



Universidad de Valladolid



Escuela de Ingenierías Industriales



TRABAJO FIN DE MASTER

La cadena de suministro. Influencia de la Industria 4.0

Autor:

ELISA GUERRAS PASTOR

Tutor:

ANGEL MANUEL GENTO MUNICIO

SEPTIEMBRE 2024

Índice

Índice	2
Índice de Imágenes	5
Índice de Gráficos	6
Índice de tablas	7
Abreviaturas	8
1. Introducción	10
1.1. <i>Planteamiento del problema</i>	10
1.2. <i>Justificación del estudio</i>	10
1.3. <i>Objetivos del trabajo</i>	10
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	10
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	10
1.4. <i>Metodología e investigación</i>	11
1.5. <i>Estructura del trabajo</i>	12
2. Marco teórico	14
2.1. <i>Concepto de la Industria 4.0</i>	14
2.1.1. <i>Evolución de las revoluciones industriales</i>	14
2.2. <i>Concepto de Industria 4.0</i>	15
2.2.1. <i>Componentes principales de los Sistemas Ciberfísicos</i>	16
2.2.2. <i>Aplicaciones de los CPS</i>	16
3. La cadena de suministro	18
3.1.1. <i>Definición y componentes</i>	18
3.1.2. <i>Procesos y actividades clave</i>	19

Índice

3.2.	<i>Modelos y teorías de la gestión de la cadena de suministro</i>	25
3.2.1.	Modelo SCOR (Supply Chain Operations Reference)	26
3.2.2.	Teoría de las Restricciones (TOC)	32
3.2.3.	Lean Manufacturing	36
3.2.4.	Six Sigma	38
4.	Análisis de la cadena de suministro en el contexto de la industria 4.0	55
4.1.	<i>Transformación digital de la cadena de suministro</i>	55
4.2.	<i>Tecnologías habilitadoras y su integración</i>	55
4.2.1.	Internet de las Cosas (IoT)	57
4.2.2.	Inteligencia Artificial (IA) y Aprendizaje Automático	59
4.2.3.	Big Data	60
4.2.4.	Robótica Avanzada	62
4.2.5.	Blockchain	62
4.2.6.	Realidad Aumentada y Virtual	63
4.2.7.	Computación en la nube (Cloud computing)	64
4.2.8.	Ciberseguridad	66
4.3.	<i>Modelos de madurez digital</i>	68
4.3.1.	Niveles de madurez Digital	69
5.	Beneficios y oportunidades de la industria 4.0 en la cadena de suministro	70
5.1.	<i>Eficiencia Operativa</i>	70
5.2.	<i>Reducción de Costos</i>	70
5.3.	<i>Aumento de la flexibilidad y adaptabilidad</i>	71
5.4.	<i>Sostenibilidad y Responsabilidad social</i>	71
5.5.	<i>Innovación y desarrollo tecnológico</i>	72
6.	Desafíos y barreras para la implementación de la industria 4.0	74

Índice

6.1.	<i>Costos Iniciales y Retorno de Inversión</i>	74
6.2.	<i>Complejidad de la implementación</i>	74
6.3.	<i>Seguridad y Privacidad de los Datos</i>	75
6.4.	<i>Normativa y gestión del impacto ambiental</i>	75
6.5.	<i>Resistencia al Cambio Organizacional</i>	76
7.	Tendencias futuras y oportunidades	77
7.1.	<i>Innovaciones Emergentes</i>	77
7.2.	<i>Futuro de la Automatización</i>	77
7.3.	<i>Perspectivas de la Colaboración Humano-Máquina</i>	78
7.4.	<i>Impacto de la Industria 5.0</i>	78
8.	Conclusiones	81
8.1.	<i>Resumen de hallazgos principales</i>	81
8.2.	<i>Implicaciones para la industria</i>	81
8.3.	<i>Recomendaciones para empresas</i>	82
8.4.	<i>Áreas de investigación futuras</i>	82
9.	Estudio económico	83
9.1.	<i>Fases del proyecto – Coste de tiempo</i>	83
9.2.	<i>Material utilizado – Coste económico</i>	84
	Referencias	86

Índice de Imágenes

Imagen 1. Línea de ensamblaje de Henry Ford siglo XX. Elaboración con IA.	14
Imagen 2. Comparativa de las 4 revoluciones industriales. Elaboración con IA. ...	15
Imagen 3. Infografía de los diferentes usos de los CPS en la actualidad. Elaboración con IA.....	17
Imagen 4. Esquema del mapa de proceso utilizando la metodología SIPOC. (Hernández, 2023)	41
Imagen 5. Esquema de la casa de la calidad. (Administradora, 2017).....	50
Imagen 6. Los 9 pilares de la industria 4.0. Elaboración con IA.....	56

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Comparativa de las ventas reales frente a las previstas. Elaboración propia a través de datos ficticios con Excel.....	20
Gráfico 2. Diagrama de flujo del proceso de selección de un proveedor. Elaboración propia con Miro.....	21
Gráfico 3. Impacto en el crecimiento de EBIT en las empresas que realizan avances tecnológicos con sus proveedores. (Gutierrez et al., 2020)	23
Gráfico 4. Ejemplo de diagrama de Gantt para un proyecto. Elaboración propia con Power BI.....	24
Gráfico 5. Diagrama de flujo de la inserción del modelo SCOR en la empresa ficticia “Pruebas manufacturing”. Creación propia con Miro	30
Gráfico 6. Diagrama de flujo del proceso de la TOC en una empresa. Elaboración propia por Miro.	35
Gráfico 7. Diagrama de Pareto a través de datos ficticios. Elaboración propia con Excel.	43
Gráfico 8. Ejemplo de gráfico de control. Elaboración propia con Excel.	44
Gráfico 9. Diagrama de ishikawa para analizar una entrega incorrecta. (Diadepesca, 2021)	45
Gráfico 10. Diseño de un modelo QFD sobre el diseño de papel. (Administradora, 2017)	51
Gráfico 11. Comparativa de desempeños en la cadena de suministro. Elaboración propia a través de los datos de Saeed y Kersten 2019.	73

Índice de tablas

Tabla 1. Tabla estándar con valores de medida DPMO. Elaboración propia a través de la información de Home (2013)	39
Tabla 2. Coste de tiempo para la realización del TFM. Elaboración propia.	83
Tabla 3. Coste económico del trabajo. Elaboración propia.	84

Abreviaturas

IoT: Internet of things – Internet de las cosas

IA: Artificial intelligence – Inteligencia artificial

CPS: Cyber physical systems – Sistemas ciberfísicos

AR: Augmented Reality – Realidad aumentada

VR: Virtual reality – Realidad virtual

CS: Cadena de suministro

SCOR: Supply chain operations reference – Referencia de operaciones de la cadena de suministro

SCC: Supply chain council – Consejo de la cadena de suministro

TOC: Theory of constraints – Teoría de las restricciones

WIP: work in progress – Trabajo en proceso

CTQ: Critical to quality – Crítico para la calidad

DPMO: Defects per million opportunities – Defecto por millón de oportunidades

DMAIC: Definir, medir, analizar, mejorar y controlar

DMADV: Definir, medir, analizar, diseñar y verificar

SIPOC: suppliers, inputs, process, outputs, customers – Proveedores, insumos, procesos, salidas y clientes

VOC: Voice of customers – Voz del cliente

RCA: Root cause analysis – Análisis de la causa raíz

DOE: Design of Experiments – diseño de experimentos

QFD: Quality Function Deployment – Despliegue de la función de calidad

CMMI: Capability and maturity model integration – Integración de modelos de madurez de capacidades

ERP: Enterprise resources planning – Planificación de los recursos empresariales

CRM: Customer relationship management – Gestión de las relaciones con los clientes

Abreviaturas

AWS: Amazon web service – Servicio web de amazon

IPS: Intrusion prevention system – Sistema de prevención de intrusiones

SIEM: Security information and event management – Sistemas de gestion de eventos.

1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

La cadena de suministro tradicional se enfrenta a numerosos desafíos, entre los que se incluyen la gestión eficiente de inventarios, la previsión precisa de la demanda, la optimización de rutas logísticas y la garantía de trazabilidad y transparencia. La aparición de la Industria 4.0, caracterizada por la convergencia de tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT), la Inteligencia Artificial (IA), el Big Data y los sistemas ciberfísicos (CPS) entre otros, promete revolucionar estos procesos mediante la automatización y la digitalización. (Kagermann, Wahlster, & Helbig, 2013).

1.2. Justificación del estudio

La transformación digital de la cadena de suministro no es solo una tendencia pasajera, sino una necesidad imperiosa para las empresas que buscan mantenerse competitivas en un entorno global cada vez más dinámico y exigente (Christopher, 2016). La adopción de tecnologías de la Industria 4.0 puede proporcionar ventajas competitivas significativas al mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y aumentar la capacidad de respuesta ante las demandas del mercado. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías también presenta desafíos considerables, como la inversión inicial en infraestructura tecnológica, la capacitación del personal y la gestión de la ciberseguridad (Lee, 2002).

1.3. Objetivos del trabajo

1.3.1. Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo es analizar cómo las nuevas tecnologías de la Industria 4.0 están influyendo en la cadena de suministro y cómo las empresas pueden adaptarse para aprovechar estas tecnologías de manera efectiva.

1.3.2. Objetivos específicos

Examinar las Tecnologías Clave

Este objetivo se centra en identificar y analizar las tecnologías más relevantes de la Industria 4.0 que están revolucionando la cadena de suministro. Tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA), el Big Data, la robótica avanzada, la impresión 3D, el blockchain, y la realidad aumentada y virtual, son fundamentales para esta transformación. A través de una revisión exhaustiva de la literatura y estudios de caso, se evaluará cómo cada una de estas tecnologías se integra en los procesos de la cadena de suministro, mejorando la eficiencia, la precisión y la capacidad de respuesta.



