que permitan visualizar los puntos de convergencia entre tecnologías 4.0, principios Lean y etapas logísticas.

Finalmente, el trabajo concluirá con la propuesta de un marco teórico, que sirva como base para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas orientadas a la mejora de la logística inversa en entornos digitales.

1.1 MOTIVACIÓN

La motivación para realizar este proyecto radica en la necesidad de afrontar los retos que presenta la gestión de la logística inversa en un entorno caracterizado por la globalización, el e-commerce y las crecientes demandas de sostenibilidad. La integración de los principios Lean y las tecnologías de la Industria 4.0 ofrecen un enfoque innovador para optimizar estos procesos, eliminando ineficiencias y reduciendo el impacto ambiental de las operaciones logísticas.

En el contexto actual, la logística inversa enfrenta desafíos como la variabilidad en las devoluciones, la complejidad en la clasificación de productos y la necesidad de mejorar la trazabilidad y la reutilización de materiales. Este proyecto está motivado por el potencial de las tecnologías de la Industria 4.0, como el Big Data, la inteligencia artificial y la automatización, para abordar dichos problemas al proporcionar soluciones basadas en datos, mejorar la toma de decisiones y optimizar recursos. Además, la aplicación de principios Lean ayuda a identificar y eliminar actividades que no generan valor, mejorando la eficiencia general del sistema. Este enfoque resulta especialmente relevante en un entorno de cadenas de suministro globales, donde las empresas buscan ser competitivas mediante la sostenibilidad y la adaptación ágil a los cambios en la demanda.

1.2 OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

El objetivo principal del proyecto es analizar la interrelación entre los principios Lean, la logística inversa y las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0, con el fin de identificar oportunidades de optimización y mejora en cadenas de suministro enfocadas en e-commerce.

Para alcanzar este propósito general, se plantean los siguientes objetivos:

1. Conocer las principales tecnologías asociadas a la Industria 4.0, las técnicas más representativas del pensamiento Lean, y el estado actual de la logística inversa en entornos e-commerce.
2. Localizar las etapas clave dentro del proceso de logística inversa donde sea posible aplicar principios Lean y tecnologías 4.0 para generar un mayor impacto operativo.
3. Establecer relaciones de correlación entre los tres conceptos, Industria 4.0, Lean y logística inversa, con el objetivo de identificar sinergias.
4. Proponer un marco teórico que permita orientar estudios futuros y sirva como base para el análisis de procesos logísticos en organizaciones digitales.
5. Plantear un modelo de diagnóstico que permita a las empresas del sector contribuir al estudio de las sinergias entre los conceptos analizados

La metodología se articula en varias fases que corresponden directamente a los objetivos planteados:

1. Analizar el estado del arte sobre la Industria 4.0, la filosofía Lean y la logística inversa en el contexto del comercio electrónico, con el fin de establecer un marco conceptual sólido.
2. Identificar y describir dos modelos de comercio electrónico, uno B2B y otro B2C, para estudiar sus procesos de logística inversa y localizar las etapas clave del proceso.
3. Identificar que principios Lean y tecnologías de la Industria 4.0 tienen más impacto en etapas del proceso de logística inversa, y posteriormente realizar una matriz de correlación entre las técnicas Lean y las tecnologías para optimizar esos procesos.
4. Elaborar conclusiones que sintetizen los hallazgos del trabajo y propongan recomendaciones para integrar Lean, Industria 4.0 y logística inversa en entornos e-commerce.
5. Proponer una metodología y cuestionarios para que rellenen empresas del sector con el objetivo de profundizar en el estudio de las distintas sinergias.

1.3 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

En esta sección se realiza una reflexión sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible que más se alinean con el proyecto a realizar. Estos objetivos son los siguientes:

ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura: El proyecto promueve la transformación de procesos tradicionales hacia modelos más innovadores, utilizando tecnologías de la Industria 4.0 y principios Lean. Esto fomenta la innovación en la logística inversa y contribuye a la creación de infraestructuras sostenibles.

ODS 12: Producción y consumo responsable: La logística inversa está muy relacionada con la gestión de residuos y la reutilización de productos, que son claves para el consumo y producción responsables. Este TFM aporta soluciones para minimizar el desperdicio en las cadenas de suministro y fomenta modelos de economía circular, donde los productos al final de su vida útil se reintroducen al ciclo productivo en lugar de convertirse en desechos.

ODS 13: Acción por el clima: La integración de tecnologías de la Industria 4.0 con la logística inversa y los principios Lean ayuda a reducir la huella de carbono asociada a los procesos de devolución, reciclaje y reutilización de productos. Optimizar rutas, disminuir desperdicios y mejorar la trazabilidad contribuyen significativamente a mitigar los impactos del cambio climático en las redes de suministro globales.



Ilustración 1. ODS alineados con el proyecto

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

En este capítulo se revisa el estado actual de los principales conceptos del proyecto para contextualizar el mismo. Los conceptos analizados son: la Industria 4.0, la Metodología Lean y la logística inversa, esta última más enfocada al ámbito digital.

2.1 INDUSTRIA 4.0

La Industria 4.0 es considerada la cuarta revolución industrial, caracterizada por la integración avanzada de tecnologías digitales, como IoT, inteligencia artificial, robots autónoma, gemelos digitales y Big Data, en los sistemas productivos tradicionales. Su propósito es transformar fábricas convencionales en sistemas ciber-físicos inteligentes, con capacidad de autoajuste, detección de errores en tiempo real, optimización continua y personalización a gran escala. Además, promueve una digitalización transversal de la cadena de valor que impacta en la estrategia organizacional, los procesos, e incluso la sostenibilidad y la resiliencia en entornos globales.

Este enfoque se refuerza cuando se integra con otros marcos de mejora continua como Agile o Lean, aportando una dimensión tecnológica que potencia eficiencia y adaptabilidad. En el escenario actual del e-commerce y la logística inversa, la relevancia de la Industria 4.0 radica en su capacidad para mejorar tanto la trazabilidad como la velocidad de reacción ante cambios en la demanda o en los flujos de retorno.

2.1.1 DEFINICIÓN Y FUNDAMENTOS

Aunque el concepto de Industria 4.0 surgió hace más de una década, su implementación real y extendida sigue siendo un reto pendiente para muchas empresas. La creciente digitalización de los sectores productivos y logísticos ha convertido esta transformación en una necesidad urgente para mantener la competitividad en un mercado global dinámico y en

continua evolución. NTT Data define la Industria 4.0 como "el resultado de la evolución tecnológica de las últimas décadas y que tiene como objetivo llevar a las compañías hacia una transformación digital en todas las fases de su supply chain, sus procesos productivos y su relación con clientes, proveedores y socios" (NTT DATA, 2023). Esta visión integra no solo aspectos técnicos, sino también estratégicos y operativos, proponiendo una transformación integral del tejido empresarial.

Según esta perspectiva, la Industria 4.0 se estructura sobre tres pilares: la digitalización de la cadena de suministro (Digital Supply Chain), la digitalización de la producción (Digital Manufacturing) y la adopción digital como proceso transversal. Esta última se articula mediante elementos como la anticipación, integración, precisión, simplificación, agilidad y autonomía, que a su vez están impulsados por tecnologías clave como la nube, robótica, IoT, big data, inteligencia artificial, realidad aumentada y virtual, ciberseguridad, gemelos digitales, entre otros. Estas tecnologías no solo habilitan nuevas formas de producción, sino que también permiten una gestión más eficiente y adaptable de la cadena de valor.

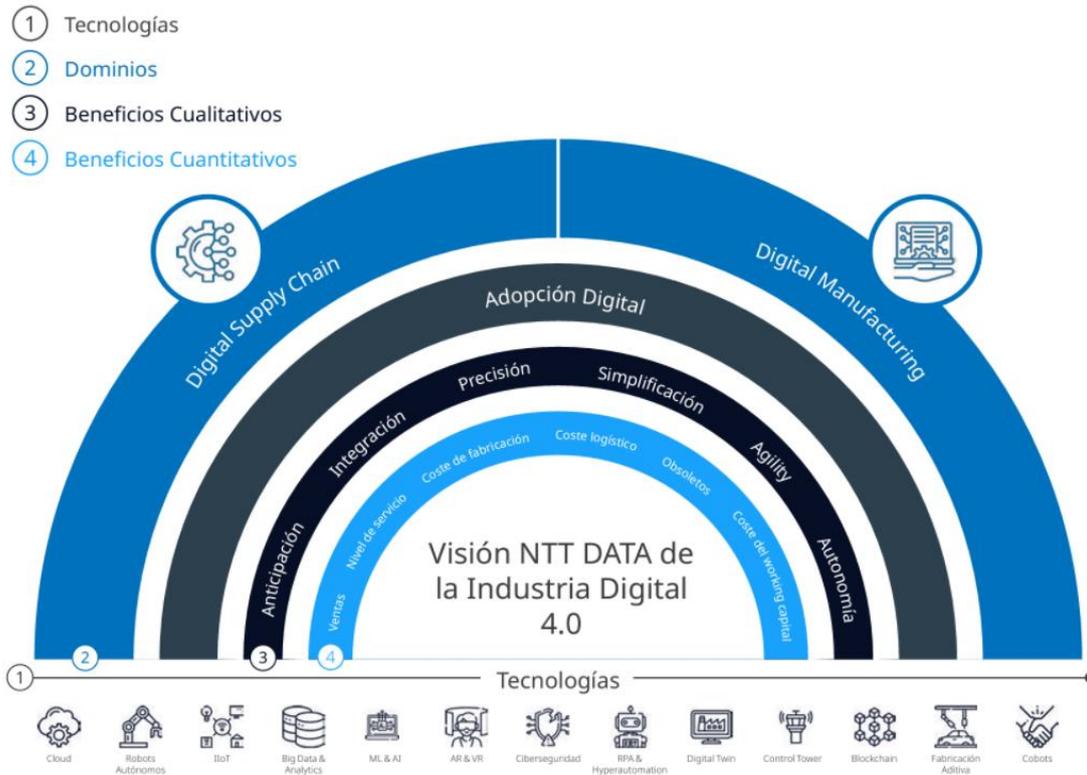


Ilustración 2. Visión de la Industria 4.0. Fuente: (NTT DATA, 2023)

2.1.2 BARRERAS Y DESAFÍOS EN LA IMPLEMENTACIÓN

La adopción de los principios y tecnologías de la Industria 4.0, aun siendo una oportunidad estratégica para la modernización industrial, enfrenta en la práctica un conjunto de barreras que dificultan su implantación efectiva, especialmente en contextos con estructuras rígidas, limitaciones en los presupuestos o escasa experiencia digital. Estas barreras operan a diferentes niveles: desde factores humanos y organizativos, hasta limitaciones tecnológicas, económicas y estratégicas, generando una brecha considerable entre el potencial teórico de la digitalización y su materialización en entornos reales. La siguiente ilustración muestra las principales barreras según un informe de NTT DATA (NTT DATA, 2023).



Ilustración 3. Principales barreras contra la adopción tecnológica. Fuente: (NTT DATA, 2023)

En el plano cultural y organizativo, una de las barreras más significativas sigue siendo la resistencia al cambio, tanto a nivel directivo como operativo. Esta resistencia no suele manifestarse de forma abierta, sino mediante actitudes conservadoras, falta de compromiso con los procesos de transformación y escepticismo hacia el retorno de las inversiones en tecnología. El informe de NTT DATA identifica esta resistencia como la principal barrera para el 19 % de las organizaciones consultadas, lo que refleja una tensión interna entre las dinámicas culturales heredadas y la lógica digital que propone la Industria 4.0. A este problema se suma una segunda dificultad organizativa: la carencia de visión estratégica

integral. Muchas empresas abordan la digitalización mediante proyectos dispersos y sin coordinación, lo que impide que se alcance una integración que dé sentido a las inversiones realizadas (Windmann et al., 2024).

Desde la perspectiva del capital humano, las limitaciones en competencias técnicas son igualmente de importantes. La escasez de profesionales con habilidades específicas en áreas como inteligencia artificial, análisis de datos o mantenimiento predictivo con IoT dificulta la puesta en marcha de proyectos complejos. Esta brecha entre tecnología disponible y capacidades internas limita la autonomía de las organizaciones, incrementa su dependencia de proveedores externos y ralentiza la incorporación de dinámicas de mejora continua (Serror et al., 2021). En este sentido, no solo se requieren perfiles técnicos avanzados, sino también una formación transversal que permita a los distintos niveles de la organización comprender y trabajar en entornos digitalizados. Cuando esta formación no existe, la tecnología se convierte en un recurso infrutilizado o en una fuente de frustración y rechazo.

En el plano económico, el desafío principal radica en la percepción de que las tecnologías 4.0 suponen una inversión elevada con un retorno incierto. Aunque existen evidencias claras sobre su potencial para mejorar la eficiencia, reducir errores y aumentar la trazabilidad, muchas empresas, especialmente pequeñas y medianas, no disponen de modelos de análisis que les permitan estimar el impacto económico concreto de su implementación. El 18 % de las empresas analizadas por NTT DATA identifican esta incertidumbre sobre el retorno de la inversión como una de las principales razones para posponer o ralentizar sus estrategias de digitalización. Esta barrera no se explica únicamente por la falta de liquidez, sino por la dificultad de vincular los beneficios de la transformación digital a indicadores financieros de corto plazo, por lo que muchas de estas empresas no lo ven como algo eficiente.

Además, aparecen limitaciones tecnológicas. Uno de los problemas más recurrentes es la falta de interoperabilidad entre sistemas nuevos y antiguos. Muchas organizaciones operan con arquitecturas tecnológicas obsoletas o aisladas que no fueron diseñadas para integrarse con plataformas digitales modernas. Esta desconexión genera una gran pérdida de eficiencia

que dificulta la conectividad total sobre la que se sostiene la Industria 4.0 (Attiany, 2023). Además, la ausencia de estándares tecnológicos universales dificulta la interoperabilidad entre proveedores y sectores, lo que obliga a las empresas a asumir riesgos adicionales o desarrollar soluciones a medida que aumenta el coste de los proyectos y reducen su escalabilidad.

Otro factor que condiciona el ritmo de adopción es el creciente peso de la ciberseguridad. A medida que las infraestructuras industriales se vuelven más abiertas e interconectadas, también las hacen más vulnerables. Los flujos de datos en tiempo real, la conexión de activos importantes a la nube o el IoT implican riesgos operativos que pueden afectar gravemente al negocio. En este contexto, la protección de los sistemas deja de ser una función técnica específica para convertirse en un componente estructural del diseño.

Aunque todos estos factores aparecen de manera diferenciada en los estudios, lo que comparten es su carácter estructural. No se trata de barreras puntuales, sino de elementos profundamente arraigados en las formas tradicionales de trabajar, que solo pueden superarse mediante estrategias integrales de cambio organizacional, inversión sostenida en capacidades digitales y liderazgo transformador. En ausencia de estos elementos, el riesgo más común es el de una digitalización superficial, que lleva a las ineficiencias del pasado con una nueva tecnología que no genera una mejora real en la eficiencia, la trazabilidad o la capacidad de aprendizaje de la organización.

2.1.3 ESTADO DE LA ADOPCIÓN TECNOLÓGICA

En los últimos años ha habido una clara progresión hacia la adopción de estas tecnologías. Mientras algunas grandes empresas han integrado plenamente herramientas como el análisis predictivo, el IoT y los gemelos digitales, gran parte las empresas aún se encuentran en fases iniciales de madurez tecnológica. El informe de NTT DATA revela que las áreas prioritarias de inversión durante los próximos años incluyen Big Data, el IoT y ciberseguridad, con porcentajes del 17 %, 17 % y 16 % respectivamente, lo que indica que las organizaciones

están orientando sus esfuerzos hacia soluciones concretas que mejoren visibilidad operacional, eficiencia y resiliencia ante ataques digitales.

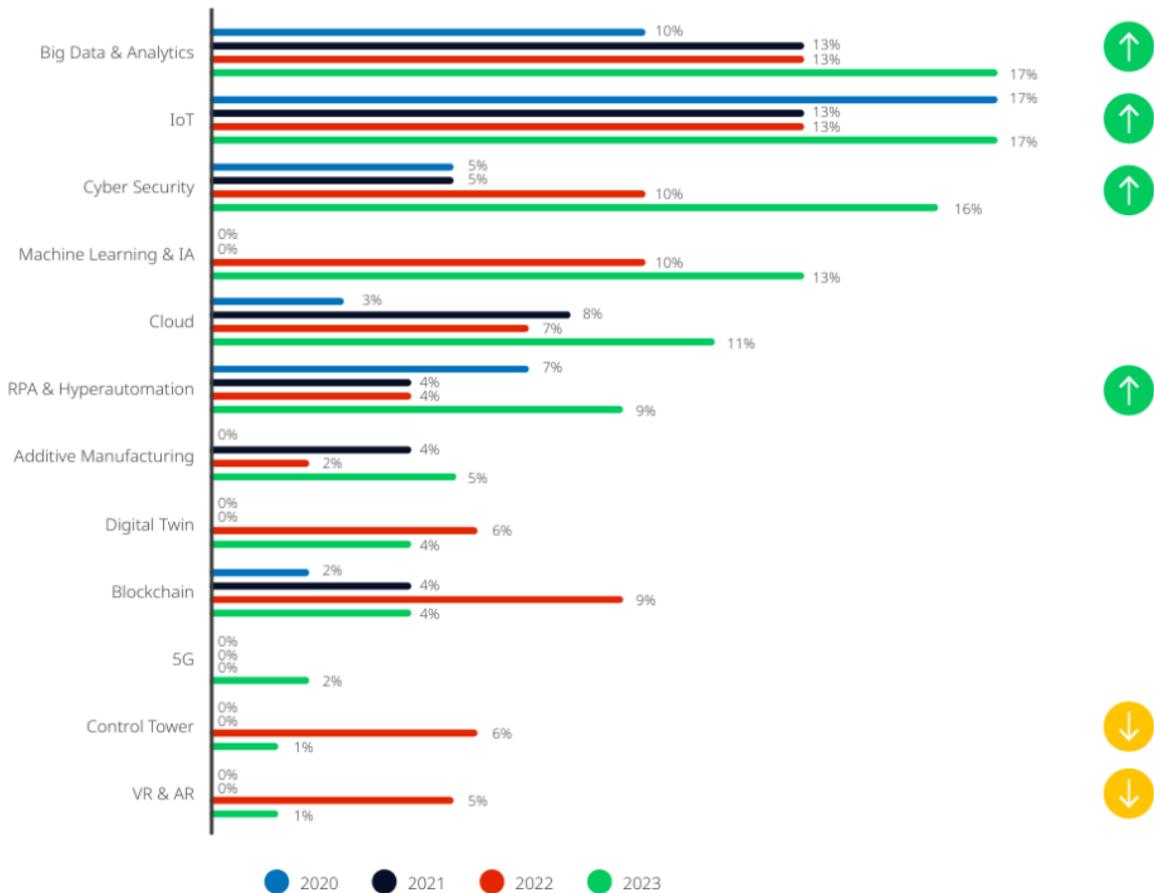


Ilustración 4. Tendencias de inversión en tecnologías de la I4.0. Fuente:(NTT DATA, 2023)

Según otro informe, la implementación y los pilotos de tecnologías Industria 4.0 han crecido hasta alcanzar el 58 % de las empresas encuestadas, frente al 43 % en 2021 y el 21 % en 2020, lo que demuestra una tendencia de maduración sostenida en la fase práctica del despliegue tecnológico (Conexus, 2022). Además, un 47 % de las empresas destina entre el 1 % y el 5 % de su facturación anual a proyectos de transformación digital, mientras que el 8 % realiza inversiones superiores al 5 %, lo que refleja un creciente compromiso financiero con estas iniciativas.

En cuanto a tecnologías emergentes, la computación en la nube es un pilar esencial de la Industria 4.0, ya que proporciona una plataforma escalable para integrar sistemas, centralizar datos y ejecutar análisis avanzados en tiempo real. Esta infraestructura de cloud manufacturing es uno de los componentes clave en los sistemas ciber-físicos y permite orquestrar actividades de producción, logísticas y de mantenimiento a través de ecosistemas interconectados que involucran fábricas, proveedores y clientes. No obstante, muchas empresas todavía perciben la nube más como un requisito previo para la digitalización que como un elemento estratégico de transformación industrial (Gajdzik et al., 2021).

Por otra parte, aunque conceptos como 5G privado, blockchain o realidad aumentada aún se encuentran en fases piloto, su implementación está limitada por costes elevados, incertidumbres en cuanto a normativas y la ausencia de estándares globales (Attiany, 2023). La ausencia de casos de uso maduros frena su expansión, ya que la correcta implementación en los procesos requerirá tiempo y una planificación estructurada.

A través de este panorama, es posible identificar una adopción tecnológica que avanza de forma asimétrica: algunas soluciones están plenamente consolidadas, mientras que otras requieren un grado mayor de madurez y definición de estrategia organizacional. Empieza a consolidarse una tendencia basada en inversión continua en capacidades digitales, alineación estratégica y desarrollo de ecosistemas interconectados que permitan mantener la competitividad a largo plazo.

2.2 METODOLOGÍA LEAN

El enfoque Lean se originó en la industria automotriz con el Toyota Production System, ganando reconocimiento global al enfatizar la eliminación de desperdicios, la mejora continua y la entrega de máximo valor al cliente. Su filosofía tradicional basada en procesos productivos eficientes ha demostrado aplicabilidad en múltiples contextos industriales y de servicios. En la actualidad, y en el marco de la transición digital, el Lean se enfrenta a un entorno renovado que exige no solo su integración con tecnologías digitales, sino también

su adaptación a modelos de trabajo más flexibles y conectados. De esta forma, la metodología Lean evoluciona hacia una visión más amplia que combina sus fundamentos operativos clásicos con herramientas digitales, conformando lo que algunos autores denominan 'Lean 4.0'.

2.2.1 ORIGEN Y FUNDAMENTOS

Como se ha mencionado anteriormente, el origen del pensamiento Lean se encuentra en el sistema de producción desarrollado por Toyota entre las décadas de 1950 y 1970, el cual consolidó un enfoque estructurado en la reducción de desperdicios, la estandarización de procesos, y el principio de mejora continua. Este modelo estableció las bases sobre las cuales se construiría posteriormente una metodología de conocimiento enfocado en maximizar valor con mínima utilización de recursos.

Los principios fundamentales del Lean giran en torno a cinco ejes clave: la definición precisa del valor desde el punto de vista del cliente, la identificación del flujo de valor en los procesos, el establecimiento de flujos continuos, la implementación de sistemas pull de producción, y la búsqueda constante de la perfección a través del kaizen. Estos elementos proporcionan un marco coherente para transformar los sistemas productivos desde una lógica de mejora progresiva, en la que cada actor de la organización contribuye activamente a reducir el desperdicio, estabilizar procesos y aumentar el valor generado.

El atractivo del enfoque Lean radica en su aplicabilidad transversal. Aunque surgió en el ámbito automotriz, ha sido adoptado con éxito en sectores tan diversos como la sanidad, la logística, el software o los servicios públicos. Su énfasis en la simplicidad, la visibilidad de los procesos y la resolución estructurada de problemas ha permitido adaptarlo a organizaciones con contextos muy distintos, pero con un objetivo común: generar más valor con menos recursos.

En resumen, la metodología Lean constituye una filosofía de mejora centrada en las personas, guiada por el conocimiento profundo del proceso y orientada a maximizar el valor

entregado. Su capacidad de adaptación a lo largo del tiempo demuestra su vigencia, no como un sistema cerrado de herramientas, sino como una forma de pensar que evoluciona con los cambios del entorno. Este carácter evolutivo es lo que ha permitido su actual hibridación con las tecnologías de la Industria 4.0, dando lugar a nuevos enfoques como el Lean digital, que serán analizados en la siguiente sección.

2.2.2 EVOLUCIÓN HACIA EL LEAN DIGITAL

Actualmente, la metodología Lean se encuentra en un proceso de evolución conceptual que integra tecnologías digitales dentro de sus herramientas y principios. Este fenómeno ha dado lugar a propuestas como el “Lean digital” o la “transformación Lean digital”, que plantean la necesidad de repensar el marco tradicional de Lean a la luz de nuevas dinámicas como la hiperconectividad, el análisis masivo de datos y la automatización inteligente. En este contexto, diversas investigaciones recientes coinciden en que la integración de tecnologías digitales en entornos Lean puede reforzar significativamente los objetivos de eficiencia, fluidez operativa y creación de valor. Se ha demostrado que, cuando se incorporan herramientas como el IoT, la inteligencia artificial, el big data o el blockchain bajo una lógica Lean coherente, no solo se optimizan los flujos de trabajo, sino que se amplía la capacidad de respuesta y adaptación de las organizaciones ante entornos con cambios constantes. (Amin et al., 2024).

En la práctica, se demuestra que la integración de tecnologías digitales en entornos Lean no solo es viable, sino que amplifica significativamente sus beneficios tradicionales cuando se aplica con coherencia metodológica. La incorporación de soluciones como la Robotic Process Automation (RPA) dentro de marcos de mejora continua permite reducir de forma notable los tiempos operativos, aumentar la trazabilidad y mejorar la calidad del servicio. En el contexto del sector sanitario, se ha comprobado que esta combinación puede reducir los tiempos de procesamiento administrativo de 380 minutos a menos de 60, al tiempo que incrementa la eficiencia del sistema hasta un 95 % (Huang et al., 2024). Estos resultados no solo reflejan una mejora en términos de productividad, sino también en la capacidad del

sistema para adaptarse a entornos cambiantes mediante la automatización de tareas rutinarias, la liberación de recursos humanos para funciones de mayor valor y la toma de decisiones basada en datos. En conjunto, estos hallazgos refuerzan la conclusión de que la digitalización puede convertirse en un catalizador para la evolución del Lean y fortalecerlo cuando se orienta a la generación de valor y la optimización de procesos.

Además, se ha comenzado a hablar de nuevos tipos de desperdicio en entornos digitales, como el “desperdicio informacional” o el “desperdicio de integración”, que aparecen cuando los datos recopilados no se traducen en decisiones útiles, o cuando los sistemas no comunican eficazmente entre sí (Rossi et al., 2022). Esta ampliación conceptual obliga a repensar algunas bases del pensamiento Lean para adaptarlas a los entornos de producción conectada y a una lógica de mejora que ya no es solo humana, sino también algorítmica.

2.2.3 DESAFÍOS Y ADAPTACIÓN EN LA ERA DIGITAL

La integración de la filosofía Lean en entornos digitales plantea una serie de desafíos que no solo tienen que ver con la adopción tecnológica. La esencia del pensamiento Lean, basada en la simplicidad, la estandarización y la mejora continua, se ve confrontada por un ecosistema industrial cada vez más caracterizado por la automatización inteligente, el análisis de grandes volúmenes de datos y la toma de decisiones autónoma por parte de sistemas interconectados. Esta nueva realidad obliga a repensar tanto los fundamentos metodológicos de Lean como las condiciones necesarias para su implementación efectiva.

Uno de los primeros desafíos que emergen es de naturaleza cultural y organizativa. Tradicionalmente, Lean ha estado vinculado a la participación de los empleados, la resolución de problemas en el lugar de trabajo (gemba) y la responsabilidad colectiva sobre la mejora de los procesos. En contraste, muchos entornos digitales tienden a desplazar la toma de decisiones hacia algoritmos y sistemas automáticos, lo que puede reducir la implicación directa de los operarios y generar una desconexión entre los equipos humanos y los procesos que gestionan. Un estudio advierte de que el riesgo de una digitalización mal

alineada con los principios Lean es la aparición de una burocracia tecnológica que reemplaza, en lugar de empoderar, la capacidad de mejora del personal (Lima et al., 2023).

Además, la implementación de tecnologías habilitadoras, como el IoT, la inteligencia artificial o el análisis predictivo, exige competencias técnicas que no siempre están disponibles en los equipos de mejora continua. La ausencia de habilidades digitales entre los líderes Lean dificulta la integración fluida entre herramientas analíticas avanzadas y metodologías operativas tradicionales. La adaptación de Lean al entorno digital requiere no solo nuevas herramientas, sino también un nuevo perfil profesional: capaz de combinar el pensamiento sistémico y estructurado del Lean clásico con la agilidad, la experimentación y la analítica de datos que exige el entorno actual (Amin et al., 2024).

Otro reto clave reside en la redefinición del concepto de desperdicio (muda). En los entornos conectados, donde los datos fluyen de forma constante, aparecen nuevas formas de ineficiencia menos visibles que en los procesos físicos tradicionales. Por ejemplo, la recopilación masiva de datos sin propósito claro, la duplicidad de sistemas de información o la latencia en el procesamiento de datos pueden constituir nuevas fuentes de despilfarro informacional. Por ello hay que ampliar la noción clásica de desperdicio para incluir categorías como el exceso de datos no utilizados, la sobreautomatización, o la desconexión entre sistemas digitales que no comparten estándares. Esta redefinición es esencial para que el análisis Lean continúe siendo útil en procesos mediados por tecnología (Rossi et al., 2022).

Junto a estos desafíos conceptuales, surgen también barreras prácticas. La coexistencia de flujos físicos y digitales exige rediseñar las herramientas Lean clásicas. Por ejemplo, el Value Stream Mapping, una de las técnicas más emblemáticas de la filosofía Lean, requiere ser adaptado para incluir flujos de datos, tiempos de proceso digital, nodos automatizados y decisiones tomadas por inteligencia artificial. Sin una evolución metodológica de estas herramientas, la implantación de Lean en entornos 4.0 puede quedar limitada a los aspectos

visibles de la operación, ignorando los procesos digitales que cada vez tienen más peso en la generación de valor.

No obstante, estos desafíos también abren una ventana de oportunidad para renovar la filosofía Lean y potenciar su alcance. La digitalización bien integrada no debilita el enfoque Lean, sino que puede reforzarlo al aportar visibilidad en tiempo real, datos precisos para la toma de decisiones, y la capacidad de anticipar problemas antes de que se materialicen. En este sentido, Lean y digitalización no son marcos incompatibles, sino que requieren un proceso de alineación estratégica, metodológica y cultural.

El reto, por tanto, no está en elegir entre Lean y digitalización, sino en diseñar arquitecturas operativas en las que ambas se complementen. Lean aporta la estructura, los principios y la disciplina operativa; la tecnología aporta la velocidad, la conectividad y la inteligencia distribuida. Solo mediante esta integración coherente será posible desarrollar sistemas de producción verdaderamente ágiles, eficientes y centrados en obtener valor.

2.3 LOGÍSTICA INVERSA

2.3.1 EVOLUCIÓN DE LA LOGÍSTICA INVERSA

A diferencia de la logística tradicional, que se centra en llevar los productos desde los fabricantes hasta los consumidores, la logística inversa aborda el movimiento en sentido contrario. Estos procesos serían devoluciones, reciclaje, reacondicionamiento y eliminación de residuos. Un ejemplo de una red logística que incluye procesos de logística inversa sería el siguiente:

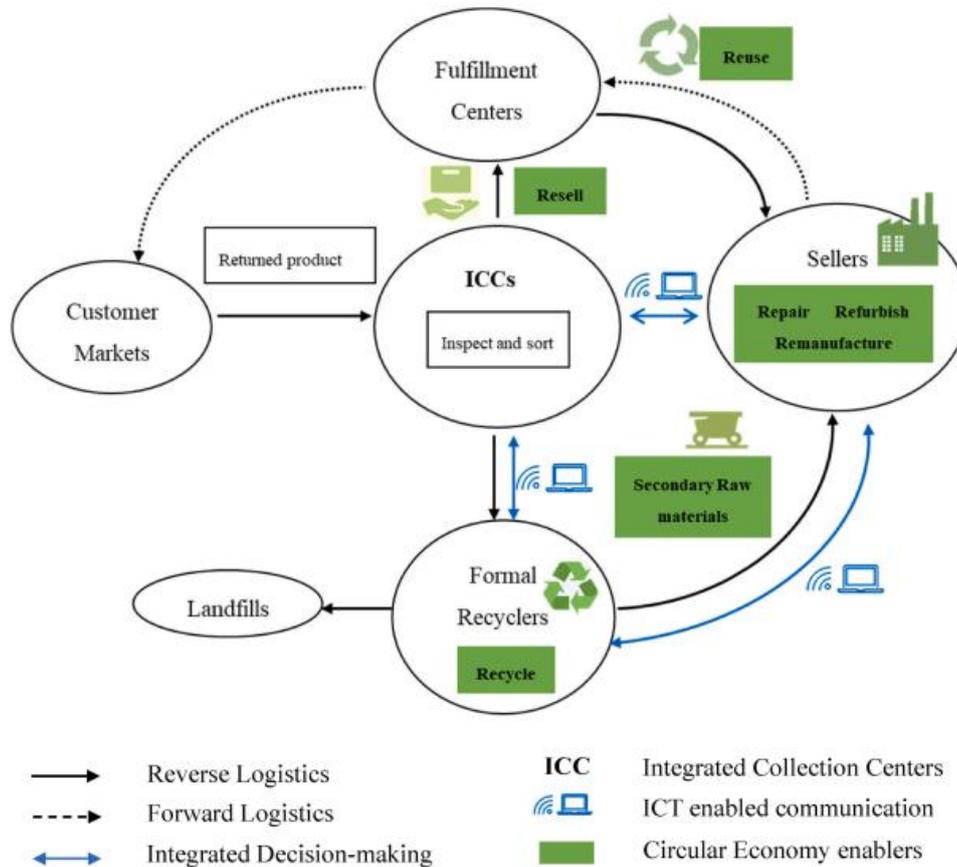


Ilustración 5. Ejemplo de red logística. Fuente: (Nanayakkara et al., 2022)

La logística inversa ha pasado de ser un proceso marginal y correctivo dentro de la cadena de suministro a consolidarse como un eje estratégico para la sostenibilidad, la eficiencia y la competitividad de las empresas. Esta transformación se ha visto especialmente acelerada por el auge del comercio electrónico, que ha multiplicado el volumen de devoluciones, incrementado la presión sobre los sistemas logísticos y elevado las expectativas de los consumidores respecto a tiempos de respuesta, transparencia y gratuidad en los procesos de retorno (Nanayakkara et al., 2022).