Evaluar el Impacto en los Componentes de la Cadena de Suministro

El segundo objetivo es evaluar cómo estas tecnologías clave afectan los diferentes componentes de la cadena de suministro, incluyendo el aprovisionamiento, la producción, la distribución y la logística inversa. Se investigará cómo la digitalización y la automatización están optimizando cada etapa, desde la adquisición de materias primas hasta la entrega del producto final al consumidor y la gestión de devoluciones. Además, se explorará cómo estas mejoras están reduciendo los costos operativos, mejorando la visibilidad y el control en tiempo real, y permitiendo una mayor personalización de los productos.

Explorar los Cambios en la Gestión y Estrategia de la Cadena de Suministro

Este objetivo tiene como propósito investigar cómo la adopción de nuevas tecnologías está transformando la gestión y las estrategias de la cadena de suministro. Se examinará cómo las empresas están adaptando sus modelos de gestión para integrar estas tecnologías, incluyendo la reestructuración de roles y responsabilidades, la capacitación de empleados y la implementación de nuevas prácticas de gestión del cambio. Además, se analizarán las estrategias adoptadas para maximizar los beneficios de estas tecnologías y superar los desafíos asociados con su implementación.

Discutir los Retos y Desafíos Futuros

El quinto objetivo es discutir los retos y desafíos futuros que las empresas pueden enfrentar en la adopción de tecnologías de la Industria 4.0 en sus cadenas de suministro. Se explorarán las barreras más comunes, como los costos de implementación, la integración de sistemas y la capacitación de la fuerza laboral. Asimismo, se analizarán las implicaciones legales y éticas, como la privacidad y la seguridad de los datos. Finalmente, se identificarán las tendencias emergentes y las innovaciones tecnológicas que podrían influir en el futuro de la cadena de suministro, proporcionando una visión a largo plazo para las empresas que buscan mantenerse competitivas en un entorno digital en constante evolución. (Christopher, 2016)

1.4. Metodología e investigación.

Para la elaboración de este trabajo, se ha utilizado una combinación de artículos académicos y páginas web especializadas como fuentes de información. Esta metodología asegura una base sólida y actualizada, que incluye tanto investigaciones científicas como reportes y análisis de la industria.

Las bases de datos académicas consultadas han sido:

- Google scholar
- Scopus
- Science Direct
- IEEE Xplore

Para la búsqueda de información, he utilizado las siguientes palabras clave:

- Internet of Things AND Supply Chain
- IoT AND Logistics
- IoT AND Supply Chain
- Industry 4.0
- Implementation AND process AND supply
- Methodology AND Project management
- Big data AND supply chain
- Blockchain AND supply chain
- Robots AND supply chain
- Artificial intelligence
- New technologies AND supply chain

Para las imágenes, en la medida de lo posible, se ha hecho uso de inteligencia artificial. Dado que el enfoque del trabajo es la influencia de las nuevas tecnologías en la cadena de suministro, me ha parecido apropiado emplear estas mismas tecnologías en la creación del contenido visual. Las nuevas tecnologías no solo mejoran la industria, sino que también impactan positivamente en la vida cotidiana de las personas, facilitando y enriqueciendo diversas actividades, incluyendo la investigación académica.

Además, la información ha sido complementada con gráficos y tablas elaboradas por mí misma utilizando diferentes programas informáticos como Excel, Miro y Power BI, además se han incluidos gráficos provenientes de diferentes fuentes bibliográficas de interés. Estas visualizaciones han sido seleccionadas para ilustrar conceptos clave y proporcionar datos empíricos que respalden los argumentos presentados. Asimismo, algunas de estas visualizaciones son de creación propia, elaboradas para sintetizar y presentar de manera clara los resultados de la investigación.

Este enfoque metodológico refleja una combinación innovadora de fuentes tradicionales y tecnologías emergentes, alineándose con el tema central del trabajo y subrayando el impacto transformador de las nuevas tecnologías en la cadena de suministro y en la vida cotidiana.

1.5. Estructura del trabajo

El trabajo se estructura en varias secciones clave para proporcionar una visión integral y detallada del tema:

1. **Introducción:** Se presenta el planteamiento del problema, la justificación del estudio y los objetivos generales y específicos. Además, se describe la metodología utilizada en la investigación, proporcionando el marco conceptual que guía el desarrollo del trabajo.
2. **Marco Teórico:** Ofrece una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre la Industria 4.0, incluyendo su evolución histórica y los conceptos clave



relacionados con los sistemas ciberfísicos (CPS). Se profundiza en los componentes principales y sus aplicaciones en el entorno industrial.

3. **La cadena de suministro:** Analizaremos la cadena de suministro (CS) desde sus fundamentos, definiendo sus componentes, procesos y actividades clave. Examinaremos los modelos y teorías predominantes en la cadena de suministro, como del modelo SCOR, la teoría de las restricciones (TOC) lean manufacturing y Six Sigma.
4. **Análisis de la cadena de suministro en el contexto de la Industria 4.0:** Nos centraremos en la transformación digital de la cadena de suministro y la integración de tecnologías habilitadoras como el internet de las cosas (IoT), inteligencia artificial (IA) etc. Adicionalmente describiremos los modelos de madurez digital en los cuales pueden situarse las empresas.
5. **Beneficios y Oportunidades de la Industria 4.0 en la Cadena de Suministro:** Discutiremos los beneficios que la Industria 4.0 aporta a la cadena de suministro.
6. **Desafíos y Barreras para la Implementación de la Industria 4.0:** Abordaremos los principales desafíos y barreras a las que se enfrentan las organizaciones al implementar tecnologías de la industria 4.0.
7. **Tendencias futuras y oportunidades:** Exploraremos las tendencias emergentes y futuras en la automatización y colaboración humano-maquina, además de introducir el impacto potencias de la Industria 5.0 en la CS.
8. **Conclusiones:** Se resumirán los hallazgos principales del estudio.
9. **Estudio económico:** finalmente incluiremos un estudio donde se detallan las fases del proyecto en términos de costos de tiempos y recursos materiales utilizados, así como su coste económico.

2. Marco teórico

2.1. Concepto de la Industria 4.0

2.1.1. Evolución de las revoluciones industriales

La historia de las revoluciones industriales abarca varios siglos y ha sido una serie de transformaciones profundas en la manera en que las sociedades producen y consumen bienes y servicios.

Primera Revolución Industrial: Comenzó a finales del siglo XVIII, marcando el inicio de la mecanización con la introducción de máquinas a vapor y la producción textil en Inglaterra. Este período vio una transición desde las economías agrarias y artesanales hacia economías industriales y urbanizadas.

Segunda Revolución Industrial: A finales del siglo XIX y principios del XX, se caracterizó por la electrificación, la producción en masa y la adopción de nuevas fuentes de energía como el petróleo y la electricidad. Henry Ford popularizó la línea de ensamblaje, lo que permitió la producción en masa de automóviles y otros bienes de consumo.

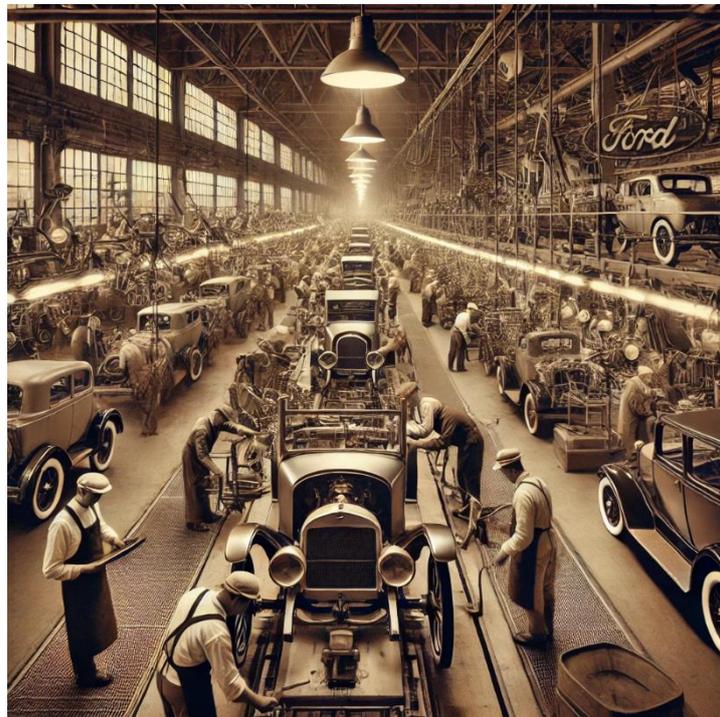


Imagen 1. Línea de ensamblaje de Henry Ford siglo XX. Elaboración con IA.



Tercera Revolución Industrial: Iniciada a mediados del siglo XX, introdujo la automatización y la digitalización. La invención del transistor, seguido por el desarrollo de los semiconductores, los computadores y posteriormente Internet, transformó radicalmente las capacidades de procesamiento de información y comunicación.