En este contexto, el diseño y la gestión de redes de logística inversa ha dejado de centrarse únicamente en la recogida y clasificación de productos devueltos. Actualmente, la atención se dirige hacia la optimización integral del sistema, incluyendo la planificación de rutas

inversas, la integración digital de los procesos y la incorporación de indicadores ambientales en la toma de decisiones. Las investigaciones recientes coinciden en señalar que el verdadero potencial de la logística inversa radica en su capacidad para generar valor añadido no solo económico, sino también ambiental y reputacional, cuando se gestiona de forma inteligente y tecnológicamente asistida (Rodrigues et al., 2025).

La incorporación de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), el análisis de datos, la inteligencia artificial y los sistemas de trazabilidad digital ha permitido mejorar significativamente la eficiencia y la visibilidad de los flujos inversos. Estas herramientas facilitan la detección temprana de incidencias, la mejora del control de inventario y la automatización de decisiones sobre reacondicionamiento o reciclaje. En el entorno del e-commerce, donde los productos devueltos pueden representar más del 20 % del volumen vendido, estas capacidades resultan fundamentales para evitar la saturación operativa y la pérdida de valor de los bienes retornados (Nanayakkara et al., 2022).

2.3.2 DESAFÍOS EN EL CONTEXTO DE E-COMMERCE

Como se ha mencionado anteriormente, en el sector del e-commerce, la logística inversa es un factor clave debido al creciente volumen de devoluciones y a las altas expectativas de los consumidores en cuanto a rapidez. Sin embargo, su implementación enfrenta diversos desafíos que dificultan su integración eficiente en las cadenas de suministro.

Uno de los principales problemas es la complejidad e incertidumbre de la red logística, que es más impredecible que la logística tradicional. La variabilidad en la calidad, cantidad y momento de los productos devueltos hace que la planificación de los recursos sea extremadamente complicada. Esta situación empeora debido a las políticas de devolución fáciles que ofrecen los minoristas para ser competitivos, las cuales incentivan un mayor volumen de retornos y añaden presión al sistema.

Otro desafío fundamental son los altos costes operativos. Los costes asociados a la logística inversa suelen ser elevados, ya que requieren procesos adicionales de transporte, inspección,

clasificación y reacondicionamiento. A diferencia de la logística directa, donde se envían grandes volúmenes consolidados, los retornos suelen ser envíos individuales y dispersos, lo que impide las economías de escala y eleva el coste por artículo. A esto se suma la rápida depreciación del valor del producto, especialmente en sectores como la moda o la electrónica, donde una prenda o dispositivo puede perder gran parte de su valor comercial en semanas si no se procesa rápidamente.

Finalmente, la falta de visibilidad y la incertidumbre sobre el estado del producto es uno de los mayores obstáculos. Habitualmente, las empresas no conocen la condición real del producto devuelto hasta que este llega al almacén, lo que complica la decisión de si puede ser revendido, reparado o debe ser desechado, impidiendo una planificación proactiva y una toma de decisiones eficiente.

2.3.3 DIGITALIZACIÓN EN LA LOGÍSTICA INVERSA

La Industria 4.0 introduce nuevas tecnologías que permiten dar solución a estos desafíos de manera efectiva. La digitalización transforma la logística inversa de un proceso reactivo a uno proactivo, capaz de recuperar valor y mejorar la sostenibilidad.

Por ejemplo, la implementación del Internet de las Cosas (IoT), el Big Data y la inteligencia artificial (IA) permite una mayor visibilidad y control sobre los flujos inversos. El IoT, mediante el uso de RFID y sensores, permite un seguimiento preciso y en tiempo real de los productos devueltos, optimizando la gestión del inventario y la planificación de rutas. Esto no solo mejora la trazabilidad, sino que también previene pérdidas y agiliza la recepción en los almacenes. El Big Data permite analizar patrones para predecir volúmenes de retorno, pero también para identificar las causas raíz, como descripciones de producto imprecisas o defectos de calidad, ayudando a reducir las devoluciones futuras. Por otro lado, la IA puede automatizar decisiones complejas. Por ejemplo, los sistemas de visión artificial pueden inspeccionar el estado de los productos devueltos y clasificarlos automáticamente, mientras que los algoritmos pueden decidir el destino óptimo de cada artículo, optimizando la recuperación de valor.

Otras tecnologías como el Blockchain y los Gemelos Digitales también tienen un alto potencial. Blockchain puede crear un registro transparente de todo el ciclo de retorno, aumentando la confianza y la colaboración entre todos los actores. También, un Gemelo Digital permite crear una réplica virtual de toda la red de logística inversa para simular el impacto de diferentes estrategias antes de su implementación, reduciendo riesgos y optimizando los costes.

En conclusión, la evolución de la logística inversa se caracteriza por una dualidad fundamental: por un lado, se está convirtiendo en un pilar estratégico para la competitividad y la sostenibilidad en el e-commerce, pero por otro, este crecimiento conlleva a la constante aparición de desafíos operativos como la incertidumbre de los flujos y la falta de visibilidad que limitan su eficiencia. En este contexto, la digitalización no es solo una mejora, sino el habilitador clave que permite superar estos problemas. Además, lo largo de este proyecto, se analizarán las sinergias entre la metodología Lean y estas tecnologías para reforzar la capacidad de mejora de las mismas.

Capítulo 3. IDENTIFICACIÓN DE PROCESOS

En este capítulo se analizan dos modelos representativos de comercio electrónico con dinámicas logísticas distintas: un modelo B2C centrado en el sector textil, caracterizado por altos volúmenes de devoluciones y gran sensibilidad del consumidor final; y un modelo B2B basado en la fabricación aditiva, donde los retornos responden a criterios técnicos y procesos más personalizados. A través del análisis de sus respectivas cadenas de logística inversa, se pretende identificar las etapas clave del proceso en cada caso, lo que permitirá, en capítulos posteriores, evaluar qué tecnologías de la Industria 4.0 y qué principios Lean pueden tener un mayor impacto operativo.

3.1 *MODELO B2C – TEXTIL*

El sector textil en el comercio electrónico B2C representa uno de los entornos más complejos y dinámicos en lo que respecta a la logística inversa. A diferencia de otros sectores, como la electrónica o la alimentación, donde los retornos se producen por defectos funcionales o errores de entrega, en la moda los motivos de devolución están muy ligados a factores subjetivos como la talla, la percepción estética, el material o el cambio de opinión del consumidor. Esto genera un volumen de devoluciones muy elevado: se estima que en Reino Unido, solo en 2022, el coste de los retornos textiles ascendió a más de 7.000 millones de libras, con más de 23 millones de prendas descartadas, muchas de ellas sin siquiera haber sido reutilizadas (Marriott et al., 2025).

En este contexto, la logística inversa deja de ser un proceso correctivo del sistema logístico para convertirse en un proceso estratégico. Su correcta gestión puede representar la diferencia entre una operación rentable y una cadena de suministro económicamente insostenible. La figura siguiente, recoge de forma esquemática las etapas clave de la logística inversa en moda dentro de un entorno B2C (Marriott et al., 2025):

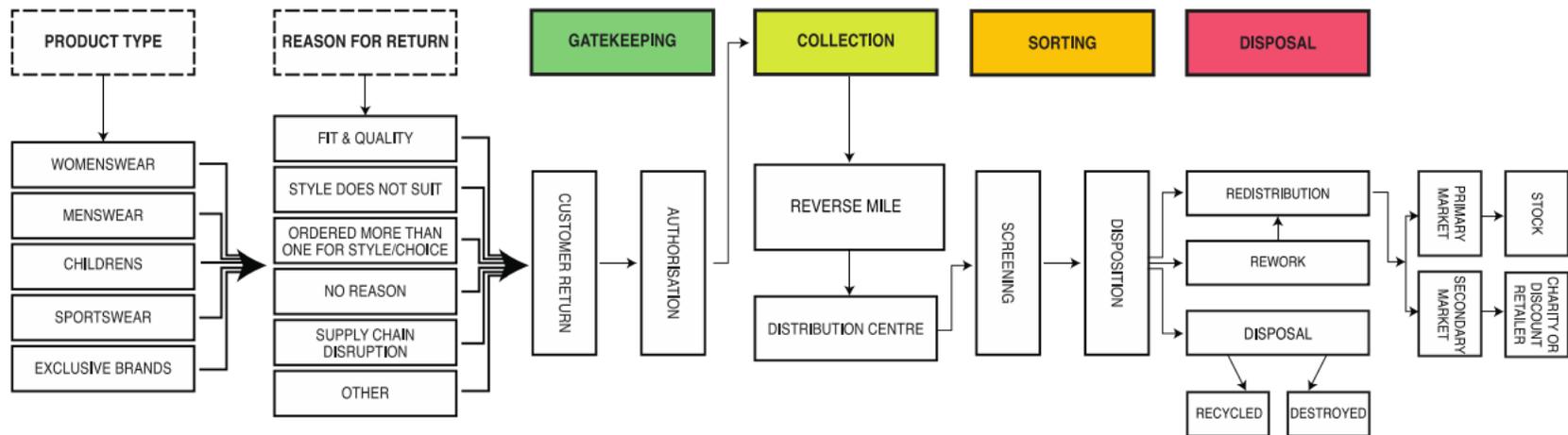


Ilustración 6. Modelo de logística inversa del sector textil. Fuente: (Marriott et al., 2025)

3.1.1 ETAPAS PRINCIPALES DEL MODELO DE TEXTIL

A partir de este modelo y la evidencia empírica del sector, se detallan a continuación las principales etapas del proceso de logística inversa en el textil de e-commerce, junto con las características que definen su comportamiento particular. Estas etapas serán utilizadas como base para el análisis de correlaciones entre tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 y técnicas Lean.

1. Solicitud de devolución y autorización

El proceso comienza con la solicitud de devolución por parte del cliente. En el textil B2C, esta decisión se ve favorecida por políticas de devolución cada vez más flexibles: devoluciones gratuitas, plazos extensos, y modalidades sin necesidad de justificación. Este fenómeno, si bien incrementa la satisfacción del cliente, también eleva artificialmente los volúmenes de devolución y estimula comportamientos como el “bracketing” o el “wardrobing”, que consisten en comprar varias tallas para elegir en casa o utilizar una prenda temporalmente para luego devolverla.

La “autorización” es en muchos casos automática, pero representa un punto de entrada crítico para la trazabilidad del proceso inverso. Modelos más avanzados incorporan análisis de patrones de comportamiento para identificar clientes que devuelven productos frecuentemente o son potencialmente abusivos, integrando herramientas de inteligencia artificial y sistemas de gestión de relaciones con el cliente (CRM) avanzados.

2. Envío del producto devuelto

Una vez aceptado el retorno, el producto es recogido por un operador o depositado por el cliente en un punto de entrega. En este punto surgen dos grandes retos logísticos. El primero, la dispersión geográfica, ya que las devoluciones se originan en miles de domicilios particulares, lo que fragmenta la carga y dificulta la eficiencia de la primera milla inversa. El segundo son los tiempos de consolidación, al no haber certeza de cuándo un cliente

devolverá un producto, el volumen y la frecuencia de recogida son altamente variables, lo que obstaculiza la optimización del transporte (McKinsey, 2022).

Este proceso implica costes logísticos superiores a los del envío inicial y contribuye significativamente a la huella de carbono total del e-commerce textil. Debido a las tendencias actuales de reducción de la huella de carbono, es crítico implementar una correcta optimización en este proceso.

3. Recepción en el centro de distribución

El siguiente paso es la recepción física del producto en un centro logístico o almacén. Este puede estar operado internamente por la empresa o externalizado a un operador logístico externo (3PL). En estos centros, la complejidad operativa es elevada debido a la alta variabilidad del estado de los productos, la necesidad de inspecciones manuales, y la falta de homogeneidad en los embalajes y volúmenes de entrada. A diferencia de la logística directa, donde los flujos son predecibles y estandarizados, la logística inversa exige una capacidad de respuesta flexible y procesos con mucha capacidad de adaptación. La gestión simultánea de múltiples rutas de salida incrementa aún más la carga operativa, especialmente cuando se combinan devoluciones de distintas marcas, temporadas o canales.

Es en este punto donde se decide la ruta de clasificación: si el producto puede ser reincorporado al inventario para su reventa, si requiere reacondicionamiento, o si debe ser descartado. En el textil, esta decisión es particularmente crítica: la rotación rápida de colecciones y la obsolescencia casi inmediata del inventario hacen que incluso una prenda sin defectos pueda perder su valor comercial en pocas semanas.

4. Clasificación y decisión de recuperación

La fase de clasificación es uno de los cuellos de botella más significativos del proceso. Tradicionalmente siempre se ha necesitado mucha mano de obra, ya que exige una inspección visual y táctil del producto: detección de manchas, olores, etiquetas dañadas, o señales de uso. No obstante, la tecnología actual permite automatizar gran parte de estos

procesos y es donde este proyecto pretende estudiar que tecnologías y técnicas Lean pueden tener mayor impacto. Esta innovación resulta clave para escalar la clasificación sin incurrir en costes muy elevados.

El objetivo final es segmentar el retorno en una de las siguientes rutas:

Rutas	Descripción
Reventa directa	Si el producto está en condiciones óptimas y puede reincorporarse al canal original o a canales secundarios
Reacondicionamiento	Limpieza, planchado, reetiquetado, o pequeñas reparaciones
Reciclaje	Tanto open-loop, como closed-loop, si la tecnología y materiales lo permiten
Desecho	En última instancia, si ninguna opción anterior es viable

Tabla 1. Posibles rutas de retorno. Fuente: Elaboración propia

5. Gestión financiera

En paralelo al procesamiento físico, se realiza el reembolso financiero al cliente. Este paso requiere la sincronización entre el sistema logístico y el financiero, y representa una parte crítica de la experiencia del usuario.

6. Análisis, aprendizaje y mejora continua

Una dimensión frecuentemente ignorada de la logística inversa en moda es su potencial como fuente de información. El análisis de datos sobre motivos de devolución, categorías de producto, tasa de reventa y ciclos de retorno puede alimentar procesos de mejora en diseño de producto, fichas técnicas, herramientas de recomendación o políticas de devolución.

La adopción de tecnologías de Big Data y sistemas predictivos, especialmente aquellos integrados con IA, puede ayudar a anticipar devoluciones y redimensionar stocks de forma más ajustada (Burini et al., 2025).

3.2 MODELO B2B – FABRICACIÓN 3D

La logística inversa en entornos B2B de fabricación aditiva, como es el caso de Xometry, responde a una lógica radicalmente distinta del modelo B2C. En este caso, las devoluciones no derivan de decisiones subjetivas del cliente, sino de criterios objetivos relacionados con tolerancias técnicas, acabados, materiales o errores de diseño. La personalización total, la fabricación bajo demanda y la alta exigencia en precisión hacen que cualquier no conformidad pueda suponer no solo una pérdida económica, sino un riesgo para la funcionalidad de la pieza y la continuidad del proyecto del cliente.

Xometry actúa como una plataforma digital que conecta clientes industriales con una red global de proveedores de fabricación. Para ello, basa su funcionamiento en un modelo distribuido que permite asignar recursos según la especialización tecnológica, la localización geográfica o la disponibilidad operativa. En este contexto, la logística inversa no es un proceso aislado, sino una parte más del sistema colaborativo, apoyado en tecnologías de trazabilidad digital, plataformas en la nube y análisis automático de datos de producción.

3.2.1 ETAPAS PRINCIPALES DEL MODELO DE FABRICACIÓN

A partir de la práctica operativa de empresas como Xometry y del marco conceptual desarrollado por M. Jiménez Calzado sobre la composición de una plataforma digital de fabricación aditiva (Jiménez Calzado, 2023), se pueden identificar las siguientes etapas clave en el proceso de logística inversa B2B en fabricación aditiva:

1. Recepción de incidencia y evaluación técnica inicial

El proceso de logística inversa en fabricación aditiva comienza habitualmente con la detección de una anomalía por parte del cliente. Dado que la mayoría de los pedidos son piezas únicas o de baja tirada, personalizadas y críticas para aplicaciones funcionales, cualquier defecto puede comprometer el rendimiento final. La incidencia se comunica mediante un sistema digital integrado, en el que el cliente describe el problema, adjunta

planos, especificaciones y fotografías. En empresas como Xometry, esta gestión se apoya en plataformas tipo ticketing que automatizan la asignación de prioridad y permiten trazabilidad desde el primer momento.

El equipo de calidad analiza la reclamación a partir de la documentación generada durante la producción: archivo CAD original, parámetros de impresión, tecnología utilizada, lote de material y controles realizados. Esta fase inicial permite discernir si se trata de un error atribuible al proveedor o si la causa puede estar en el diseño del cliente.