Cuarta Revolución Industrial: O Industria 4.0, se distingue por la integración de tecnologías digitales y físicas. La conectividad en tiempo real a través del Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA), la robótica avanzada, el Big Data y el blockchain son algunas de las tecnologías que están reconfigurando las industrias. (Tools, 2018)

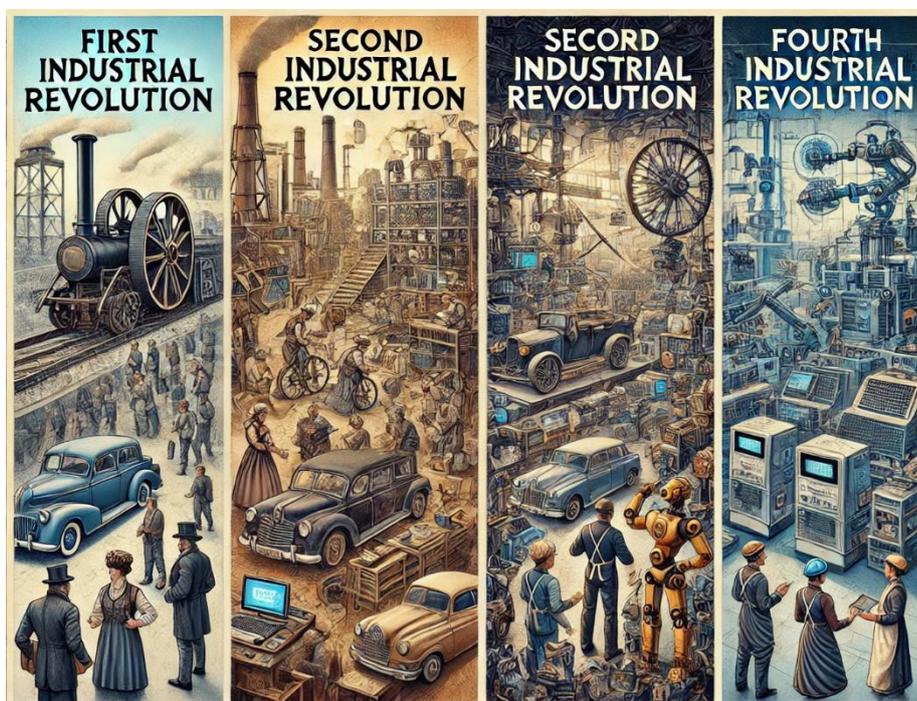


Imagen 2. Comparativa de las 4 revoluciones industriales.
Elaboración con IA.

2.2. Concepto de Industria 4.0

Este término fue acuñado por el gobierno alemán en 2011 para describir una estrategia de alta tecnología destinada a promover la informatización de la manufactura. A diferencia de las revoluciones industriales anteriores, que se caracterizaron por la mecanización, la electrificación y la automatización, la Industria 4.0 se basa en la integración de tecnologías digitales avanzadas en los procesos de producción y la creación de sistemas ciberfísicos. (Cyber-Physical Systems, CPS)

Los CPS combinan elementos físicos (hardware) y computacionales (software) para crear sistemas más inteligentes y eficientes. En estos sistemas, los componentes físicos (como máquinas y dispositivos) están conectados y controlados por sistemas de computación (algoritmos y programas). Esto permite que los CPS monitoreen y controlen los procesos físicos de manera más efectiva. (Lee, J., 2015).

2.2.1. Componentes principales de los Sistemas Ciberfísicos

- **Sensores y Actuadores**

Sensores: Recogen datos del entorno físico, como la temperatura o la presión.

Actuadores: Realizan acciones físicas, como mover una pieza de una máquina o ajustar una válvula, en respuesta a las instrucciones del sistema computacional.

- **Sistemas Computacionales**

Incluyen computadoras y controladores que procesan los datos de los sensores, toman decisiones y envían instrucciones a los actuadores.

- **Redes de Comunicación**

Permiten la transferencia de datos entre sensores, sistemas computacionales y actuadores, asegurando que todos los componentes estén conectados y puedan comunicarse.

- **Modelos de Control y Software**

El software procesa los datos, toma decisiones y genera instrucciones para los actuadores, utilizando algoritmos y técnicas avanzadas.

Imagen sugerida: Un gráfico que detalle los componentes principales de un CPS, mostrando cómo interactúan sensores, sistemas computacionales, actuadores y redes de comunicación. (Brettel, 2014).

2.2.2. Aplicaciones de los CPS

Los sistemas ciberfísicos se utilizan en muchas industrias debido a su capacidad para mejorar la eficiencia y precisión de los procesos. Algunas aplicaciones comunes incluyen:

- En las **fábricas**, los CPS monitorizan y controlan los procesos de producción en tiempo real, mejorando la eficiencia y reduciendo errores.
- En **transporte y logística**, gestionan el tráfico, optimizan rutas y mejoran la seguridad en el transporte. También monitorizan y controlan la cadena de suministro en tiempo real.



- En **salud y medicina** los CPS, desarrollan dispositivos médicos avanzados, como marcapasos inteligentes y sistemas de monitorización de pacientes.
- En **relación con la energía**, los CPS gestionan redes eléctricas inteligentes, optimizan el consumo de energía y controlan infraestructuras críticas.
- En los **vehículos autónomos**, los CPS permiten que los vehículos perciban el entorno, tomen decisiones de conducción y controlen el vehículo.

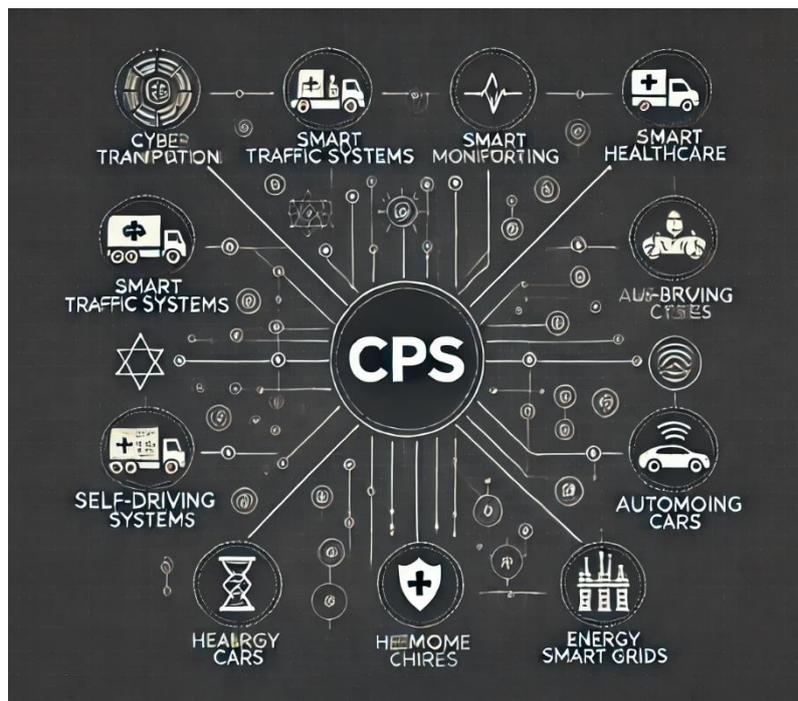


Imagen 3. Infografía de los diferentes usos de los CPS en la actualidad. Elaboración con IA

Los CPS ofrecen numerosas ventajas, entre las que se destacan la mejora de la eficiencia operativa al permitir el monitoreo y control en tiempo real de los procesos, lo que resulta en una reducción de costos y tiempos. Además, aumentan la precisión de las operaciones, reduciendo errores y mejorando la calidad del producto. Los CPS también proporcionan una mayor flexibilidad y capacidad de adaptación a cambios en las condiciones operativas y demandas del mercado, permitiendo ajustes rápidos en los procesos. Finalmente, facilitan la innovación al permitir el desarrollo de nuevas aplicaciones y servicios, impulsando la competitividad de las empresas. (Lee, J., 2015).

3. La cadena de suministro

3.1.1. Definición y componentes

La cadena de suministro se define como el conjunto de procesos involucrados en la producción y distribución de un producto, desde la adquisición de materias primas hasta la entrega del producto final al consumidor. Los componentes principales de la cadena de suministro incluyen proveedores, fabricantes, distribuidores, minoristas y clientes, pero también se extienden a otros actores y procesos críticos que garantizan su eficacia y eficiencia. (Mentzer et al, 2021)

Los principales componentes de la cadena de suministro son:

Proveedores

Los proveedores son entidades que suministran las materias primas, componentes y otros insumos necesarios para la producción. La gestión eficaz de los proveedores es crucial para asegurar la calidad, la continuidad del suministro y la eficiencia de costos.

Fabricantes

Los fabricantes transforman las materias primas y componentes en productos terminados. Este proceso incluye varias etapas como el diseño, la ingeniería, la producción, el ensamblaje y el control de calidad.

Distribuidores

Los distribuidores son responsables de mover los productos terminados desde los fabricantes hasta los puntos de venta o directamente a los consumidores. Gestionan el almacenamiento, el transporte y la logística.

Minoristas

Los minoristas venden los productos terminados a los consumidores finales a través de tiendas físicas o plataformas en línea. La relación con los clientes y la gestión del inventario son aspectos críticos en esta etapa.

Clientes

Los clientes son los usuarios finales de los productos. La satisfacción del cliente depende de la calidad del producto, la puntualidad en la entrega y el servicio postventa.



3.1.2. Procesos y actividades clave

La gestión eficaz de la cadena de suministro se basa en la coordinación y optimización de varios procesos y actividades clave. Estos procesos son fundamentales para garantizar que los productos lleguen al mercado de manera oportuna, eficiente y a un costo competitivo. A continuación, se describen en detalle estos procesos y actividades.

1. Planificación

La planificación es el primer y más crucial paso en la cadena de suministro. Implica prever la demanda futura y planificar la producción, el inventario y la logística para satisfacer esa demanda. Las empresas utilizan modelos matemáticos, técnicas de pronóstico y análisis de datos para predecir las necesidades del mercado y ajustar sus operaciones en consecuencia (Chopra & Meindl, 2016).

Pronóstico de la Demanda: Uso de modelos predictivos y análisis de datos históricos para estimar la demanda futura de productos. Esto incluye la consideración de factores estacionales, tendencias del mercado y comportamiento del consumidor.

Planificación de Producción: Decisiones sobre qué productos fabricar, en qué cantidades y en qué momento. La planificación de la producción debe alinearse con la demanda prevista para evitar tanto el exceso de inventario como la escasez de productos.

Gestión de Inventarios: Mantenimiento de niveles óptimos de inventario para satisfacer la demanda sin incurrir en costos excesivos de almacenamiento. Esto incluye la determinación de puntos de reorden y la gestión del stock de seguridad.

El gráfico 1, muestra un ejemplo ficticio de la evolución de las ventas reales y las previsiones (*forecast*) de demanda a lo largo de un año (2023). Las ventas reales se indican en color naranja a través de una línea uniforme, la estimación de ventas, se indica con una línea naranja discontinua.

En el eje X, encontramos la fecha, donde se muestran los meses estudiados durante el año 2023 y en el eje Y, se encuentran las cifras de ventas.

En este caso expuesto, se puede observar que las previsiones de la demanda mas o menos coinciden con la venta real, lo que asegura que se mantenga un stock de inventario adecuado.

El uso de gráficos de comparación entre ventas reales y previstas es una herramienta poderosa para la gestión de la demanda en la cadena de suministro. Permite a las empresas visualizar las discrepancias y ajustar sus estrategias de manera proactiva. Sin embargo, la efectividad de estos modelos depende en gran medida de la calidad de los datos, la robustez de los sistemas tecnológicos y la capacidad de la empresa para adaptarse a cambios inesperados en el mercado.

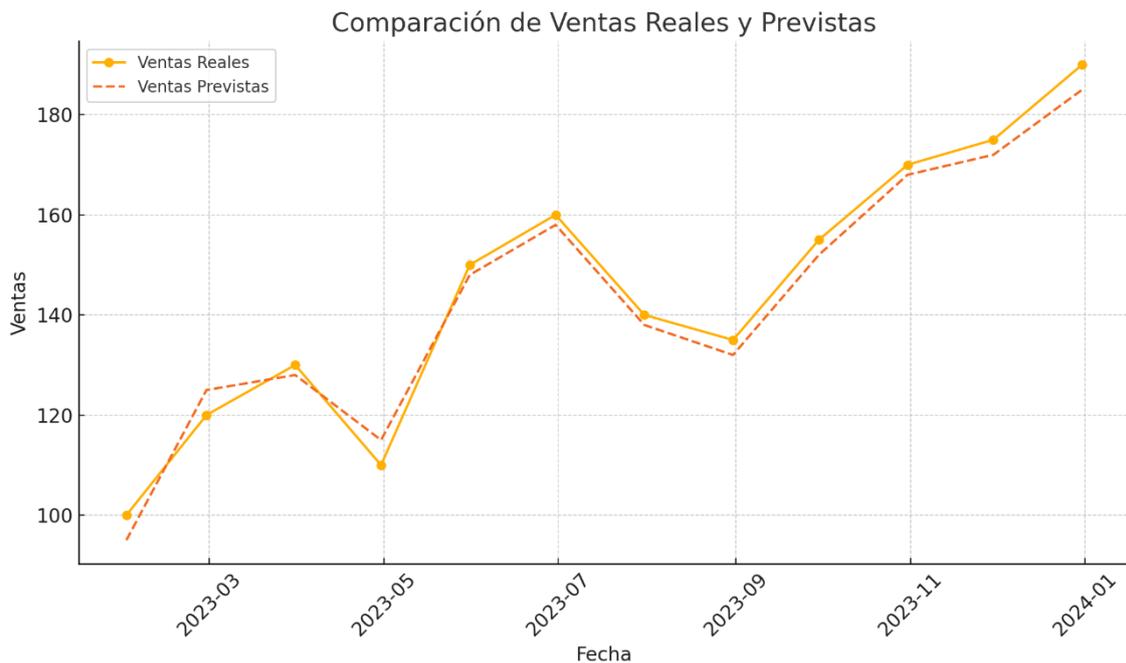


Gráfico 1. Comparativa de las ventas reales frente a las previstas. Elaboración propia a través de datos ficticios con Excel.

2. Abastecimiento

El abastecimiento implica la selección de proveedores y la compra de materias primas y componentes necesarios para la producción. Es crucial establecer relaciones sólidas con los proveedores para asegurar la calidad, la continuidad del suministro y la eficiencia de costos (Monczka et al., 2016).

Selección de Proveedores: Evaluación de proveedores potenciales en base a criterios de calidad, costo, capacidad de entrega y confiabilidad. La selección adecuada de proveedores es esencial para asegurar una cadena de suministro robusta y eficiente.

Negociación de Contratos: Establecimiento de acuerdos que especifican los términos de entrega, precios y condiciones de pago. Las negociaciones deben buscar un equilibrio entre costo y calidad, así como condiciones favorables de entrega y pago.

Gestión de Relaciones con Proveedores: Estrategias para mantener y mejorar las relaciones con los proveedores, incluyendo evaluaciones periódicas de desempeño y colaboraciones para mejorar la calidad y la eficiencia.



En el gráfico 2, se muestra un ejemplo de un diagrama de flujo donde se ilustra de manera clara cada paso del proceso de selección de un proveedor, desde la identificación de necesidades hasta la contratación y evaluación del desempeño del proveedor.

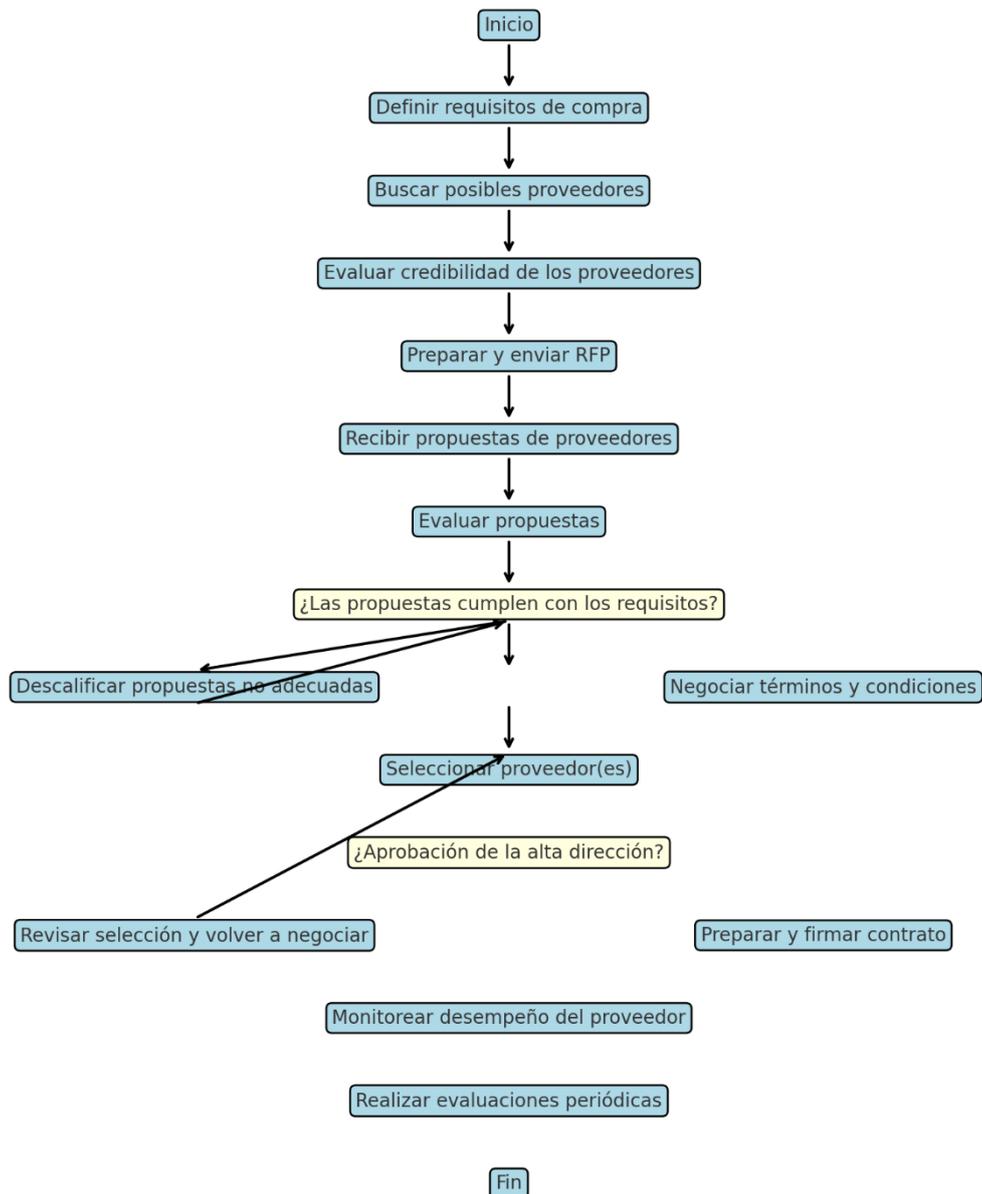


Gráfico 2. Diagrama de flujo del proceso de selección de un proveedor.
Elaboración propia con Miro.

El proceso de selección de proveedores es fundamental para cualquier empresa que desee asegurar la calidad, eficiencia y competitividad de sus operaciones. Elegir al proveedor adecuado implica evaluar múltiples factores como la calidad del producto o servicio, la puntualidad en las entregas, los costos y la capacidad de respuesta ante imprevistos. Este proceso riguroso asegura que la empresa colabore con socios confiables y competentes, lo cual es esencial para mantener altos estándares y cumplir con las expectativas de los clientes

Sin embargo, la relación con los proveedores no debe terminar una vez completada la selección. Es igualmente crucial cultivar y mantener relaciones sólidas y mutuamente beneficiosas con ellos. Las relaciones win-win¹, donde ambas partes ganan, son el pilar de una colaboración exitosa a largo plazo. Para lograr esto, se deben implementar procesos que fomenten la cooperación, la transparencia y la mejora continua. (Gutierrez et al., 2020)

En el gráfico 3, obtenido de un análisis de la empresa McKinsey, se puede observar la importancia de la colaboración estratégica y continua con los proveedores. Las empresas que desarrollan relaciones de innovación regulares con sus proveedores no solo mejoran significativamente sus métricas financieras, sino que también logran ventajas competitivas en términos de costos operativos y crecimiento de ingresos. Esto subraya la necesidad de invertir en procesos y relaciones que fomenten la innovación conjunta y el desarrollo continuo con los proveedores.