2. Decisión sobre método de retorno o compensación

La plataforma decide si es necesario devolver físicamente la pieza, solicitar su destrucción documentada, lanzar una nueva producción o emitir una compensación económica. A menudo, las devoluciones físicas se evitan cuando los costes logísticos o la inutilidad del producto hacen que el transporte no sea eficiente. Esto convierte la toma de decisiones en un proceso estratégico, automatizable mediante reglas técnicas, pero con intervención humana cuando se trata de piezas críticas.

3. Devolución del producto (Cuando aplica)

Si se determina la necesidad de retorno físico, el cliente debe embalar la pieza conforme a instrucciones específicas, que consideran geometría, fragilidad y riesgo de contaminación. En ocasiones se incluyen plantillas impresas para protección o etiquetas QR para vincular el objeto con su orden digital. El transporte inverso puede ser gestionado por el propio cliente, por un operador logístico contratado por la plataforma, o por acuerdos con terceros. En casos complejos, se contratan servicios logísticos con cadena de custodia y trazabilidad GPS para garantizar la integridad del objeto en tránsito.

4. Inspección técnica del producto devuelto

Al llegar al centro de inspección, se ejecutan pruebas técnicas: escaneado 3D, inspección visual, verificación dimensional, análisis de material e incluso simulaciones de

funcionamiento si la pieza lo requiere. Esta inspección no solo determina la validez de la reclamación, sino que también alimenta el sistema de calidad y permite actualizar las métricas de desempeño de cada proveedor de la red.

5. Comunicación con el proveedor causante (Cuando aplica)

Cuando la responsabilidad se atribuye a un proveedor, se abre un proceso de retroalimentación técnica. En plataformas como Xometry, la calidad del proveedor impacta directamente en su nivel de visibilidad en el sistema y en la asignación futura de pedidos, lo que incentiva una mejora continua. Este sistema de reputación industrial es uno de los pilares para mantener estándares de calidad en redes globales.

6. Reutilización de piezas o reciclaje de material

En algunos casos, las piezas pueden ser reacondicionadas, postprocesadas o corregidas mediante mecanizado. En otros, el material puede ser reciclado parcialmente. Sin embargo, la mayoría de las piezas no son reutilizables, lo que convierte el aprendizaje técnico en el principal valor recuperado.

7. Gestión financiera

La resolución financiera incluye devoluciones económicas, reimpressiones sin coste o créditos internos. Este proceso se automatiza mediante sistemas ERP conectados con la plataforma de clientes y proveedores, garantizando agilidad y reducción de conflictos. También permite contabilizar el impacto económico de la no conformidad en términos reales.

8. Análisis de causa raíz y mejora continua

Finalmente, cada caso alimenta un sistema de análisis, que permite identificar causas estructurales de error. Esta información se usa para ajustar los estándares, rediseñar procesos o generar alertas para futuros pedidos similares.

3.3 CONCLUSIÓN

En este capítulo se han identificado las etapas clave de la logística inversa en dos modelos representativos del comercio electrónico: el modelo B2C en el sector textil, marcado por altos volúmenes y decisiones del consumidor, y el modelo B2B centrado en la fabricación aditiva, caracterizado por retornos técnicos y trazabilidad digital. Ambos casos presentan puntos críticos con potencial de mejora mediante tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 y principios Lean. Las etapas definidas en este análisis servirán como base para el siguiente capítulo, donde se evaluará la relación entre cada fase del proceso y las herramientas digitales u operativas más adecuadas para optimizar su desempeño.

Modelo B2C – Textil

1. Solicitud de devolución y autorización
2. Envío del producto devuelto
3. Recepción en centro de distribución
4. Clasificación y decisión de recuperación
5. Gestión financiera
6. Análisis de causa raíz y mejora continua

Modelo B2B – Fabricación Aditiva

1. Recepción de incidencia y evaluación técnica inicial
2. Decisión sobre método de retorno o compensación
3. Devolución del producto (cuando aplica)
4. Inspección técnica del producto retornado
5. Comunicación con el proveedor causante
6. Reutilización de piezas o reciclaje de material
7. Gestión financiera
8. Análisis de causa raíz y mejora continua

Ilustración 7. Resumen de etapas clave. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 4. ANÁLISIS DE CORRELACIONES

En este capítulo se analiza la relación entre los tres ejes fundamentales del trabajo: la logística inversa, los principios Lean y las tecnologías de la Industria 4.0. A través de investigación y una matriz de correlación, se estudiarán sus puntos de convergencia, identificando sinergias potenciales y áreas de mejora en los procesos logísticos. Este análisis permitirá establecer una base estructurada para la integración conjunta de estos enfoques en entornos e-commerce.

4.1 LOGÍSTICA INVERSA – INDUSTRIA 4.0

Esta sección tiene por objetivo analizar cuáles son las tecnologías de la Industria 4.0 con mayor capacidad de impacto en cada una de las etapas del proceso de logística inversa, tomando como referencia los modelos B2C (textil) y B2B (fabricación aditiva) estudiados previamente.

4.1.1 TECNOLOGÍAS HABILITADORAS DE LA INDUSTRIA 4.0

Para ello, se han identificado las siguientes tecnologías, que serán evaluadas en función de su aplicabilidad y su potencial de optimizar la cadena logística:

1. **Cloud:** Infraestructura que permite el acceso remoto a datos y sistemas, facilitando la integración, escalabilidad y cooperación entre actores logísticos.
2. **Robots autónomos:** Sistemas robóticos que pueden operar sin intervención humana, aplicables a tareas repetitivas como clasificación, transporte interno o reacondicionamiento.
3. **IoT (Internet of Things):** Sensores y dispositivos conectados que capturan y transmiten datos en tiempo real, permitiendo el seguimiento detallado de los productos.
4. **Big Data & Analytics:** Procesamiento masivo de datos para detectar patrones, optimizar operaciones y predecir comportamientos de devolución.

5. **AI:** Herramientas predictivas y de automatización inteligente para clasificación, detección de anomalías o recomendaciones.
6. **AR & VR (Realidad Aumentada y Virtual):** Tecnologías de visualización aplicadas a formación, inspección remota o procesos de reacondicionamiento.
7. **Ciberseguridad:** Conjunto de prácticas y herramientas para proteger los datos generados y compartidos en entornos conectados.
8. **RPA & Hyperautomation:** Automatización de tareas administrativas y logísticas mediante bots o flujos inteligentes, especialmente útil en procesos repetitivos.
9. **Digital Twin:** Réplicas digitales de procesos o productos que permiten simular, monitorizar y optimizar decisiones logísticas.
10. **Control Tower:** Plataformas de monitorización centralizadas que ofrecen visibilidad en tiempo real de toda la cadena logística.
11. **Blockchain:** Tecnología de registro distribuido que asegura trazabilidad, transparencia y fiabilidad en transacciones logísticas.
12. **Fabricación aditiva:** Impresión 3D orientada a reacondicionamiento de productos, generación de repuestos o piezas únicas.
13. **Cobots (Robots colaborativos):** Robots diseñados para trabajar junto a personas en tareas semiautomatizadas, con especial utilidad en clasificación o reacondicionamiento.

Una vez definidas las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 y las etapas clave del proceso de logística inversa, se presentan a continuación las tablas que recogen las tres tecnologías con mayor potencial de impacto en cada etapa. Estas han sido ordenadas de izquierda a derecha en función de su relevancia estimada, siendo la Tecnología 1 la que se considera más determinante en términos de transformación y mejora operativa:

4.1.2 RESULTADO Y JUSTIFICACIÓN DEL MODELO DE TEXTIL

Proceso B2C

Etapa del proceso B2C	Tecnología 1	Tecnología 2	Tecnología 3
Solicitud de devolución y autorización	AI	Cloud	RPA & Hyperautomation
Envío del producto devuelto	IoT	Control Tower	Big Data & Analytics
Recepción en el centro de distribución	Robots autónomos	Cobots	Cloud
Clasificación y decisión de recuperación	AI	Robots autónomos	AR & VR
Gestión financiera	RPA & Hyperautomation	Blockchain	Cloud
Análisis, aprendizaje y mejora continua	Big Data & Analytics	Digital Twin	AI

Tabla 2. Tecnologías habilitadoras con más relevancia en el proceso B2C. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describe la justificación de las tecnologías elegidas para cada etapa:

Solicitud de devolución y autorización: La IA ocupa el primer lugar por su capacidad para automatizar decisiones complejas, detectar patrones de abuso y adaptar dinámicamente la respuesta al perfil del cliente, mejorando así la eficiencia y la fiabilidad del proceso. En segundo lugar, se sitúa Cloud, indispensable como infraestructura habilitadora que permite que los sistemas estén conectados en tiempo real y respalden las decisiones automatizadas. RPA ocupa el tercer puesto al encargarse de tareas rutinarias como la generación de etiquetas o las notificaciones automáticas, agilizando el proceso sin intervenir en decisiones estratégicas. Se seleccionan estas tecnologías porque combinan automatización inteligente, conectividad y eficiencia operativa.

Envío del producto devuelto: El IoT se posiciona primero por su capacidad para ofrecer trazabilidad física y en tiempo real de los productos devueltos, lo que resulta crítico en una etapa que se caracteriza por la dispersión geográfica e incertidumbre logística. La Control Tower ocupa el segundo lugar al facilitar la supervisión y coordinación centralizada del flujo

inverso, apoyándose en los datos recogidos por el IIoT para tomar decisiones globales. En tercer lugar, se encuentra Big Data & Analytics, que permite analizar patrones de devolución y optimizar rutas de recogida, aunque su impacto es más estratégico que operativo. Estas tecnologías se eligen por su impacto directo sobre la visibilidad y la capacidad de respuesta logística, frente a opciones como cobots, RPA o blockchain, que tienen escasa relevancia en este contexto físico.

Recepción en el centro de distribución: Los robots autónomos lideran esta etapa por su capacidad de ejecutar tareas repetitivas como clasificación o transporte de forma eficiente, especialmente en escenarios con alta carga operativa. En segundo lugar, están los cobots, que resultan útiles en operaciones donde la automatización total no es viable y se requiere interacción con operarios. Cloud ocupa la tercera posición como soporte para la integración de datos en tiempo real con los sistemas de inventario, aunque su efecto es más indirecto. Se priorizan estas tecnologías por su contribución tangible a la eficiencia operativa en el punto de entrada.

Clasificación y decisión de recuperación: La IA encabeza esta etapa por su capacidad para interpretar datos visuales, históricos o contextuales y decidir de forma autónoma el destino óptimo del producto. En segundo lugar, los robots autónomos permiten ejecutar físicamente esas decisiones de forma rápida y sin errores, incrementando la productividad. AR/VR aparece en tercer lugar por su utilidad en tareas complejas de inspección visual o en la formación operativa para reacondicionamiento. Estas tecnologías se seleccionan por su combinación de automatización inteligente y asistencia operativa.

Gestión financiera: RPA ocupa la primera posición al ser la herramienta más eficaz para automatizar procesos como reembolsos, conciliaciones y ajustes en sistemas de gestión. En segundo lugar, Blockchain aporta trazabilidad y transparencia en las transacciones, reforzando la confianza en un entorno colaborativo. La tercera, Cloud, funciona como una tecnología de soporte que garantiza la sincronización entre sistemas logísticos y financieros,

aunque sin intervenir directamente en el proceso económico. Estas tecnologías se seleccionan por su aplicabilidad específica a flujos financieros automatizados.

Análisis, aprendizaje y mejora continua: Big Data & Analytics se posiciona primera en esta etapa por su capacidad para transformar grandes volúmenes de información logística en conocimiento útil para reducir errores recurrentes y optimizar procesos. En segundo lugar, Digital Twin permite simular escenarios futuros y validar mejoras antes de implementarlas, lo que favorece una toma de decisiones basada en evidencia. En tercer lugar, se sitúa la IA, que complementa el análisis con modelos predictivos para anticipar devoluciones y ajustar operaciones. Estas tecnologías fueron elegidas por su capacidad para generar valor estratégico mediante la interpretación y aplicación del conocimiento.

4.1.3 RESULTADO Y JUSTIFICACIÓN DEL MODELO DE FABRICACIÓN

Proceso B2B

Etapa del proceso B2B	Tecnología 1	Tecnología 2	Tecnología 3
Recepción de incidencia y evaluación técnica inicial	AI	Cloud	RPA & Hyperautomation
Decisión sobre método de retorno o compensación	AI	Digital Twin	Blockchain
Devolución del producto	IoT	Control Tower	Big Data & Analytics
Inspección técnica del producto devuelto	AR & VR	AI	Robots autónomos
Comunicación con el proveedor causante	Cloud	Blockchain	RPA & Hyperautomation
Reutilización de piezas o reciclaje de material	Fabricación aditiva	AI	Big Data & Analytics
Gestión financiera	RPA & Hyperautomation	Blockchain	Cloud
Análisis de causa raíz y mejora continua	Big Data & Analytics	Digital Twin	AI

Tabla 3. Tecnologías habilitadoras con más relevancia en el proceso B2B. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describe la justificación de las tecnologías elegidas para cada etapa:

Recepción de incidencia y evaluación técnica inicial: La IA se coloca en primer lugar por su capacidad para analizar automáticamente archivos CAD, históricos de producción y parámetros técnicos, facilitando una clasificación temprana y precisa de la incidencia. En segundo lugar, Cloud permite que toda la documentación técnica esté disponible en tiempo real para todos los actores implicados, condición esencial en plataformas como Xometry. En tercer lugar, RPA se emplea para automatizar tareas administrativas como la apertura del ticket, asignación de prioridad o generación de acuses de recibo. Estas tecnologías se priorizan por su contribución directa a la eficiencia y trazabilidad digital de esta etapa inicial.

Decisión sobre método de retorno o compensación: La IA ocupa el primer lugar al poder aplicar reglas lógicas complejas para decidir si procede una reimpresión, una compensación o la destrucción documentada de la pieza, basándose en tolerancias y tipología del fallo. Digital Twin se posiciona en segundo lugar por su utilidad para simular el impacto de distintas decisiones antes de ejecutarlas, especialmente cuando la pieza devuelta afecta a un sistema mayor. En tercer lugar, Blockchain ofrece garantías de integridad en la trazabilidad de decisiones tomadas, especialmente útil cuando hay múltiples actores o contratos vinculados. Estas tecnologías son más relevantes que otras como RPA o AR/VR, que no intervienen directamente en la evaluación técnica o contractual de la compensación.

Devolución del producto: El IoT lidera esta etapa por su capacidad para ofrecer trazabilidad en tiempo real del producto en tránsito. En segundo lugar, la Control Tower permite gestionar y supervisar centralizadamente los flujos logísticos inversos, integrando a operadores, clientes y proveedores de manera ágil y reactiva. En tercer lugar, Big Data & Analytics aporta capacidad de análisis para anticipar volúmenes de retorno, planificar rutas y dimensionar los recursos necesarios, especialmente útil cuando el sistema integra múltiples actores industriales. Estas tecnologías se priorizan porque permiten visibilidad, coordinación y análisis en entornos complejos.

Inspección técnica del producto devuelto: AR/VR encabeza esta etapa por su capacidad de guiar al personal en inspecciones complejas, permitir diagnósticos remotos o superponer

modelos digitales sobre el objeto físico. En segundo lugar, IA permiten automatizar parte de la evaluación mediante visión artificial o comparación automática con el modelo original. En tercer lugar, robots autónomos asisten en tareas físicas de escaneado o manipulación, especialmente en centros con alto volumen o riesgo de contaminación cruzada. Se descartan tecnologías como Cloud o blockchain por no tener intervención directa en la evaluación física o visual de la pieza.

Comunicación con el proveedor causante: Cloud lidera esta etapa por permitir el acceso compartido y en tiempo real a la información del caso entre cliente, plataforma y proveedor. En segundo lugar, Blockchain se posiciona como mecanismo de verificación de responsabilidades, garantizando que los datos no han sido modificados, algo clave en entornos de responsabilidad compartida. RPA, se posiciona en tercer lugar, por su capacidad de automatizar notificaciones, seguimiento de respuestas y actualización de métricas del proveedor. Se priorizan estas tecnologías por su contribución a la transparencia, trazabilidad y automatización de la gestión colaborativa.

Reutilización de piezas o reciclaje de material: La fabricación aditiva lidera esta etapa por ser el recurso más directo para reparar o reproducir localmente la pieza no conforme, reduciendo plazos y costes. La IA ocupa el segundo lugar por su utilidad en diagnosticar si una pieza es recuperable y, en su caso, optimizar los parámetros de reparación o retrabajo. En tercer lugar, Big Data & Analytics permite identificar patrones de fallo y predecir oportunidades de reutilización o mejora en el diseño. Se seleccionan estas tecnologías por su orientación directa a la valorización técnica del producto. Otras como blockchain o RPA no impactan en la recuperación física del valor.

Gestión financiera: RPA encabeza esta etapa como solución eficaz para automatizar compensaciones, emisión de notas de crédito o reintegros. En segundo lugar, Blockchain garantiza la transparencia en las condiciones de la transacción, particularmente útil cuando hay cláusulas predefinidas de penalización o compensación. Cloud aparece como soporte que integra sistemas financieros y logísticos, asegurando fluidez y trazabilidad. Se descartan

tecnologías como robots, AR/VR o Digital Twin por no tener impacto alguno en flujos financieros.

Análisis de causa raíz y mejora continua: Big Data & Analytics encabeza esta etapa por su capacidad para transformar grandes volúmenes de datos técnicos en información útil para la mejora continua. En segundo lugar, Digital Twin permite simular procesos completos de fabricación y devolución, facilitando la validación de cambios antes de implementarlos. Por último, la AI complementa el análisis con herramientas predictivas que permiten anticipar errores similares en el futuro, ajustando parámetros o decisiones antes de que ocurran fallos. Estas tres tecnologías se seleccionan por su capacidad de generar conocimiento estructurado y aplicable, descartando otras como RPA, AR o robots, que no contribuyen directamente a la dimensión analítica y estratégica de esta etapa.

4.2 LOGÍSTICA INVERSA – LEAN

Una vez realizado el análisis con las tecnologías de la Industria 4.0, se va a realizar en esta sección el análisis de la capacidad de impacto de distintas técnicas Lean en las etapas ya definidas de los modelos B2C y B2B definidos previamente.

4.2.1 TÉCNICAS PROPUESTAS DE LA METODOLOGÍA LEAN

Para ello, se han identificado las siguientes diez técnicas. La metodología Lean dispone de una gran variedad de técnicas, pero para este análisis se han escogido las 10 que más impacto operativo pueden llegar a tener:

- 1. Value Stream Mapping (VSM):** Herramienta de diagnóstico que permite visualizar, mapear y analizar el flujo completo de materiales e información en un proceso. En logística inversa, facilita la identificación de cuellos de botella, actividades sin valor añadido y puntos críticos donde aplicar mejoras.

2. **5S:** Técnica de organización y estandarización del entorno de trabajo. Resulta especialmente útil en centros de clasificación o reacondicionamiento, donde el orden físico y visual impacta directamente en la eficiencia operativa.
3. **Kanban:** Sistema de control visual que regula el flujo de trabajo entre etapas, asegurando que no se acumulen excesos ni se generen cuellos de botella. En logística inversa permite equilibrar la carga de tareas como inspección, limpieza o reincorporación al inventario.
4. **Poka-Yoke:** Dispositivos o mecanismos a prueba de errores diseñados para evitar fallos humanos. Se aplica, por ejemplo, en el reetiquetado de productos, inspecciones visuales o validación automática de condiciones de devolución.
5. **Andon:** Sistema de alerta visual o sonora que permite notificar inmediatamente cualquier incidencia en el proceso. En logística inversa, resulta útil para señalar anomalías en la clasificación de productos, fallos en sistemas de inspección o problemas de stock.
6. **SMED (Single-Minute Exchange of Dies):** Técnica para reducir los tiempos de cambio o transición entre tareas o productos. En flujos inversos, permite adaptar rápidamente estaciones de trabajo a distintos tipos de productos devueltos con requerimientos variables.
7. **Root Cause Analysis (5 Whys):** Método estructurado para investigar la causa raíz de los problemas. Su uso permite corregir fallos recurrentes en devoluciones, errores en reembolsos o defectos detectados en productos retornados.
8. **Heijunka:** Técnica de nivelación de la producción que busca distribuir la carga de trabajo de manera equilibrada. En logística inversa, ayuda a mitigar los efectos de la variabilidad en la llegada de devoluciones.
9. **Jidoka:** Automatización inteligente con capacidad de detener el proceso ante errores o defectos. Se aplica en estaciones donde intervienen tecnologías de inspección automática, combinando eficiencia con control de calidad.
10. **TPM (Total Productive Maintenance):** Estrategia de mantenimiento preventivo y autónomo para maximizar la disponibilidad y fiabilidad de los equipos. Es

especialmente relevante en centros logísticos donde se utilizan escáneres, cintas transportadoras o maquinaria de reacondicionamiento.

- 11. Just-In-Time (JIT):** Técnica de sincronización que busca entregar productos o ejecutar tareas justo en el momento necesario. En logística inversa, permite minimizar inventarios de productos devueltos y coordinar su reincorporación al sistema según demanda real o capacidad operativa.

Una vez definidas las técnicas Lean con mayor aplicabilidad operativa, se presenta a continuación la matriz que recoge las herramientas Lean más relevantes para cada fase de ambos procesos. Las técnicas han sido ordenadas de izquierda a derecha en función de su impacto estimado, situando en primer lugar aquella que se considera más determinante en términos de mejora de la eficiencia, reducción de desperdicios y generación de valor operativo.

4.2.2 RESULTADO Y JUSTIFICACIÓN DEL MODELO DE TEXTIL

Proceso B2C

Etapa del proceso B2C	Técnica 1	Técnica 2	Técnica 3
Solicitud de devolución y autorización	Poka-Yoke	5S	5 Whys
Envío del producto devuelto	Heijunka	Kanban	Andon
Recepción en el centro de distribución	JIT	5S	Jidoka
Clasificación y decisión de recuperación	Jidoka	Poka-Yoke	SMED
Gestión financiera	Poka-Yoke	5 Whys	Kanban
Análisis, aprendizaje y mejora continua	5 Whys	VSM	Heijunka

Tabla 4. Técnicas Lean con más relevancia en el proceso B2C. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describe la justificación de las técnicas elegidas para cada etapa:

Solicitud de devolución y autorización: Poka-Yoke se sitúa como la técnica más relevante en esta etapa por su capacidad para prevenir errores recurrentes en la autorización de devoluciones, como fallos en la identificación del producto, condiciones no válidas o datos incompletos. En segundo lugar, 5S resulta especialmente útil para organizar tanto las interfaces digitales como los procedimientos internos, facilitando una gestión más clara y

eficiente del proceso. 5 Whys ocupa la tercera posición por su utilidad a la hora de investigar patrones de error o reclamaciones injustificadas, mejorando el diseño de las políticas de devolución. Estas tres herramientas han sido seleccionadas por su capacidad conjunta para asegurar precisión, orden y aprendizaje continuo, frente a otras técnicas menos aplicables en esta etapa.

Envío del producto devuelto: Heijunka encabeza esta etapa por su capacidad para nivelar la recogida de productos devueltos, mitigando los efectos de la variabilidad geográfica y temporal que caracteriza este flujo logístico. Le sigue Kanban, que permite regular de forma visual el avance de devoluciones entre los puntos de entrega, reduciendo cuellos de botella e improvisaciones. La tercera, Andon, ofrece una herramienta eficaz para generar alertas inmediatas ante incidencias como embalajes incorrectos, productos ausentes o retrasos en la recogida. Estas tres técnicas han sido elegidas por su impacto directo en la fluidez, visibilidad y capacidad de reacción en un proceso muy inestable.

Recepción en el centro de distribución: Just-In-Time (JIT) se posiciona como la técnica principal en esta etapa por su capacidad para reducir el inventario acumulado de devoluciones, sincronizando su recepción con la capacidad operativa del centro. En segundo lugar, 5S proporciona el marco necesario para mantener el orden y la limpieza en un entorno logístico complejo, con productos heterogéneos y de origen disperso. Jidoka ocupa la tercera posición al garantizar la detección inmediata de errores durante la recepción, permitiendo detener el proceso en caso de incidentes. Estas técnicas han sido seleccionadas por su capacidad para garantizar fluidez, orden y control de calidad en un punto crítico del proceso, como es la recepción en el centro de distribución.

Clasificación y decisión de recuperación: Jidoka lidera esta etapa por su capacidad para detener el flujo de trabajo ante la detección de defectos o condiciones no aptas para reventa, especialmente relevante en procesos que combinan automatización y control humano. En segundo lugar, Poka-Yoke refuerza el aseguramiento de calidad al evitar errores en tareas manuales como la inspección, la reetiquetación o el reacondicionamiento de productos

devueltos. SMED aparece como tercera opción por su utilidad al permitir la adaptación rápida de las estaciones de trabajo cuando se pasa de un tipo de producto a otro, algo frecuente en entornos con alta heterogeneidad. Estas tres técnicas han sido seleccionadas por su combinación de control de calidad, prevención de errores y flexibilidad operativa.

Gestión financiera: Poka-Yoke se encuentra en primer lugar por su capacidad para evitar errores críticos en procesos como el reembolso automático, la conciliación de transacciones o la emisión de devoluciones duplicadas. En segundo lugar, 5 Whys permite investigar eficazmente fallos recurrentes en el flujo financiero, como retrasos en pagos, incoherencias contables o discrepancias entre sistemas logísticos y económicos. Kanban se incorpora como tercera herramienta por su utilidad en la visualización y control del flujo de tareas entre áreas interdependientes, como logística y finanzas. Estas tres técnicas han sido seleccionadas por su aplicabilidad directa al control de errores, la mejora continua y la coordinación en procesos administrativos, descartando otras como SMED o JIT que no tienen impacto real en este contexto.

Análisis, aprendizaje y mejora continua: 5 Whys encabeza esta etapa por ser una herramienta fundamental para investigar las causas profundas de errores, incidencias logísticas o reclamaciones recurrentes, convirtiéndose en el motor de mejora estructural. Le sigue VSM, que permite mapear los flujos reales de información y materiales a lo largo del proceso inverso, identificando cuellos de botella y actividades sin valor añadido. En tercer lugar, Heijunka aporta valor al ayudar a estabilizar los flujos futuros mediante la distribución equilibrada del trabajo, con base en los aprendizajes derivados del análisis de datos. Estas técnicas han sido seleccionadas por su capacidad para generar conocimiento y mejora continua, frente a otras como Kanban o TPM, que aportan más en fases operativas que en la estrategia.

4.2.3 RESULTADO Y JUSTIFICACIÓN DEL MODELO DE FABRICACIÓN

Proceso B2B

Etapas del proceso B2B	Técnica 1	Técnica 2	Técnica 3
Recepción de incidencia y evaluación técnica inicial	Poka-Yoke	5S	5 Whys
Decisión sobre método de retorno o compensación	5 Whys	VSM	5S
Devolución del producto	Heijunka	Kanban	Andon
Inspección técnica del producto devuelto	Jidoka	Poka-Yoke	SMED
Comunicación con el proveedor causante	Kanban	5S	Andon
Reutilización de piezas o reciclaje de material	JIT	Poka-Yoke	SMED
Gestión financiera	Poka-Yoke	5 Whys	Kanban
Análisis de causa raíz y mejora continua	5 Whys	VSM	Heijunka

Tabla 5. Técnicas Lean con más relevancia en el proceso B2B. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se describe la justificación de las técnicas elegidas para cada etapa:

Recepción de incidencia y evaluación técnica inicial: Poka-Yoke encabeza esta etapa por su utilidad en evitar errores en la recogida y validación de información técnica sobre la pieza no conforme, como referencias equivocadas, archivos CAD mal adjuntados o descripciones imprecisas. En segundo lugar, 5S garantiza el orden y estandarización en los sistemas de ticketing o plataformas colaborativas, donde múltiples personas deben acceder a la información estructurada. 5 Whys ocupa el tercer lugar al facilitar la identificación de causas recurrentes de incidencias, lo que es clave para establecer patrones de mejora. Estas tres técnicas han sido seleccionadas por su aplicabilidad directa a entornos digitalizados de evaluación técnica.

Decisión sobre método de retorno o compensación: 5 Whys es la técnica prioritaria en esta etapa al permitir tomar decisiones fundamentadas a partir de un análisis estructural del fallo. VSM le sigue en importancia, ya que permite visualizar el impacto de cada decisión

en el flujo global de la plataforma, incluyendo proveedores, cliente final y capacidad de fabricación. En tercer lugar, 5S contribuye a estandarizar los criterios y condiciones operativas bajo las que se aplica cada solución, especialmente útil en entornos colaborativos. Estas tres herramientas se seleccionan por su orientación al diagnóstico, alineación operativa y claridad de decisión, frente a otras como Kanban o Heijunka, que no intervienen directamente en el proceso de decisión técnica.

Devolución del producto: Heijunka lidera esta etapa por su capacidad para nivelar el flujo de productos retornados desde múltiples ubicaciones. Kanban se posiciona como herramienta clave para gestionar la visibilidad del estado de cada devolución, tanto en tránsito como en llegada prevista. Andon completa la selección como sistema de alerta ante incidencias logísticas durante la devolución, como embalaje incorrecto o pérdida de trazabilidad. Estas técnicas han sido elegidas por su impacto en la coordinación y estabilidad del flujo logístico inverso.

Inspección técnica del producto devuelto: Jidoka es fundamental en esta etapa por su capacidad de combinar automatización con parada ante defectos detectados, asegurando calidad sin intervención constante. Poka-Yoke aparece como segunda herramienta, ayudando a prevenir errores humanos en tareas como la medición, etiquetado o asignación de la ruta de recuperación. SMED completa la selección como apoyo a la agilidad operativa, permitiendo adaptar estaciones de inspección según el tipo de pieza y tecnología de fabricación implicada. Estas tres técnicas fueron seleccionadas por su aplicación directa en la fiabilidad, precisión y flexibilidad del proceso de inspección, descartando herramientas más administrativas.

Comunicación con el proveedor causante: Kanban encabeza esta etapa como sistema eficaz para organizar y hacer seguimiento de las tareas y respuestas dentro del proceso de retroalimentación con el proveedor. La siguiente, 5S, útil para mantener ordenadas las evidencias documentales y técnicas compartidas entre partes, algo clave en plataformas colaborativas. Andon se incorpora como técnica para alertar de retrasos o falta de respuesta,

favoreciendo la trazabilidad y responsabilidad compartida. Se priorizan estas tres herramientas por su capacidad para estructurar, visibilizar y agilizar la comunicación operativa, descartando otras como SMED o JIT, más centradas en ejecución directa.

Reutilización de piezas o reciclaje de material: Just-In-Time lidera esta etapa por su utilidad en sincronizar las acciones de reacondicionamiento o reciclaje con la demanda operativa, evitando acumulaciones innecesarias de materiales. En segundo lugar, Poka-Yoke garantiza la corrección del proceso técnico. SMED ocupa la tercera posición por facilitar el cambio rápido entre operaciones distintas, como pasar de reacondicionar una pieza a desmontar otra para recuperación parcial. Estas tres técnicas fueron seleccionadas por su orientación a la eficiencia operativa, precisión y flexibilidad, frente a otras más analíticas o administrativas.

Gestión financiera: Poka-Yoke se elige como técnica prioritaria por su capacidad para evitar errores en compensaciones económicas, reembolsos o facturación de nuevos envíos, especialmente en sistemas automatizados. 5 Whys permite analizar los errores financieros recurrentes y proponer mejoras estructurales en la gestión contable. Kanban facilita la coordinación entre las tareas logísticas, técnicas y financieras, garantizando visibilidad en procesos donde intervienen varios actores. Estas tres técnicas fueron seleccionadas por su aplicabilidad directa a procesos administrativos y su capacidad para prevenir y corregir fallos.

Análisis de causa raíz y mejora continua: 5 Whys es la herramienta central de esta etapa por su enfoque en la identificación sistemática de fallos recurrentes y su eliminación estructural. VSM le sigue como técnica que permite visualizar el flujo completo y localizar actividades sin valor añadido, proporcionando una base para la toma de decisiones de mejora. Heijunka complementa el análisis al estabilizar la carga futura, redistribuyendo el trabajo según los aprendizajes obtenidos. Estas técnicas fueron seleccionadas por su orientación estratégica a la mejora continua.

4.3 INDUSTRIA 4.0 – LEAN

En esta sección, se presentan las matrices de correlación entre los principios Lean y las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0. Esta herramienta tiene como objetivo identificar de manera estructurada los puntos de conexión más relevantes entre ambos enfoques, evaluando en qué medida las tecnologías digitales pueden potenciar la aplicación de los principios Lean en ambos contextos logísticos ya definidos, como los asociados a la logística inversa en e-commerce. La matriz se construye a partir del análisis conceptual y práctico desarrollado en los capítulos anteriores, y servirá como base para interpretar las sinergias operativas, así como para fundamentar futuras propuestas de integración metodológica en entornos industriales digitalizados.