¹ . Se trata de un término de gran difusión en el ámbito de la negociación. Predisposición la cual deben reunir las partes involucradas para llegar a un acuerdo y conseguir un beneficio mutuo.

Este término puede extenderse más allá del ámbito de la negociación y aplicarse al trabajo en equipo.

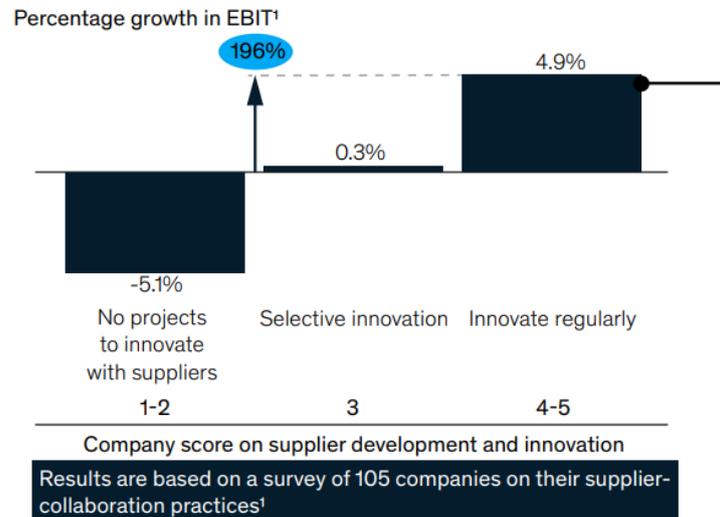


Gráfico 3. Impacto en el crecimiento de EBIT en las empresas que realizan avances tecnológicos con sus proveedores. (Gutierrez et al., 2020)

3. Producción

La producción es el proceso de transformar las materias primas en productos terminados. Este proceso puede incluir varias etapas, como el diseño, la fabricación, el ensamblaje y el control de calidad. La eficiencia en la producción es clave para mantener bajos los costos y altos los niveles de calidad (Stevenson, 2018).

Fabricación: Procesos industriales para la creación de componentes y productos. La fabricación puede involucrar técnicas de producción en masa, producción ajustada (lean manufacturing²) y fabricación flexible.

Ensamblaje: Unificación de componentes en productos terminados. Este proceso debe ser coordinado cuidadosamente para asegurar que los productos cumplan con las especificaciones de calidad y se entreguen a tiempo.

². Lean manufacturing: Modelo de gestión de origen japonés, enfocado en minimizar las pérdidas en los procesos de manufactura.

Control de Calidad: Inspección y pruebas para asegurar que los productos cumplan con las especificaciones y estándares de calidad. El control de calidad es esencial para mantener la satisfacción del cliente y minimizar los costos asociados a defectos y devoluciones.

En el gráfico 4, se muestra un diagrama de Gantt. Se trata de una herramienta de gestión de producciones y proyectos, fue desarrollado por Henry L. Gantt en la década de 1910 y se basa en la utilización de barras horizontales para representar la duración de cada tarea en el proyecto, permitiendo la visualización clara de las actividades programadas a lo largo del tiempo.

En este contexto, el diagrama de Gantt es especialmente útil para la gestión de la cadena de suministro y la producción, ya que asegura la planificación, visualización y monitoreo correcto de todas las etapas involucradas.

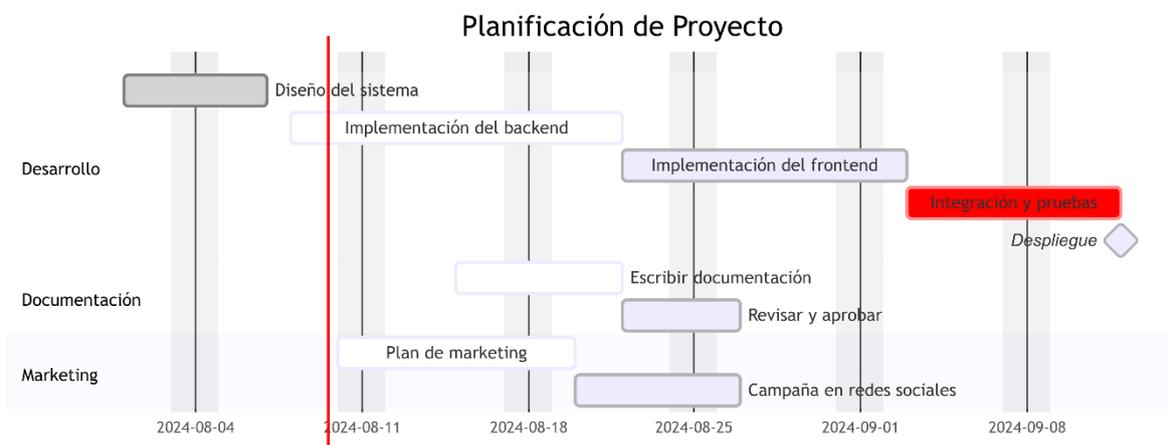


Gráfico 4. Ejemplo de diagrama de Gantt para un proyecto. Elaboración propia con Power BI.

4. Logística

La logística abarca el almacenamiento, el manejo y el transporte de productos desde los puntos de origen hasta los puntos de consumo. Incluye la gestión de almacenes, el manejo de inventarios y la planificación de rutas de transporte.

Almacenamiento: Gestión de inventarios en almacenes, incluyendo técnicas de organización y control de stocks. La eficiencia en el almacenamiento reduce los costos de inventario y mejora la rapidez de la entrega.

Transporte: Movilización de productos mediante diferentes modos de transporte (camión, tren, barco, avión). La elección del modo de transporte debe equilibrar el costo, el tiempo de entrega y la fiabilidad.



Planificación de Rutas: Optimización de rutas de transporte para reducir costos y tiempos de entrega. Esto puede implicar el uso de software de planificación de rutas que considere factores como el tráfico, las condiciones meteorológicas y la disponibilidad de recursos. (Coyle et al., 2016).

5. Gestión de la Demanda

La gestión de la demanda implica el monitoreo continuo y la respuesta a las fluctuaciones en la demanda del mercado. Las empresas deben ser ágiles y adaptativas para ajustar sus operaciones y satisfacer las necesidades del cliente (Slack, Chambers, & Johnston, 2010).

Monitoreo del Mercado: Seguimiento de las tendencias del mercado y las preferencias del consumidor mediante el análisis de datos de ventas, estudios de mercado y feedback de clientes.

Ajuste de Operaciones: Modificación de los planes de producción y logística en respuesta a los cambios en la demanda. Esto puede incluir la adaptación de los niveles de producción, el ajuste de las rutas de transporte y la reconfiguración de los almacenes.

Satisfacción del Cliente: Estrategias para asegurar la entrega oportuna y la calidad de los productos. La satisfacción del cliente es un indicador clave de rendimiento que influye directamente en la reputación y la competitividad de la empresa.

3.2. Modelos y teorías de la gestión de la cadena de suministro

La gestión de la cadena de suministro es un campo complejo que se beneficia de diversos modelos y teorías que ayudan a mejorar la eficiencia y eficacia de las operaciones. A continuación, se presentan los modelos y teorías más destacados y su relevancia en el contexto de la Industria 4.0.

3.2.1. Modelo SCOR (Supply Chain Operations Reference)

Definición y Componentes

El modelo SCOR desarrollado por el Supply Chain Council³, es un marco de referencia para la gestión de la cadena de suministro que abarca cinco áreas principales: *planificación, aprovisionamiento, fabricación, entrega y retorno*. Este modelo proporciona una estructura detallada para analizar y mejorar las operaciones de la cadena de suministro (Supply Chain Council, 2005).

1. **Planificación:** Desarrollar estrategias para equilibrar la oferta y la demanda, previendo necesidades futuras y asignando recursos de manera eficiente. La
2. **Aprovisionamiento:** Procesos para adquirir bienes y servicios de proveedores externos, incluyendo la selección de proveedores y la gestión de contratos.
3. **Fabricación:** Transformación de materias primas en productos terminados, abarcando todas las etapas de producción y control de calidad.
4. **Entrega:** Distribución de productos terminados a los clientes, incluyendo la gestión de transporte y logística.
5. **Devolución:** Procesos para gestionar devoluciones de productos, incluyendo la logística inversa y el manejo de productos defectuosos o no vendidos.

Relevancia del Modelo SCOR

El modelo SCOR proporciona un marco estandarizado para evaluar y mejorar las operaciones de la cadena de suministro. Permite a las empresas identificar áreas de mejora y establecer mejores prácticas que pueden ser adaptadas a sus necesidades específicas. En el contexto de la Industria 4.0, el modelo SCOR se adapta para integrar tecnologías avanzadas, mejorando la visibilidad, la eficiencia y la agilidad de la cadena de suministro.

³. Organización dedicada a la investigación sobre la gestión global y difusión de innovaciones logísticas.



El uso del modelo SCOR en este trabajo de fin de máster es crucial para analizar cómo las nuevas tecnologías de la Industria 4.0 impactan en cada una de las áreas de la cadena de suministro. Por ejemplo, la planificación puede beneficiarse del Big Data y la analítica avanzada para prever la demanda con mayor precisión, mientras que la entrega puede optimizarse mediante IoT y sistemas de gestión de transporte inteligentes.