4.3.1 ELECCIÓN DE LAS TÉCNICAS Y TECNOLOGÍAS ANALIZADAS

Para la matriz se han utilizado las doce tecnologías habilitadoras ya mencionadas y una serie de técnicas Lean adaptadas a cada proceso. Las técnicas Lean se han dividido en cuatro categorías: Just-In-Time, Jidoka, Muda y Kaizen. Dentro de cada categoría se han utilizado técnicas asociadas a estos conceptos, adaptándolas a los procesos a analizar. Con el fin de evitar repeticiones innecesarias y dado que muchas de las tecnologías y principios que se mencionan a continuación ya han sido definidos en capítulos anteriores, en esta sección no se volverán a describir en detalle, priorizando así la claridad y la fluidez del análisis:

JIT	Pull System
	SMED
	Heijunka por tipo de tecnología
	Kanban
Jidoka	Andon digital
	Poka-Yoke en los sistemas informáticos
	Parada automáticas
	Diagnóstico automático de errores
Muda	Gemba digital del flujo completo
	5 Why's ante errores repetitivos
	Estándares de trabajo
	VSM completo
	Eliminación de pasos manuales
Kaizen	Revisión continua de procesos no productivos
	Formación cruzada
	Ringi
	5S físico y digital
	TPM en máquinas de fabricación y sistemas
	PDCA para mejorar el sistema de devoluciones

Tabla 6. Técnicas Lean elegidas para el análisis de correlación para el modelo B2B. Fuente: Elaboración propia

JIT	Pull System
	SMED en los centros de distribución
	Heijunka post rebajas
	Kanban
Jidoka	Andon digital
	Poka-Yoke en los sistemas informáticos
	Clasificación automática de las devoluciones
	Transporte autónomo en el CD
Muda	Parada automáticas
	Gemba digital del flujo completo
	5 Why's ante errores repetitivos
	Estándares de trabajo
	VSM completo
Kaizen	Eliminación de pasos manuales
	Reducción de movimientos innecesarios en los CD
	Optimización de rutas de recogida
	Formación cruzada
	Ringi
Kaizen	5S físico y digital
	TPM en las máquinas de los CD y en los sistemas
	PDCA para mejorar el sistema de devoluciones

Tabla 7. Técnicas Lean elegidas para el análisis de correlación para el modelo B2C. Fuente: Elaboración propia

4.3.2 CRITERIO UTILIZADO PARA LA ASIGNACIÓN DE PUNTUACIONES

La construcción de las matrices de correlación entre los principios Lean y las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 en los modelos B2C y B2B se ha basado en un sistema de puntuación uniforme del 0 al 10. Este sistema evalúa el grado de alineación y apoyo que cada tecnología ofrece a cada técnica Lean dentro de cada contexto logístico.

Para garantizar la coherencia del análisis, las puntuaciones se han determinado considerando tres dimensiones clave:

La primera es la aplicabilidad operativa directa, en la que se valora si la tecnología puede ser implementada de forma funcional y tangible para ejecutar, facilitar o mejorar la técnica Lean correspondiente. Se han otorgado mayores puntuaciones a aquellas tecnologías cuya adopción tiene un efecto visible en la aplicación práctica del principio Lean evaluado.

La segunda es la contribución al rendimiento Lean, en la que se evalúa el impacto de la tecnología en términos de eficiencia operativa, automatización, reducción de desperdicios, mejora de la trazabilidad, calidad o tiempo de respuesta. Cuanto mayor sea su capacidad para reforzar los objetivos del pensamiento Lean, mayor será su puntuación.

La tercera es la pertinencia tecnológica en el contexto analizado. En esta se analiza si la implementación de la tecnología tiene sentido en el entorno específico, teniendo en cuenta factores como la complejidad del flujo, la variabilidad de la demanda o el nivel de madurez digital del proceso.

Este enfoque multidimensional permite una valoración no solo técnica, sino también estratégica, de la relación entre cada tecnología y los principios Lean, ajustada al grado de madurez digital y necesidades de cada modelo.

La siguiente tabla muestra un resumen del criterio de puntuación:

Puntuación	Interpretación
0	Sin aplicabilidad. La tecnología no aporta valor funcional ni estratégico a la técnica Lean en el contexto analizado.
1-2	Aplicabilidad marginal. Solo útil en casos muy puntuales o indirectamente, sin impacto significativo.
3-4	Aplicabilidad baja. La tecnología puede apoyar parcialmente la técnica Lean, pero su uso no es prioritario ni generalizado.
5-6	Utilidad moderada. Su implementación contribuye de forma clara y frecuente a mejorar la ejecución de la técnica Lean.
7-8	Alta relevancia. Tiene un papel importante, recurrente y transformador en la técnica evaluada.
9-10	Tecnología clave o crítica. Su presencia es determinante para alcanzar una aplicación óptima y escalable de la técnica Lean.

Tabla 8. Resumen del criterio de puntuación. Fuente: Elaboración propia

Una vez definido el criterio se muestran a continuación las matrices de correlación completas para cada modelo:

4.3.3 MATRIZ DEL MODELO DE TEXTIL

TEXTIL		Nube	Robots Autónomos	IoT	Big Data	IA	AR & VR	Ciberseguridad	RPA	Gemelo Digital	Control Tower	Blockchain	Fabricación Aditiva	Cobots	
		JIT	Pull System	9	5	9	8	7	0	2	5	5	6	2	0
	SMED en los centros de distribución	6	8	9	5	6	0	2	4	5	4	1	1	7	58
	Heijunka post rebajas	7	5	7	6	6	0	2	4	5	4	2	0	3	51
	Kanban	9	4	8	7	7	0	3	8	6	5	5	0	3	65
Jidoka	Andon digital	9	5	7	4	6	4	4	7	6	6	3	0	6	67
	Poka-Yoke en los sistemas informáticos	7	4	6	6	7	3	6	5	6	5	3	0	5	63
	Clasificación automática de las devoluciones	8	5	8	6	9	5	4	5	5	6	3	2	4	70
	Transporte autónomo en el CD	6	10	7	7	8	0	3	5	6	7	2	0	9	70
	Parada automáticas	5	7	10	5	8	0	2	5	6	5	2	0	5	60
Muda	Gemba digital del flujo completo	9	0	6	8	7	5	5	4	7	9	4	0	0	64
	5 Why's ante errores repetitivos	6	0	5	10	8	2	3	4	5	6	3	0	0	52
	Estándares de trabajo	7	8	5	5	5	0	2	7	4	6	2	0	7	58
	VSM completo	9	0	9	9	7	4	4	6	10	10	4	0	0	72
	Eliminación de pasos manuales	7	6	6	6	6	0	2	8	5	6	2	3	0	57
	Reducción de movimientos innecesarios en los CD	5	6	8	7	9	3	2	3	3	7	2	3	2	60
	Optimización de rutas de recogida	7	5	7	8	8	3	3	6	6	9	4	0	5	71
Kaizen	Formación cruzada	8	0	8	10	10	6	1	3	9	4	1	0	0	60
	Ringí	8	0	5	8	9	0	2	5	6	3	2	0	0	48
	5S físico y digital	7	0	9	5	5	2	3	5	8	5	2	2	0	53
	TPM en las máquinas de los CD y en los sistemas	6	7	8	6	6	6	4	5	6	6	3	6	7	76
	PDCA para mejorar el sistema de devoluciones	8	0	7	7	7	3	5	5	6	7	5	2	0	62

153 85 154 143 151 46 64 109 125 126 57 19 68

Tabla 9. Matriz de correlación del modelo B2C. Fuente: Elaboración propia

4.3.4 MATRIZ DEL MODELO DE FABRICACIÓN

XOMETRY		Nube	Robots Autónomos	IoT	Big Data	IA	AR & VR	Ciberseguridad	RPA	Gemelo Digital	Control Tower	Blockchain	Fabricación Aditiva	Cobots													
		JIT	Pull System	9	5	9	8	7	0	2	5	5	6	2	3	5	66										
SMED	6		8	9	5	6	0	2	4	5	5	0	7	7	64												
Heijunka por tipo de tecnología	7		5	7	6	6	0	2	4	5	6	2	4	3	57												
Kanban	9		4	8	7	7	0	3	8	6	6	5	3	3	69												
Jidoka	Andon digital	9	5	7	4	6	5	4	7	6	7	4	2	6	72												
	Poka-Yoke en los sistemas informaticos	7	4	6	6	7	4	7	5	6	5	4	2	5	68												
	Parada automáticas	5	7	10	5	8	0	3	5	6	5	2	3	5	64												
	Diagnóstico automático de errores	6	7	9	7	9	6	4	5	6	6	5	6	5	81												
Muda	Gemba digital del flujo completo	9	0	6	8	7	5	5	4	7	9	4	0	0	64												
	5 Why's ante errores repetitivos	6	0	5	10	8	3	3	4	5	6	3	0	0	53												
	Estándares de trabajo	7	8	5	5	5	0	2	7	4	5	2	0	7	57												
	VSM completo	9	0	9	9	7	4	4	6	10	10	4	0	0	72												
	Eliminación de pasos manuales	7	6	6	6	6	0	2	8	5	6	2	6	4	64												
	Revisión continua de procesos no productivos	6	0	7	6	7	4	4	4	7	7	3	0	0	55												
Kaizen	Formación cruzada	8	0	8	10	10	6	1	0	9	4	1	0	0	57												
	Ringi	8	0	5	8	9	0	2	5	6	3	2	0	0	48												
	5S físico y digital	7	0	9	5	5	3	3	5	8	5	2	2	0	54												
	TPM en máquinas de fabricación y sistemas	6	7	8	6	6	6	3	5	6	6	3	9	7	78												
	PDCA para mejorar el sistema de devoluciones	8	0	7	7	7	3	6	5	6	7	5	2	0	63												
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="background-color: #c6e0b4;">139</td> <td style="background-color: #f4cccc;">66</td> <td style="background-color: #c6e0b4;">140</td> <td style="background-color: #c6e0b4;">128</td> <td style="background-color: #c6e0b4;">133</td> <td style="background-color: #f4cccc;">49</td> <td style="background-color: #f4cccc;">62</td> <td style="background-color: #c6e0b4;">96</td> <td style="background-color: #c6e0b4;">118</td> <td style="background-color: #c6e0b4;">114</td> <td style="background-color: #f4cccc;">55</td> <td style="background-color: #f4cccc;">49</td> <td style="background-color: #f4cccc;">57</td> </tr> </table>															139	66	140	128	133	49	62	96	118	114	55	49	57
139	66	140	128	133	49	62	96	118	114	55	49	57															

Tabla 10. Matriz de correlación del modelo B2B. Fuente: Elaboración propia

Como se ha mencionado anteriormente, cada celda recoge una puntuación del 0 al 10, basada en el criterio mencionado. Al final de cada fila se incluye la suma de todas las tecnologías aplicables a cada técnica Lean, lo que permite identificar aquellas prácticas más susceptibles de ser mejoradas por las tecnologías habilitadoras. Asimismo, los totales situados al pie de cada columna indican el nivel de aplicabilidad general de cada tecnología, sirviendo como guía para analizar cuales tienen más impacto general.

Todos los resultados obtenidos a partir de las matrices de correlación y del análisis de impacto previo con las etapas de los procesos logísticos, serán analizados en detalle en el siguiente capítulo, donde se interpretarán los patrones observados y se identificarán las sinergias más relevantes entre principios Lean, tecnologías de la Industria 4.0 y la logística inversa.

Capítulo 5. RESULTADOS

Este capítulo presenta los principales resultados obtenidos a partir del análisis de correlaciones entre logística inversa, principios Lean y tecnologías de la Industria 4.0, aplicados a los dos modelos de e-commerce propuestos. A través del estudio desarrollado, se identifican las sinergias más relevantes, las tecnologías y técnicas con mayor impacto operativo, así como los patrones comunes y diferencias entre contextos.

5.1 SINERGIAS ENTRE LOGÍSTICA INVERSA E I4.0

El análisis de las matrices de correlación entre las etapas de la logística inversa y las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 revela patrones significativos en ambos modelos estudiados, permitiendo identificar qué soluciones digitales poseen mayor capacidad de impacto en función del contexto operativo.

5.1.1 MODELO DE TEXTIL

En el caso del modelo B2C textil, que se caracteriza por altos volúmenes de devoluciones y una elevada variabilidad asociada al comportamiento del consumidor, destacan tecnologías orientadas a la automatización, trazabilidad y análisis predictivo. La inteligencia artificial aparece como tecnología clave en múltiples etapas, especialmente en la autorización de devoluciones y en la clasificación de productos, donde su capacidad para identificar patrones y tomar decisiones automáticas resulta crucial ante flujos grandes e inestables. Del mismo modo, tecnologías como Big Data & Analytics y IIoT permiten mejorar la visibilidad del flujo logístico y anticipar demandas operativas, mientras que herramientas como RPA o robots autónomos aportan eficiencia en tareas repetitivas de gestión y manipulación. La integración de plataformas en la nube y Control Towers refuerza la coordinación global del sistema, contribuyendo a una visión holística y en tiempo real del proceso inverso.

5.1.2 MODELO DE FABRICACIÓN

En el modelo B2B de fabricación aditiva, el impacto de la digitalización se orienta más a la gestión técnica de la información y la toma de decisiones de alta precisión. Tecnologías como Cloud, Blockchain o Digital Twin cobran una mayor relevancia por su capacidad para asegurar trazabilidad documental, simular escenarios o verificar responsabilidades en procesos colaborativos. La IA mantiene un rol central, especialmente en la evaluación técnica de incidencias y en la decisión sobre métodos de retorno o compensación, donde los datos técnicos y los requisitos funcionales exigen una gestión más analítica y personalizada. La tecnología de fabricación aditiva, en este caso, se posiciona como una herramienta no solo de producción, sino también de recuperación de valor, al permitir reproducir piezas defectuosas sin necesidad de gestionar retornos físicos, lo que refuerza la lógica de eficiencia propia del modelo.

5.1.3 CONCLUSIÓN

Comparativamente, se observa que mientras en el modelo B2C las tecnologías 4.0 se utilizan para gestionar el volumen, estandarizar operaciones y aumentar la velocidad de respuesta, en el modelo B2B su función se centra en garantizar precisión, trazabilidad y control técnico del ciclo inverso. No obstante, existen puntos comunes de alto impacto en ambos casos, como la aplicabilidad transversal de la IA, la utilidad estratégica de Big Data y la importancia de la conectividad proporcionada por soluciones Cloud.

En conclusión, los resultados confirman que las tecnologías digitales no solo permiten optimizar las operaciones de logística inversa, sino que también redefinen su lógica de funcionamiento. Lejos de ser un simple soporte, la Industria 4.0 actúa como un habilitador estructural que transforma procesos en sistemas inteligentes y adaptativos.

5.2 SINERGIAS ENTRE LOGÍSTICA INVERSA Y LEAN

El análisis de las matrices que relacionan las etapas de la logística inversa con las técnicas Lean revela una sólida compatibilidad entre ambos enfoques, especialmente cuando se orientan hacia la eficiencia operativa, la reducción de variabilidad y la mejora continua. Si bien la aplicación de Lean en contextos tradicionales ha sido ampliamente documentada, su integración en procesos inversos dentro del e-commerce plantea retos específicos que requieren una adaptación metodológica, tal y como reflejan los resultados obtenidos.

5.2.1 MODELO DE TEXTIL

En el modelo B2C textil, dominado por altos volúmenes y devoluciones impredecibles, las técnicas Lean que ofrecen mayor impacto son aquellas enfocadas en control de errores, orden y estandarización. Destaca el uso de Poka-Yoke, que se posiciona como herramienta clave en fases como la autorización de devolución, la clasificación o la gestión financiera, ya que permite minimizar errores repetitivos en entornos de alta automatización y escaso margen de inspección manual. La técnica 5S también muestra gran aplicabilidad, no solo en el plano físico, sino también en la gestión digital del proceso, ayudando a estructurar la información y estandarizar flujos. En cuanto a la mejora continua, el método 5 Whys aparece como pilar fundamental en las fases de análisis y retroalimentación, permitiendo identificar causas de error y formular planes de acción.

En etapas logísticas como la recepción en almacén o el envío de productos devueltos, destacan técnicas como JIT, Heijunka y Kanban, que contribuyen a equilibrar cargas de trabajo, reducir acumulaciones y aumentar la fluidez de los procesos. Estas herramientas resultan especialmente eficaces cuando se aplican sobre sistemas ya soportados por datos en tiempo real, reforzando la sinergia entre Lean y digitalización.

5.2.2 MODELO DE FABRICACIÓN

En el modelo B2B de fabricación aditiva, las técnicas Lean se orientan más hacia la gestión del conocimiento, la trazabilidad y la toma estructurada de decisiones. Herramientas como Value Stream Mapping y 5 Whys permiten analizar de forma sistemática flujos complejos, identificar puntos críticos en la interacción entre cliente, proveedor y plataforma. Asimismo, Jidoka y Poka-Yoke adquieren un papel relevante en la inspección técnica de productos y en la gestión del reacondicionamiento, donde la prevención de errores y el control de calidad son claves dada la naturaleza crítica de las piezas implicadas.

Además, en este modelo, técnicas como Kanban o Andon, tradicionalmente vinculadas al entorno físico, encuentran una nueva aplicación en entornos digitales colaborativos, especialmente en la comunicación con proveedores y la gestión de incidencias, donde actúan como mecanismos de visibilidad y coordinación.

5.2.3 CONCLUSIÓN

En conjunto, los resultados muestran que la filosofía Lean es completamente aplicable a la logística inversa, siempre que se adapte al contexto. Su valor radica tanto en la simplificación operativa como en la construcción de sistemas robustos frente a la variabilidad, siendo especialmente útil en fases donde la toma de decisiones es crítica o los errores generan un alto coste económico o reputacional. De este modo, Lean no solo mejora la eficiencia de los procesos inversos, sino que refuerza su fiabilidad y capacidad de aprendizaje.

5.3 *CORRELACIÓN ENTRE INDUSTRIA 4.0 Y LEAN*

El cruce entre las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 y las técnicas Lean aplicadas a la logística inversa constituye uno de los hallazgos más relevantes de este trabajo, al evidenciar cómo ambas corrientes pueden actuar de forma sinérgica para transformar procesos tradicionalmente reactivos en sistemas inteligentes, ágiles y centrados en la mejora continua.

5.3.1 TECNOLOGÍAS CON MÁS IMPACTO

El análisis conjunto de las matrices de correlación correspondientes a los modelos B2B y B2C revela que tres tecnologías destacan claramente por su capacidad para reforzar la implementación de principios Lean en procesos de logística inversa: el Internet of Things, la Nube y la inteligencia artificial.

Estas tecnologías presentan una aplicabilidad transversal en múltiples técnicas Lean, tanto operativas como estratégicas. El IoT permite capturar datos en tiempo real desde los flujos físicos y los activos logísticos, lo que resulta esencial para prácticas como el Just-In-Time, el control autónomo de procesos (Jidoka) o para varias técnicas de Muda. Por su parte, Cloud actúa como infraestructura clave para la sincronización de información entre actores y sistemas distribuidos, habilitando herramientas como el Kanba y el Andon, así como permitir una correcta sincronización del proceso. La inteligencia artificial, finalmente, se consolida como la base de una automatización avanzada orientada a la toma de decisiones, la detección de errores y el aprendizaje continuo, alineándose con Kaizen y el 5 Whys.

Por otro lado, tecnologías como la realidad aumentada y virtual, blockchain o la fabricación aditiva muestran una menor integración con los principios Lean analizados. Aunque poseen potencial en ámbitos específicos como la trazabilidad, la visualización de datos o el reacondicionamiento técnico, su impacto actual es limitado en términos de aplicabilidad operativa general dentro de los modelos logísticos que se han evaluado.

5.3.2 SINERGIAS EN JUST-IN-TIME

Las tecnologías que muestran una mejor sinergia con Just-In-Time son el IoT, Cloud y la IA. El IoT destaca por facilitar una trazabilidad precisa y en tiempo real, lo que permite reaccionar rápidamente ante devoluciones sin necesidad de sobreinventarios. Cloud aporta conectividad entre sistemas y visibilidad global del proceso. Por otra parte, la inteligencia artificial contribuye mediante la anticipación de picos de demanda y la adaptación dinámica de los recursos disponibles.

En el otro extremo, tecnologías como blockchain, realidad aumentada o fabricación aditiva presentan una conexión más débil con este principio. Su funcionalidad, más centrada en trazabilidad de datos, soporte visual o reacondicionamiento, tiene un efecto muy limitado en la sincronización de flujos o la gestión dinámica del inventario.

Como síntesis, el Just-In-Time encuentra un alto grado de apoyo en tecnologías que combinan visibilidad operativa, conectividad de datos y capacidad predictiva. Estas sinergias permiten aplicar este principio incluso en procesos inversos complejos, mejorando tanto la eficiencia como la capacidad de adaptación del sistema.

5.3.3 SINERGIAS EN JIDOKA

Las tecnologías con mayor alineación con el principio de Jidoka en ambos modelos son la IA, robots autónomos y Cloud. La IA destaca especialmente por su capacidad para detectar errores en tiempo real, automatizar decisiones ante fallos y ejecutar diagnósticos precisos sin intervención humana. Esto es especialmente útil en procesos de clasificación, inspección o control de calidad de productos devueltos. Los robots autónomos, por su parte, permiten que ciertas tareas operativas se detengan automáticamente ante una anomalía, reforzando el control de calidad en entornos de alta carga operativa y también realizar estos controles de calidad de manera autónoma. Finalmente, la nube proporciona el entorno digital necesario para que estas decisiones y alertas se comuniquen y gestionen de forma inmediata entre sistemas distribuidos.

En cambio, tecnologías como ciberseguridad, blockchain y fabricación aditiva muestran una conexión más limitada con este principio ya que no tienen las características necesarias para aportar eficiencia en este contexto.

La clave para aplicar Jidoka con éxito está en combinar automatización con capacidad de decisión inteligente, algo que solo es posible con tecnologías que integren procesamiento de datos, autonomía operativa y comunicación inmediata.

5.3.4 SINERGIAS EN MUDA

El análisis con el principio de eliminación de desperdicios (Muda) muestra un alto nivel de compatibilidad con tecnologías como Big Data & Analytics, Digital Twin e IA. Big Data permite identificar ineficiencias a partir del análisis de grandes volúmenes de datos operativos, facilitando decisiones basadas en evidencia para eliminar tareas sin valor. Los gemelos digitales, por su parte, permiten simular procesos completos, visualizar flujos innecesarios y validar mejoras antes de implementarlas, lo que potencia herramientas Lean como el Value Stream Mapping o la revisión de procesos no productivos. La IA complementa este enfoque al detectar patrones de errores repetitivos o ineficiencias operativas que escapan al análisis humano.

Por otra parte, tecnologías como blockchain, realidad aumentada o ciberseguridad muestran un impacto más reducido. Estas no tienen un papel destacado en la detección o eliminación directa de desperdicios operativos. Su aportación a la eficiencia es más indirecta o puntual.

En conjunto, Muda se ve especialmente reforzado por tecnologías que ofrecen visibilidad profunda del proceso y capacidad analítica, permitiendo no solo detectar donde y como se pierde valor, sino también justificar y priorizar su eliminación de forma sistemática.

5.3.5 SINERGIAS EN KAIZEN

El principio de mejora continua, Kaizen, muestra una fuerte sinergia con tecnologías como la IA, Big Data & Analytics y Digital Twin. La inteligencia artificial permite aprender de los datos históricos y generar recomendaciones automáticas para optimizar procesos. Big Data es clave para alimentar ese aprendizaje, ofreciendo una base sólida de análisis cuantitativo sobre errores, tiempos, flujos y resultados. Por su parte, los gemelos digitales aportan valor al permitir experimentar mejoras de forma virtual antes de aplicarlas en el entorno real, lo que reduce riesgos y permite mejorar de manera más rápida.

En cambio, tecnologías como fabricación aditiva, cobots o realidad aumentada tanto vínculo con Kaizen. Su impacto en la mejora continua es limitado, ya que tienden a aplicarse a tareas operativas muy concretas.

En resumen, Kaizen se ve potenciado por aquellas tecnologías que permiten aprender del sistema y tomar decisiones de mejora de forma constante y estructurada. Estas herramientas refuerzan la capacidad de adaptación del proceso ante cambios, errores o nuevas oportunidades.

5.3.6 CONCLUSIÓN

Como conclusión, lo que genera mayores sinergias entre las tecnologías de la Industria 4.0 y los principios Lean es la capacidad para aportar información útil y accionable sobre el proceso en tiempo real. Cuando una tecnología permite observar el estado del sistema, anticiparse a errores, tomar decisiones rápidas o mejorar continuamente a partir de datos, su integración con Lean es natural. Esto ocurre porque Lean necesita precisamente eso: visibilidad, control y aprendizaje constante para poder eliminar desperdicios, evitar errores y mejorar de forma continua. Por ello, tecnologías como el IoT, la IA, el Cloud y Big Data se alinean tan bien con Lean, no solo automatizan tareas, sino que aportan conocimiento y control sobre el sistema.

5.4 SÍNTESIS GENERAL

Las sinergias observadas entre logística inversa, Lean e Industria 4.0 a lo largo del análisis no surgen de forma aislada en cada relación, sino que responden a factores comunes que se repiten en los tres casos. El patrón más claro es que las sinergias aparecen cuando las tecnologías o técnicas Lean aportan capacidad para gestionar la variabilidad, reducir la incertidumbre y facilitar la toma de decisiones operativas en tiempo real. Estos tres aspectos son especialmente críticos en la logística inversa, que se caracteriza por flujos inestables, entradas no planificadas y una fuerte presión por la eficiencia.

En las tres combinaciones analizadas, las herramientas que más sinergia generan son aquellas que permiten observar el estado real del proceso, actuar con agilidad y aprender del sistema. Por ejemplo, tecnologías como IoT, IA o Big Data son útiles tanto para controlar los retornos como para aplicar Jidoka o identificar desperdicios. De la misma manera, técnicas Lean como Poka-Yoke, JIT o 5 Whys muestran alto impacto cuando ayudan a estructurar decisiones rápidas en entornos donde no hay margen para errores o acumulaciones.

En resumen, las sinergias entre logística inversa, Lean e Industria 4.0 se explican por su capacidad compartida para responder a la variabilidad e incertidumbre del proceso logístico. Las herramientas que ofrecen visibilidad, agilidad y aprendizaje operativo son las que mejor se integran, porque permiten actuar con precisión en entornos inestables y exigentes como la logística inversa.

Capítulo 6. MODELO DE DIAGNÓSTICO

Con el objetivo de profundizar en la aplicabilidad práctica de los hallazgos obtenidos en los capítulos anteriores, se propone en este apartado el desarrollo de un modelo de diagnóstico que permita validar empíricamente las relaciones identificadas entre logística inversa, principios Lean y tecnologías de la Industria 4.0. Este modelo se concibe no como una herramienta estática, sino como un instrumento dinámico de evaluación que pueda ser utilizado por empresas con estructuras logísticas similares a los casos analizados (modelos B2C y B2B), especialmente en el contexto del comercio electrónico.

El planteamiento metodológico del modelo parte de los análisis elaborados en capítulos previos, los cuales recogen la interacción entre etapas clave del proceso logístico inverso y los elementos operativos de la filosofía Lean y de la Industria 4.0. A partir de dichos análisis, se han diseñado instrumentos diagnósticos que podrán ser utilizados por organizaciones del sector con el fin de recopilar información comparativa y contextualizada. Esta aproximación tiene dos finalidades: por un lado, contrastar si los patrones observados en los casos teóricos se reproducen en la práctica real de otras empresas; y por otro, ofrecer a estas organizaciones un marco de autoevaluación que les permita identificar áreas críticas de mejora y potenciales sinergias no explotadas.

Este modelo de diagnóstico no pretende ser aplicado ni validado empíricamente en el marco de este proyecto, sino que se plantea como una propuesta metodológica para su posible implementación futura. Su objetivo es ofrecer una base estructurada sobre la cual otras investigaciones o iniciativas empresariales puedan construir ejercicios de autoevaluación, análisis comparativo o toma de decisiones estratégicas. Al proponer una herramienta fundamentada en las correlaciones previamente identificadas, se pretende facilitar la transferencia del conocimiento generado en este trabajo hacia contextos reales, promoviendo así la evolución de la logística inversa hacia modelos más eficientes e integrados bajo los principios Lean y las capacidades de la Industria 4.0.

6.1 CRITERIOS PARA EL MODELO

6.1.1 METODOLOGÍA PARA LA IMPLANTACIÓN

Para garantizar que la aplicación del modelo de diagnóstico propuesto se realice de forma sistemática, eficaz y alineada con los principios de mejora continua, se adopta como marco metodológico el ciclo PDCA (Plan–Do–Check–Act). Esta estructura, originaria del pensamiento de calidad desarrollado por Deming, ha sido incorporada ampliamente en los sistemas de gestión modernos (Martins, 2024).

Plan (Planificar): Esta fase inicial consiste en identificar una necesidad de mejora o una oportunidad de análisis, establecer los objetivos que se desean alcanzar y diseñar un plan de actuación estructurado. En este punto se definen las variables clave, los recursos necesarios, los responsables implicados y los indicadores que permitirán evaluar el desempeño posterior.

Do (Hacer): Una vez definido el plan, se ejecutan las acciones previstas según lo establecido. Esta etapa implica poner en práctica las decisiones tomadas, llevar a cabo las mediciones necesarias y recoger los datos pertinentes. En metodologías de mejora, suele recomendarse comenzar con una implementación a pequeña escala para reducir riesgos y facilitar la validación de las hipótesis formuladas. La documentación de todo el proceso es clave para su posterior análisis.

Check (Verificar): En esta tercera fase se contrastan los resultados obtenidos con los objetivos definidos inicialmente. Se evalúa el grado de cumplimiento, se detectan desviaciones y se analizan las causas que puedan haber provocado diferencias entre lo previsto y lo observado. Esta fase no se limita a la medición cuantitativa, sino que incluye también la interpretación cualitativa de los datos con el fin de extraer aprendizajes relevantes.

Act (Actuar): La última fase consiste en tomar decisiones con base en lo aprendido. Si los resultados han sido positivos, se procede a estandarizar el nuevo enfoque y extenderlo a otros

ámbitos. Si, por el contrario, se han identificado desviaciones, se rediseña el plan y se inicia un nuevo ciclo de mejora. Esta fase cierra el bucle e impulsa la mejora continua, uno de los principios fundamentales del pensamiento Lean.

Este enfoque metodológico se alinea con las siguientes normas de referencia:

- **UNE-EN ISO 9001:2015**, sobre sistemas de gestión de la calidad, que establece como principio fundamental la mejora continua estructurada mediante el ciclo PDCA (UNE, 2015).
- **UNE 66178:2004**, sobre sistemas de gestión Lean Manufacturing, que refuerza el uso de herramientas como VSM y el ciclo PDCA como marco de despliegue de iniciativas de mejora, que, aunque no actualizada con referencias a la Industria 4.0 sigue aportando valor para la aplicación del ciclo PDCA (UNE, 2004).

6.1.2 REQUISITOS NECESARIOS PARA LA IMPLANTACIÓN

Antes de aplicar el modelo de diagnóstico propuesto, es necesario establecer una serie de condiciones previas que garanticen la validez del análisis y la utilidad práctica de los resultados. Dado que el objetivo del modelo es evaluar la existencia de sinergias operativas entre la logística inversa, los principios Lean y las tecnologías de la Industria 4.0, su aplicación requiere que el entorno analizado cumpla con ciertos criterios de madurez organizativa y digital mínima. De lo contrario, el análisis podría arrojar resultados inconsistentes o poco extrapolables. Para ello se exponen a continuación los siguientes requisitos:

6.1.2.1 Presencia mínima de prácticas Lean y capacidades digitales

El modelo de diagnóstico está diseñado para detectar sinergias entre sistemas existentes, no para proyectar escenarios ideales en entornos inmaduros. Por ello, se requiere que la organización o el área de estudio cuente ya con elementos activos, aunque sean parciales, tanto en el plano Lean como en el tecnológico. En cuanto a las técnicas Lean se requiere una

implementación demostrable de herramientas como 5S, Poka-Yoke, Value Stream Mapping, o cualquier otro mecanismo de mejora continua que permita observar su interacción con el proceso de logística inversa. Por otro lado, deberá haber un uso real de tecnologías digitales como, por ejemplo, IoT, sistemas cloud, analítica de datos o RPA, que permitan identificar puntos de cruce con principios Lean o etapas logísticas inversas. Si no se dan estos elementos, el modelo pierde su capacidad analítica y se convierte en una evaluación teórica.

6.1.2.2 Selección de un entorno de aplicación representativo

El modelo puede aplicarse tanto a nivel global como en áreas concretas dentro de una organización. No obstante, se recomienda delimitar un área, con suficiente complejidad y trazabilidad para que las interacciones entre Lean, I4.0 y logística inversa puedan analizarse con detalle. Un área demasiado amplia podría dificultar el análisis, mientras que una demasiado limitada podría ofrecer resultados poco representativos. Esta área deberá incluir la mayor cantidad de etapas posibles del ciclo logístico inverso para poder analizar en profundidad cada etapa. Además, se necesita capacidad para acceder a información histórica y operativa del área, para analizar el impacto de la implantación de las técnicas y tecnologías.

6.1.2.3 Participación de actores clave

Finalmente, se recomienda que la aplicación del diagnóstico sea acompañada por un pequeño equipo técnico o de mejora continua con conocimiento del área analizada. Su participación no solo permitirá interpretar correctamente los resultados, sino también identificar posibles sinergias no visibles en los datos estructurados. La interacción directa con operarios, técnicos o responsables logísticos añade una dimensión cualitativa clave para la validación del diagnóstico. Gracias a contar con un equipo informado en estos conceptos no solo se podrá analizar con exactitud las sinergias existentes, sino que podrán identificar posibles sinergias con nuevas técnicas y tecnologías.

6.2 DEFINICIÓN DEL MODELO

El modelo de diagnóstico planteado en este trabajo se concibe como una herramienta de análisis orientada a identificar sinergias entre las prácticas de logística inversa, los principios Lean y las tecnologías de la Industria 4.0. Su diseño parte de la necesidad de contar con un instrumento flexible, aplicable a diferentes tipos de organización, que permita analizar de manera estructurada el grado de interacción entre estos tres ejes estratégicos.