Implementación del modelo SCOR en una empresa.

Implementar el modelo SCOR en una empresa es un proceso que requiere una planificación cuidadosa, la participación de varios departamentos y un enfoque sistemático para asegurar el éxito. A continuación, se describe una metodología de implementación típica que puede seguirse en una empresa:

1. Evaluación Inicial y Planificación

- **Objetivos y Alcance:** Definir claramente los objetivos de la implementación del SCOR. ¿Qué se espera lograr? Esto podría incluir la mejora en la eficiencia operativa, reducción de costos, mejora en la satisfacción del cliente, etc. También se debe determinar el alcance de la implementación (toda la cadena de suministro o solo ciertas partes).
- **Formación del Equipo:** Crear un equipo multidisciplinario que incluya representantes de todas las áreas involucradas en la cadena de suministro: compras, producción, logística, ventas, TI, etc. Es crucial contar con el patrocinio de la alta dirección.
- **Análisis de la Situación Actual:** Realizar un análisis detallado de la situación actual de la cadena de suministro. Esto incluye mapear los procesos existentes, recopilar datos de rendimiento actuales y entender las fortalezas y debilidades de la cadena de suministro actual.

2. Diseño de la Solución Basada en SCOR

- **Identificación de Procesos SCOR:** Mapear los procesos actuales de la empresa en los procesos estándar de SCOR (Planificación, aprovisionamiento, fabricación, entrega y devolución). Identificar qué procesos necesitan mejoras y cuáles ya están alineados con las mejores prácticas del SCOR.
- **Selección de Métricas:** Elegir las métricas clave de desempeño (KPIs) que serán utilizadas para medir el éxito de la implementación. Las métricas deben alinearse con los objetivos estratégicos de la empresa y permitir un seguimiento eficaz del progreso.

- **Desarrollo de Propuestas de Mejora:** Basado en el análisis, desarrollar propuestas de mejora para cada uno de los procesos que no cumplen con los estándares deseados. Esto puede incluir la reingeniería de procesos, la adopción de nuevas tecnologías, o la formación del personal.

3. Implementación y Ejecución

- **Desarrollo del Plan de Implementación:** Crear un plan detallado que especifique las actividades a realizar, los responsables de cada actividad, los plazos y los recursos necesarios.
- **Capacitación:** Capacitar a todos los involucrados en los nuevos procesos y en el uso del SCOR. Esto asegura que todos comprendan sus roles y cómo su desempeño será medido.
- **Ejecución:** Implementar las mejoras propuestas de manera controlada, siguiendo el plan desarrollado. Es importante gestionar el cambio de manera efectiva para minimizar la resistencia del personal.

4. Monitoreo y Mejora Continua

- **Seguimiento de KPIs:** Monitorear regularmente las métricas clave para asegurarse de que los cambios están produciendo los resultados deseados. Utilizar estas métricas para realizar ajustes si es necesario.
- **Revisión y Ajuste:** Evaluar los resultados de la implementación y realizar ajustes según sea necesario. Esto puede implicar cambios adicionales en los procesos, la adopción de nuevas tecnologías o mejoras en la formación del personal.
- **Mejora Continua:** Establecer un ciclo de mejora continua, donde la empresa constantemente evalúa y mejora sus procesos basados en los resultados y en las nuevas oportunidades que surjan. (Hugos, 2018)

Ejemplo de Implementación del SCOR en una Empresa: Nuevas Soluciones S.A

Nuevas Soluciones S.A es una empresa que produce componentes electrónicos para la industria automotriz. Enfrentaba desafíos en la sincronización de sus operaciones de producción y la gestión de inventarios, lo que provocaba retrasos en las entregas y altos costes de almacenamiento.

1. Evaluación Inicial y Planificación

El objetivo del proyecto es reducir los tiempos de ciclo de producción y mejorar la precisión de los inventarios. Para ello, se escogió a un equipo compuesto por: gerentes de producción, logística, compras e informática.



2. Diseño de la Solución Basada en SCOR

Los procesos clave identificados fueron "Planificar" y "Aprovisionar". La planificación de la demanda y la gestión de inventarios eran los principales focos de mejora. Se seleccionaron KPIs como "Exactitud de la planificación de la demanda", "Nivel de inventario" y "Tiempo de ciclo de producción".

Se propuso mejorar el sistema de planificación de la demanda mediante la implementación de un software avanzado de pronóstico y reorganizar la estrategia de aprovisionamiento para reducir los tiempos de entrega de materiales.

3. Implementación y Ejecución

Se desarrolló un plan para integrar el nuevo sistema de planificación de la demanda con el sistema ERP (Enterprise Resource Planning) existente y para renegociar los contratos con proveedores clave para asegurar plazos de entrega más cortos.

Posteriormente, se realizó una preparación intensiva para el personal de producción y logística para utilizar este nuevo sistema.

La implementación se realizó por fases, comenzando con un piloto en una línea de productos clave antes de expandir a toda la operación.

4. Monitoreo y Mejora Continua

Durante los primeros seis meses, los KPIs fueron monitoreados semanalmente. Se observó una mejora del 15% en la exactitud de la planificación de la demanda y una reducción del 20% en los costos de inventario.

Se realizó una revisión trimestral que identificó la necesidad de mejorar aún más la colaboración con los proveedores, lo que llevó a la implementación de un portal de proveedores para mejorar la visibilidad y la coordinación.

La cadena de suministro

Nuevas Soluciones S.A estableció un comité de mejora continua que se reúne mensualmente para revisar los KPIs y proponer nuevas mejoras basadas en el modelo SCOR.

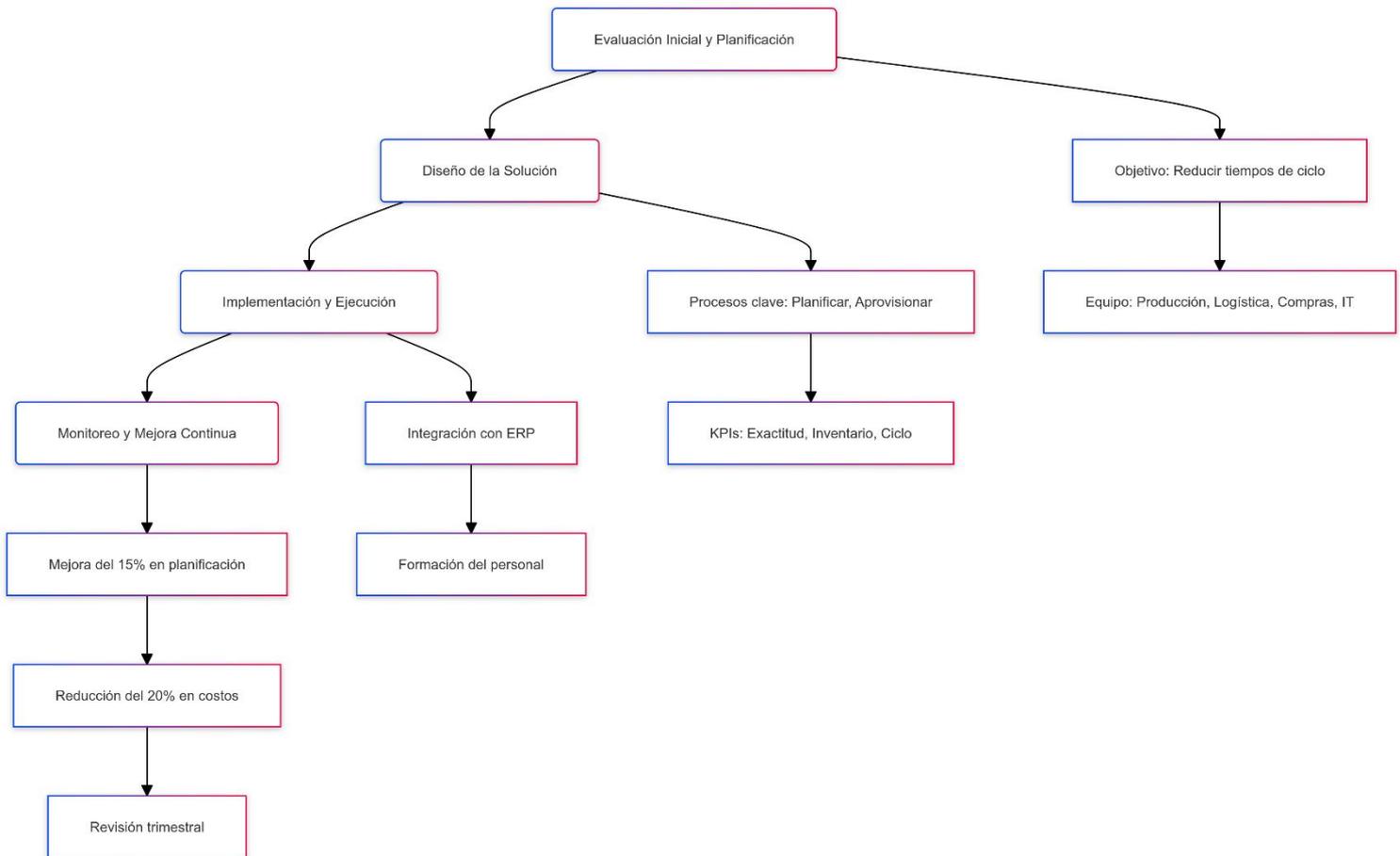


Gráfico 5. Diagrama de flujo de la inserción del modelo SCOR en la empresa ficticia “Pruebas manufacturing”. Creación propia con Miro

En este ejemplo se ilustra cómo una empresa puede utilizar el modelo SCOR para abordar desafíos específicos en su cadena de suministro y lograr mejoras sustanciales en el rendimiento operativo. La clave del éxito está en una implementación bien planificada, la capacitación adecuada del personal y un enfoque en la mejora continua.



Limitaciones y Desafíos

- **Enfoque Limitado a la Cadena de Suministro**

El Modelo SCOR se centra específicamente en las actividades de la cadena de suministro (planificación, aprovisionamiento, fabricación, entrega y devolución). No cubre áreas como el desarrollo de productos, la gestión de la demanda o la atención al cliente, lo que puede limitar su aplicabilidad para empresas que desean una visión más holística de sus operaciones.

- **Complejidad y Costo de Implementación**

Implementar el Modelo SCOR puede ser un proceso complejo y costoso, especialmente para pequeñas y medianas empresas (PYMES). Requiere un conocimiento profundo del modelo, capacitación del personal y, en muchos casos, la necesidad de contratar consultores externos.

- **Estándares Genéricos**

Aunque SCOR proporciona una estructura estándar para analizar las operaciones de la cadena de suministro, su enfoque genérico puede no ser completamente aplicable a todas las industrias. Las empresas con procesos únicos o altamente especializados pueden encontrar que SCOR no aborda adecuadamente sus necesidades específicas.

- **Falta de Adaptabilidad**

El modelo SCOR puede ser percibido como rígido, ya que está diseñado en torno a procesos predefinidos. Esto puede dificultar su adaptación a entornos de negocios dinámicos o en industrias donde la agilidad es un factor crítico de éxito.

- **Enfoque Interno**

SCOR tiende a centrarse en las operaciones internas de la empresa, sin prestar suficiente atención a la colaboración externa con socios, proveedores y clientes. En un entorno donde la colaboración es clave para el éxito de la cadena de suministro, esta limitación puede ser significativa.

- **Actualización y Evolución**

Aunque SCOR es un modelo robusto, su evolución puede ser lenta comparada con los rápidos cambios en tecnología y prácticas de la cadena de suministro. Esto podría hacer que algunas de sus recomendaciones queden obsoletas o no sean suficientes para abordar nuevos desafíos en la industria. (Bolstorff & Rosenbaum, 2011).

3.2.2. Teoría de las Restricciones (TOC)

La Teoría de las Restricciones ó Theory of Constraints en inglés (TOC), desarrollada por Eliyahu M. Goldratt, es una metodología para identificar y gestionar los cuellos de botella en los procesos de la cadena de suministro. Según la TOC, la capacidad de una cadena de suministro está limitada por su eslabón más débil (la restricción), y mejorar esta restricción puede aumentar significativamente el rendimiento general (Goldratt, 1990).

Los puntos clave de esta teoría son:

- **Identificación de Restricciones**

El primer paso en la TOC es identificar la restricción del sistema. Esta restricción puede ser física, como un recurso limitado en una planta de producción, o puede ser de mercado, como una demanda insuficiente de productos. La identificación precisa de la restricción es crucial porque permite a la organización concentrar sus esfuerzos en mejorar la parte más débil de su proceso.

- **Explotación de Restricciones**

Una vez identificada la restricción, el siguiente paso es explotarla, lo que significa maximizar su eficiencia sin incurrir en costos significativos. En este contexto, "explotar" se refiere a asegurarse de que la restricción esté funcionando al máximo de su capacidad en todo momento, ya que cualquier tiempo de inactividad en la restricción afecta directamente el rendimiento del sistema completo.

- **Subordinación de Otros Procesos**

El tercer paso de la TOC implica subordinar todos los demás procesos a la restricción. Esto significa que las operaciones anteriores y posteriores a la restricción deben alinearse para no sobrecargar la restricción o causar desequilibrios en la producción. De esta manera, todo el sistema se ajusta para apoyar la máxima eficiencia de la restricción.

- **Elevación de Restricciones**

Si después de explotar y subordinar la restricción todavía no se alcanza el rendimiento deseado, el siguiente paso es "elevar" la restricción. Esto puede implicar invertir en nuevos recursos, modificar procesos o incluso reconfigurar toda la cadena de valor para eliminar o reducir el impacto de la restricción.

- **Reevaluación Continua**

La TOC es un proceso continuo. Una vez que se ha elevado una restricción, puede aparecer una nueva restricción en otro lugar del sistema. Por lo tanto, es crucial repetir el ciclo de identificación, explotación, subordinación y elevación para mejorar continuamente el rendimiento del sistema. (Gupta & Boyd, 2008)



La TOC ofrece una metodología sistemática para mejorar la eficiencia de la cadena de suministro al enfocarse en las restricciones. En el contexto de la Industria 4.0, la TOC se puede aplicar para identificar y resolver cuellos de botella mediante el uso de tecnologías avanzadas, como la automatización y la inteligencia artificial, que pueden eliminar restricciones de manera más efectiva. (J.F & Schleier, 2010)

Ejemplo de Implementación la TOC en una Empresa: Agustito S.A

La empresa *Agustito S.A.* se dedica a la fabricación de ropa de cama, como sábanas, nórdicos y fundas de almohada. La empresa ha experimentado un crecimiento en la demanda, pero no ha podido satisfacerla completamente debido a cuellos de botella en su proceso de producción. Esto ha provocado retrasos en las entregas y la insatisfacción de los clientes.

Identificación de la Restricción

El equipo directivo de *Agustito S.A.* decide aplicar la Teoría de las Restricciones, para mejorar su productividad. El primer paso es identificar la restricción principal del sistema. Después de analizar todo el proceso de fabricación, descubren que la etapa de corte de tela es el cuello de botella. Esta etapa no solo limita la cantidad de productos terminados que la empresa puede fabricar diariamente, sino que también provoca acumulaciones de trabajo en proceso (WIP) en las etapas anteriores y posteriores.

Explotación de la Restricción

Para maximizar la eficiencia de la estación de corte, *Agustito S.A.* decide implementar una serie de medidas:

- **Capacitación adicional:** Los operarios de la estación de corte reciben capacitación intensiva para mejorar la velocidad y precisión en el corte de telas.
- **Mantenimiento preventivo:** Se establece un programa de mantenimiento preventivo para evitar fallos en las máquinas de corte, minimizando el tiempo de inactividad.
- **Trabajo en turnos:** Se introducen turnos adicionales para que la estación de corte funcione durante más horas al día, aumentando la producción diaria sin incurrir en grandes inversiones.

Subordinación de los Procesos

Con el fin de que los demás procesos no interfieran ni sobrecarguen la estación de corte, *Agustito S.A.* realiza los siguientes ajustes:

- **Ajuste de la producción previa:** Se ajusta el ritmo de la producción en las etapas anteriores al corte para evitar la acumulación excesiva de telas que podrían saturar la estación de corte.
- **Sincronización de procesos:** Las etapas posteriores, como la costura y empaquetado, se reorganizan para que sigan el ritmo de la estación de corte, evitando cuellos de botella secundarios y mejorando el flujo general de producción.

Elevación de la Restricción

A pesar de las mejoras, la demanda sigue creciendo, y la estación de corte, aún es la principal limitante de la producción. La empresa decide elevar la restricción mediante:

- **Inversión en tecnología:** Se adquiere una nueva máquina de corte automatizada que aumenta la capacidad de corte en un 50%, lo que permite procesar más tela en menos tiempo.
- **Reconfiguración del layout⁴:** Se reorganiza el taller de producción para optimizar el flujo de materiales y minimizar el tiempo que las telas pasan en tránsito entre estaciones.

Repetición del Proceso

Con la elevación de la restricción, la capacidad de producción de *Agustito S.A.* aumenta significativamente. Sin embargo, al revisar el proceso, se identifica una nueva restricción en la etapa de costura, que ahora se convierte en el nuevo cuello de botella. El equipo directivo repite el ciclo de TOC, comenzando con la identificación de esta nueva restricción y aplicando las mismas fases de explotación, subordinación y elevación.

Resultados

Gracias a la implementación del sistema TOC, *Agustito S.A.* logra un aumento del 30% en su producción mensual, reduce los tiempos de entrega en un 25% y mejora la satisfacción del cliente. Además, la empresa ahora cuenta con un enfoque estructurado

⁴ .Layout: "Disposición, plano o diseño en la que están distribuidos los elementos de un sistema o proceso".



para abordar continuamente las limitaciones en su proceso, lo que le permite adaptarse rápidamente a los cambios en la demanda y las condiciones del mercado.

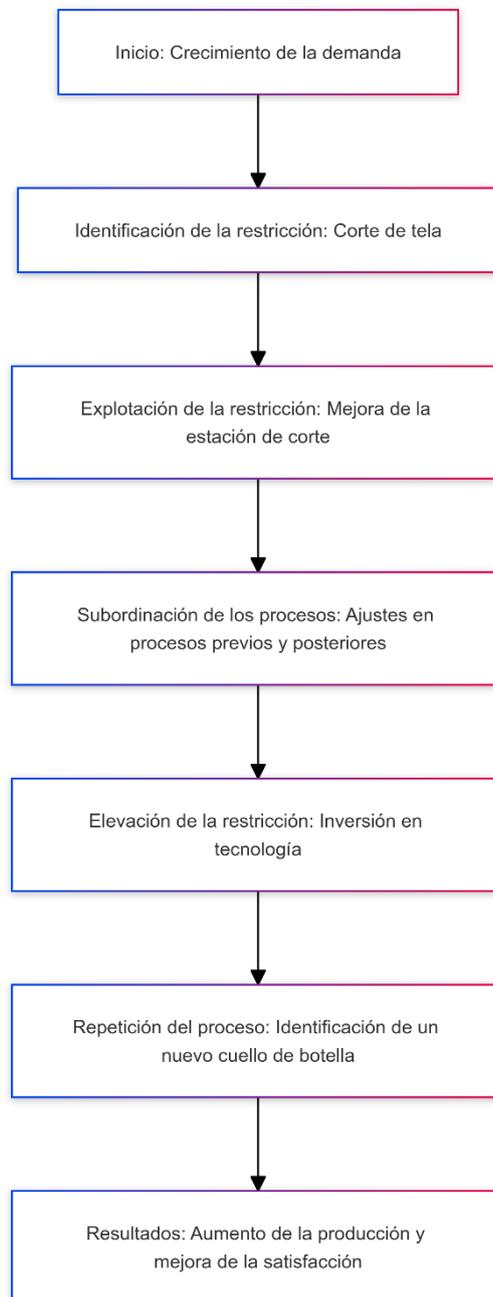


Gráfico 6. Diagrama de flujo del proceso de la TOC en una empresa. Elaboración propia por Miro.