A través de la construcción de matrices de correlación, el modelo propone un conjunto de relaciones posibles entre etapas clave de la logística inversa, herramientas Lean seleccionadas y tecnologías digitales relevantes. Estas matrices se presentan en formato de cuestionario, de modo que puedan ser rellenas por responsables de operaciones, con el objetivo de obtener una visión integral del sistema. Se van a presentar matrices de los dos modelos propuestos en este trabajo, el textil y el de fabricación. Las matrices se muestran a continuación:

6.2.1 CUESTIONARIO PARA EL ANÁLISIS DE SINERGIAS ENTRE LOGÍSTICA INVERSA Y I4.0

Etapa del proceso de textil	Nube	Robots Autónomos	IoT	Big Data	IA	AR & VR	Ciberseguridad	RPA	Gemelo Digital	Control Tower	Blockchain	Fabricación Aditiva	Cobots
Solicitud de devolución y autorización													
Envío del producto devuelto													
Recepción en el centro de distribución													
Clasificación y decisión de recuperación													
Gestión financiera													
Análisis, aprendizaje y mejora continua													

Etapa del proceso de fabricación	Nube	Robots Autónomos	IoT	Big Data	IA	AR & VR	Ciberseguridad	RPA	Gemelo Digital	Control Tower	Blockchain	Fabricación Aditiva	Cobots
Recepción de incidencia y evaluación técnica inicial													
Decisión sobre método de retorno o compensación													
Devolución del producto													
Inspección técnica del producto devuelto													
Comunicación con el proveedor causante													
Reutilización de piezas o reciclaje de material													
Gestión financiera													
Análisis de causa raíz y mejora continua													

Ilustración 8. Cuestionario para el análisis de sinergias entre Logística inversa y I4.0. Fuente: Elaboración propia

6.2.2 CUESTIONARIO PARA EL ANÁLISIS DE SINERGIAS ENTRE LOGÍSTICA INVERSA Y LEAN

Etapa del proceso de textil	VSM	5S	Kanban	Poka-Yoke	Andon	SMED	5 WHys	Heijunka	Jidoka	TPM	JIT
Solicitud de devolución y autorización											
Envío del producto devuelto											
Recepción en el centro de distribución											
Clasificación y decisión de recuperación											
Gestión financiera											
Análisis, aprendizaje y mejora continua											

Etapa del proceso de fabricación	VSM	5S	Kanban	Poka-Yoke	Andon	SMED	5 WHys	Heijunka	Jidoka	TPM	JIT
Recepción de incidencia y evaluación técnica inicial											
Decisión sobre método de retorno o compensación											
Devolución del producto											
Inspección técnica del producto devuelto											
Comunicación con el proveedor causante											
Reutilización de piezas o reciclaje de material											
Gestión financiera											
Análisis de causa raíz y mejora continua											

Ilustración 9. Cuestionario para el análisis de sinergias entre Logística inversa y Lean. Fuente: Elaboración propia

6.2.3 CUESTIONARIO PARA EL ANÁLISIS DE SINERGIAS ENTRE LEAN Y I4.0

FABRICACIÓN		Nube	Robots Autónomos	IoT	Big Data	IA	AR & VR	Ciberseguridad	RPA	Gemelo Digital	Control Tower	Blockchain	Fabricación Aditiva	Cobots
JIT	Pull System													
	SMED													
	Heijunka por tipo de tecnología													
	Kanban													
Jidoka	Andon digital													
	Poka-Yoke en los sistemas informaticos													
	Parada automáticas													
	Diagnóstico automático de errores													
Muda	Gemba digital del flujo completo													
	5 Why's ante errores repetitivos													
	Estándares de trabajo													
	VSM completo													
	Eliminación de pasos manuales													
Kaizen	Revisión continua de procesos no productivos													
	Formación cruzada													
	Ringi													
	5S físico y digital													
	TPM en máquinas de fabricación y sistemas													
	PDCA para mejorar el sistema de devoluciones													

Ilustración 10. Cuestionario para el análisis de sinergias entre I4.0 y Lean en un proceso de fabricación.

Fuente: Elaboración propia

TEXTIL		Nube	Robots Autónomos	IoT	Big Data	IA	AR & VR	Ciberseguridad	RPA	Gemelo Digital	Control Tower	Blockchain	Fabricación Aditiva	Cobots
JIT	Pull System													
	SMED en los centros de distribución													
	Heijunka post rebajas													
	Kanban													
Jidoka	Andon digital													
	Poka-Yoke en los sistemas informaticos													
	Clasificación automática de las devoluciones													
	Transporte autónomo en el CD													
Muda	Parada automáticas													
	Gemba digital del flujo completo													
	5 Why's ante errores repetitivos													
	Estándares de trabajo													
	VSM completo													
Kaizen	Eliminación de pasos manuales													
	Reducción de movimientos innecesarios en los CD													
	Optimización de rutas de recogida													
	Formación cruzada													
	Ringi													
Kaizen	5S físico y digital													
	TPM en las máquinas de los CD y en los sistemas													
	PDCA para mejorar el sistema de devoluciones													

Ilustración 11. Cuestionario para el análisis de sinergias entre I4.0 y Lean en un proceso de textil. Fuente:

Elaboración propia

6.2.4 METODOLOGÍA DE USO DEL MODELO

Cabe destacar que el modelo está concebido como una herramienta abierta. Aunque este trabajo propone una serie de etapas logísticas, tecnologías y prácticas Lean basadas en la literatura y los estudios de caso, la utilidad del modelo se ve potenciada cuando cada empresa adapta las matrices a sus propios procesos, recursos y prioridades.

Por ello, se recomienda que las organizaciones que vayan a utilizar este modelo modifiquen, eliminen o añadan etapas del proceso logístico inverso según su propia estructura operativa. Por ejemplo, algunas empresas pueden tener etapas específicas de reacondicionamiento que no han sido contempladas en el modelo base, o procesos de trazabilidad que merecen un análisis separado. También, que seleccionen las tecnologías y técnicas más relevantes para su nivel de madurez, evitando incluir herramientas que no estén presentes ni previstas a corto plazo o de las que no se disponga conocimiento suficiente para realizar un buen análisis. Esta flexibilidad no resta rigor al diagnóstico, sino que permite convertirlo en una herramienta práctica, adaptada a las particularidades de cada entorno.

Como formato de puntuación, se propone utilizar la escala de puntuación del 0 al 10 utilizada previamente en este trabajo:

Puntuación	Interpretación
0	Sin aplicabilidad. La tecnología no aporta valor funcional ni estratégico a la técnica Lean en el contexto analizado.
1-2	Aplicabilidad marginal. Solo útil en casos muy puntuales o indirectamente, sin impacto significativo.
3-4	Aplicabilidad baja. La tecnología puede apoyar parcialmente la técnica Lean, pero su uso no es prioritario ni generalizado.
5-6	Utilidad moderada. Su implementación contribuye de forma clara y frecuente a mejorar la ejecución de la técnica Lean.
7-8	Alta relevancia. Tiene un papel importante, recurrente y transformador en la técnica evaluada.
9-10	Tecnología clave o crítica. Su presencia es determinante para alcanzar una aplicación óptima y escalable de la técnica Lean.

Tabla 11. Criterio de puntuación propuesto para los cuestionarios. Fuente: Elaboración propia

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 CONCLUSIONES

Este Trabajo Fin de Máster ha tenido como objetivo principal analizar las interconexiones entre la logística inversa, los principios Lean y las tecnologías de la Industria 4.0 para identificar cuáles son las sinergias de mayor impacto en el contexto del e-commerce. A través del estudio de un modelo B2C textil y otro B2B de fabricación aditiva, el análisis no se ha limitado a confirmar la existencia de relaciones, sino a evaluar la fortaleza de estas, determinando qué combinaciones específicas de tecnologías y técnicas ofrecen el mayor potencial para transformar los procesos de retorno en sistemas más eficientes, inteligentes y sostenibles.

La conclusión fundamental del estudio es que las sinergias más fuertes son aquellas que aportan capacidad para gestionar la variabilidad, reducir la incertidumbre y facilitar la toma de decisiones operativas en tiempo real. Estos tres retos, claves en la logística inversa, son donde la combinación de Lean e Industria 4.0 aporta más valor.

Del análisis de correlaciones se han obtenido las siguientes conclusiones sobre las sinergias con más impacto:

- En la relación entre logística inversa e Industria 4.0, se ha identificado que la Inteligencia Artificial es una tecnología clave en ambos modelos, aunque con fines distintos: es crucial para la autorización y clasificación en el alto volumen del textil y para la evaluación técnica y decisión de precisión en el de fabricación. Asimismo, el IIoT y Big Data destacan en el modelo textil para dar visibilidad al flujo, mientras que Cloud y Digital Twin son más relevantes en el de fabricación para la gestión colaborativa de la información técnica. En ambos casos, la tecnología permite que el proceso pase de ser un proceso reactivo a un sistema adaptativo.

- Las sinergias más fuertes entre logística inversa y Lean se encuentran en la aplicación de técnicas de control de errores y estandarización. Poka-Yoke se posiciona como una de las herramientas de mayor impacto en ambos modelos en fases como la autorización, clasificación para minimizar fallos repetitivos. En el modelo textil, debido a la gran cantidad de devoluciones el JIT y Heijunka son claves para estabilizar el flujo de productos devueltos. Por otra parte, en el modelo de fabricación, 5 Whys y Value Stream Mapping muestran una mayor relevancia para analizar flujos de información complejos y tomar decisiones estructuradas, ya que, al tener menos volumen de ventas, la calidad es un punto clave.
- En cuanto al cruce entre Industria 4.0 y Lean, las tecnologías con un impacto más determinante y transversal son el IoT, la Nube y la Inteligencia Artificial. Su alta correlación con la mayoría de los principios Lean se debe a que proporcionan un flujo de datos en tiempo real que es esencial para la ejecución efectiva de técnicas como JIT, Jidoka o Kaizen, aportando el conocimiento necesario para que la mejora continua sea una realidad operativa. Otras tecnologías quedan más apartadas ya que su uso es clave en contextos más específicos. Pero, como se ha mencionado a lo largo del trabajo, la logística inversa necesita un mayor refuerzo en reducir la incertidumbre lo máximo posible y más aún en el contexto del e-commerce.

Finalmente, este trabajo no solo se limita a la identificación de estas sinergias clave, sino que aporta una herramienta práctica a través del modelo de diagnóstico propuesto. Este modelo se plantea como un instrumento para que las organizaciones puedan autoevaluar dónde residen las interacciones más fuertes en sus operaciones. Esta herramienta no solo tiene un fin académico, para el estudio de sinergias, sino que les permite identificar las áreas de mayor potencial y poder así tomar las medidas necesarias para mejorar su cadena logística.

7.2 POSIBLES TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto sienta una base metodológica y analítica que puede ser el punto de partida para futuras investigaciones que profundicen en las conclusiones y modelos presentados. Las líneas de trabajo futuras se pueden orientar en dos direcciones principales, la primera, validar empíricamente el proyecto con el modelo de diagnóstico y la segunda, realizar el análisis con las tecnologías de la Industria 5.0.

En cuanto a la validación empírica con el modelo de diagnóstico, la progresión de este estudio es la aplicación práctica del modelo de diagnóstico desarrollado en el Capítulo 6. Se propone como futuro trabajo la realización de un estudio de campo, contactando con empresas de los sectores analizados, textil y fabricación aditiva, para implementar los cuestionarios propuestos. La recopilación de datos reales y profesionales permitiría contrastar si los patrones de sinergias identificados en este trabajo se reproducen en la práctica industrial. Este enfoque no solo validaría el marco teórico, sino que lo mejoraría con información cuantitativa, permitiendo refinar los criterios de puntuación y ofreciendo a las empresas un análisis comparativo y contextualizado de su nivel de madurez operativa. Además, permitiría analizar en más profundidad los procesos logísticos de estas empresas, que ayudarían enormemente a trabajos futuros.

Por otra parte, la Industria 5.0 está empezando a tomar forma y por ello se propone una extensión del análisis al nuevo paradigma. Una vez que los principios y tecnologías de la Industria 5.0 estén más establecidos, se podría realizar un proyecto similar para analizar las nuevas sinergias que surjan. A diferencia de la Industria 4.0, que se centra en la automatización y la eficiencia de los sistemas ciberfísicos, la Industria 5.0 complementa este enfoque poniendo el foco en la colaboración humano-máquina, la sostenibilidad y la resiliencia de la cadena de suministro. Un futuro estudio podría, por tanto, evaluar cómo las nuevas tecnologías colaborativas y los modelos de economía circular, propios de la Industria 5.0, interactúan con los principios Lean para optimizar la logística inversa, creando sistemas que no solo sean eficientes e inteligentes, sino también resilientes y sostenibles a largo plazo.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

Amin, N. N. H. M., Wahab, A. N. A., Elias, N. F., Jenal, R., Jambak, M. I., & Ashril, N. A. N. M. (2024). A Lean Service Conceptual Model for Digital Transformation in the Competitive Service Industry. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(1). <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2024.0150114>

Attiany, M. S. (2023). *Barriers to adopt industry 4.0 in supply chains using interpretive structural modeling*. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2022.9.013>

Burini, G., Xu, J., Pero, M., & Sandberg, E. (2025). Reverse supply chain configurations in the fashion and textile industry. *Sustainable Production and Consumption*, 56, 504-518. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2025.04.016>

Conexus. (2022). *Conexus Tech Adoption Report. Conexus Indiana*. <https://www.conexusindiana.com/a-glimpse-into-indianas-factory-of-the-future/>

Gajdzik, B., Grabowska, S., & Saniuk, S. (2021). A Theoretical Framework for Industry 4.0 and Its Implementation with Selected Practical Schedules. *Energies*, 14(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/en14040940>

Huang, W.-L., Liao, S.-L., Huang, H.-L., Su, Y.-X., Jerng, J.-S., Lu, C.-Y., Ho, W.-S., & Xu, J.-R. (2024). A case study of lean digital transformation through robotic process automation in healthcare. *Scientific Reports*, 14(1), 14626. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-65715-9>

Jiménez Calzado, M. (2023). *Impacto de las tecnologías de impresión 3D en entornos 4.0 personalizados y su cristalización a través de redes globales de servicios empresa-consumidor y empresa-empresa* (p. 1) [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, UNED.

Universidad Nacional de Educación a Distancia].
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=315697>

Lima, B. F., Neto, J. V., Santos, R. S., & Caiado, R. G. G. (2023). A Socio-Technical Framework for Lean Project Management Implementation towards Sustainable Value in the Digital Transformation Context. *Sustainability*, 15(3), Article 3.
<https://doi.org/10.3390/su15031756>

Marriott, J., Bektaş, T., Leung, E. K. H., & Lyons, A. (2025). The billion-pound question in fashion E-commerce: Investigating the anatomy of returns. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 194, 103904.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103904>

Martins, J. (2024). *Ciclo PDCA: Qué es y cómo aplicarlo paso a paso [2024]* • Asana. Asana. <https://asana.com/es/resources/pdca-cycle>

McKinsey. (2022). *Circular fashion in Europe: Turning waste into value* | McKinsey. <https://www.mckinsey.com/industries/retail/our-insights/scaling-textile-recycling-in-europe-turning-waste-into-value>

Nanayakkara, P. R., Jayalath, M. M., Thibbotuwawa, A., & Perera, H. N. (2022). A circular reverse logistics framework for handling e-commerce returns. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 5, 100080. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100080>

NTT DATA. (2023). *VI Estudio Smart Industry 4.0 2023*. <https://observatorioindustria.org/wp-content/uploads/2023/11/smart-industry-40-2023-v4.pdf>

Rodrigues, S. P., Gomes, L. de C., Peres, F. A. P., Correa, R. G. de F., & Baierle, I. C. (2025). A Framework for Leveraging Digital Technologies in Reverse Logistics Actions: A Systematic Literature Review. *Logistics*, 9(2), Article 2.
<https://doi.org/10.3390/logistics9020054>

Rossi, A. H. G., Marcondes, G. B., Pontes, J., Leitão, P., Treinta, F. T., De Resende, L. M. M., Mosconi, E., & Yoshino, R. T. (2022). Lean Tools in the Context of Industry 4.0: Literature Review, Implementation and Trends. *Sustainability*, *14*(19), 12295. <https://doi.org/10.3390/su141912295>

Serror, M., Hack, S., Henze, M., Schuba, M., & Wehrle, K. (2021). Challenges and Opportunities in Securing the Industrial Internet of Things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *17*(5). <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3023507>

UNE. (2004). *UNE 66178:2004 Sistemas de gestión de la calidad. Guía para la...* <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0032405>

UNE. (2015). *UNE-EN ISO 9001:2015 Sistemas de gestión de la calidad. Requis...* <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0055469>

Windmann, A., Wittenberg, P., Schieseck, M., & Niggemann, O. (2024). *Artificial Intelligence in Industry 4.0: A Review of Integration Challenges for Industrial Systems.* <https://doi.org/10.1109/INDIN58382.2024.10774364>