3.2.3. Lean Manufacturing

Lean Manufacturing es un enfoque de gestión de la producción que se originó en la industria automotriz japonesa, particularmente en Toyota, durante la segunda mitad del siglo XX. Este concepto se centra en la eliminación de desperdicios dentro del sistema de producción, lo que se traduce en una mayor eficiencia, reducción de costos y mejora en la calidad de los productos. La filosofía lean, se basa en cinco principios fundamentales: definir el valor desde la perspectiva del cliente, identificar la cadena de valor, crear flujo continuo, implementar un sistema de producción pull, y buscar la perfección. (Tother & Shook, 2003)

A continuación, vamos a definir e incluir un ejemplo de aplicación para cada uno de los cinco principios.

- **Definir el Valor desde la Perspectiva del Cliente**

El primer principio de Lean Manufacturing es entender qué es lo que el cliente valora en un producto o servicio. El valor se define como cualquier actividad o proceso por el cual el cliente está dispuesto a pagar. Este enfoque obliga a las empresas a identificar y concentrarse únicamente en aquellas actividades que realmente agregan valor para el cliente, eliminando todo aquello que no lo hace.

Ejemplo: En la fabricación de un automóvil, el cliente valora aspectos como la calidad del motor, la seguridad, y la eficiencia en el consumo de combustible. Aspectos como exceso de inventario o tiempos de espera prolongados no agregan valor para el cliente y deben ser minimizados o eliminados.

- **Identificación de la Cadena de Valor**

Este principio consiste en mapear todas las actividades y procesos que se requieren para llevar un producto desde la concepción hasta la entrega al cliente. La cadena de valor incluye tanto las actividades que agregan valor como aquellas que no lo hacen. El objetivo es identificar y eliminar los desperdicios, es decir, cualquier actividad que consume recursos, pero no agrega valor al producto final.

Ejemplo: En una línea de producción, las actividades que no agregan valor podrían incluir tiempos de espera entre etapas de producción, transporte innecesario de materiales, o inventario en exceso. Estos deben ser identificados y minimizados.

- **Crear Flujo Continuo**

Una vez que se ha mapeado la cadena de valor y se han eliminado los desperdicios, el siguiente paso es establecer un flujo continuo en los procesos de producción. Esto significa que los productos deben moverse de manera fluida y sin interrupciones a lo largo de la cadena de valor. El flujo continuo ayuda a reducir los tiempos de ciclo y a aumentar la eficiencia.

Ejemplo: En una fábrica de montaje, esto podría implicar reorganizar la disposición de las máquinas y estaciones de trabajo para que los materiales fluyan sin



interrupciones de una etapa a la siguiente, reduciendo tiempos muertos y acumulación de inventarios intermedios.

- **Implementar un Sistema de Producción Pull**

En lugar de producir en grandes lotes basados en pronósticos de demanda (sistema push), Lean Manufacturing aboga por un sistema pull, donde la producción es impulsada por la demanda real del cliente. En este sistema, los productos se fabrican solo cuando se necesitan y en la cantidad requerida. Esto ayuda a evitar la sobreproducción, reduce inventarios y mejora la capacidad de respuesta a las necesidades del cliente.

Ejemplo: En una empresa que utiliza el sistema Kanban⁵, cada vez que se consume un material o se completa una etapa de producción, se genera una orden para producir o reponer solo lo necesario para cubrir esa demanda específica.

- **Buscar la Perfección (Mejora Continua)**

El último principio de Lean Manufacturing es la búsqueda de la perfección a través de la mejora continua. Esto significa que la empresa debe estar en un constante proceso de análisis y optimización de sus procesos. La mejora continua se basa en la idea de que siempre hay oportunidades para reducir el desperdicio, mejorar la calidad y aumentar la eficiencia.

Ejemplo: La implementación de la metodología Kaizen⁶, donde todos los empleados, desde operarios hasta directivos, participan activamente en identificar y sugerir mejoras en los procesos de producción.

Estos cinco principios de Lean Manufacturing son la base para transformar y optimizar los procesos de producción en cualquier organización. Al centrarse en lo que el cliente realmente valora, eliminar desperdicios, crear flujo, implementar sistemas pull, y buscar la mejora continua, las empresas pueden lograr una producción más eficiente y competitiva.

⁵ . “El sistema Kanban es una metodología de gestión visual del flujo de trabajo que se utiliza para controlar el proceso de producción y la gestión de inventarios en tiempo real”

⁶ “Kaizen es una filosofía de trabajo que se centra en la mejora constante de todos los aspectos de una organización desde los procesos de producción hasta las operaciones diarias”.

En el contexto de la Industria 4.0, los principios de Lean se potencian con tecnologías como el IoT y la automatización, que pueden proporcionar datos en tiempo real para identificar y eliminar desperdicios de manera más efectiva.

3.2.4. Six Sigma

Six Sigma es una metodología de gestión enfocada en la mejora de la calidad y la eficiencia de los procesos empresariales mediante la identificación y eliminación de defectos y variabilidad. Desarrollada por Motorola en la década de 1980 y popularizada por empresas como General Electric, Six Sigma utiliza un conjunto de herramientas estadísticas y de gestión para mejorar los procesos de producción y, por ende, la satisfacción del cliente. (Pyzdek & Keller, 2014)

A continuación, vamos a definir los principios fundamentales de esta metodología de gestión.

- **Enfoque en el Cliente**

El cliente es el centro de todo esfuerzo de Six Sigma. La metodología comienza con la comprensión de las necesidades y expectativas del cliente, lo que se traduce en la identificación de las características críticas de calidad (CTQs) que determinan la satisfacción del cliente.

- **Basado en Datos y Hechos**

Six Sigma se basa en la recopilación y análisis de datos para tomar decisiones. El uso de herramientas estadísticas es clave para identificar la variabilidad en los procesos y para determinar las causas raíz de los problemas.

- **Eliminación de Defectos**

El objetivo de Six Sigma es reducir los defectos y la variabilidad en los procesos a un nivel en el que los defectos ocurran con una frecuencia de menos de 3,4 por millón de oportunidades (DPMO), lo que equivale a un nivel de calidad Six Sigma.

El DPMO se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$DPMO = \left(\frac{\text{Número de defectos}}{\text{Número de Unidades} \times \text{Número de oportunidades por Unidad}} \right) \times 1.000.000$$

- **Número de Defectos:** La cantidad total de defectos encontrados en el proceso.
- **Número de Unidades:** La cantidad total de unidades o productos examinados.
- **Número de Oportunidades por Unidad:** Las oportunidades que cada unidad tiene de presentar un defecto. Cada oportunidad representa un atributo o característica que puede ser evaluada.



Supongamos que estamos fabricando una silla, las oportunidades de defecto son cinco (estabilidad en las patas, calidad del asiento, acabado de la pintura, solidez en los tornillos y ergonomía del respaldo).

Consideramos que estamos examinando 10.000 sillas y en total de esas 10.000 sillas hemos encontrado 50 defectos.

Número de Defectos = 50

Número de Unidades = 10,000

Número de Oportunidades por Unidad = 5

$$DPMO = \left(\frac{50}{10.000 \times 5} \right) \times 1.000.000 = 1.000 DPMO$$

Este resultado, nos indica que, en promedio, hay 1.000 defectos por cada millón de oportunidades en el proceso examinado. Esta medida no indica cuántos defectos ocurren cuando consideramos un gran número de oportunidades, lo que te da una visión del nivel de calidad del proceso.

Una vez tenemos los resultados, debemos compararlos con los estándares de calidad del método.

Tabla 1. Tabla estándar con valores de medida DPMO. Elaboración propia a través de la información de Home (2013)

Sigma	DPMO	EFFECTIVIDAD
1	691.462	30,85%
2	308.537	69,15%
3	66.807	93,33%
4	6.210	99,38%
5	233	99,977%
6	3,4	99,99966%

Para que un proceso se considere de alta calidad, generalmente se busca al menos un nivel sigma de 4, sin embargo, las empresas líderes, buscan alcanzar el nivel 6.

En nuestro ejemplo hemos calculado un DPMO de 1.000 por lo que, si utilizamos la tabla 1, podemos observar que estaríamos entre un nivel de sigma 3 y 4, por lo que deberíamos de estándares de calidad.

- **Gestión Proactiva**

En lugar de reaccionar ante los problemas, Six Sigma promueve la gestión proactiva mediante la prevención de defectos y la mejora continua de los procesos.

- **Colaboración y Participación**

La metodología Six Sigma requiere la colaboración de equipos multidisciplinarios y la participación activa de todos los niveles de la organización, desde los operarios hasta la alta dirección.

- **Flexibilidad y Adaptación**

Aunque Six Sigma tiene un enfoque estructurado, es lo suficientemente flexible como para adaptarse a diferentes tipos de procesos y organizaciones. (George, Rowland, Price & Maxey, 2005)

Metodologías de Six Sigma

Existen dos metodologías principales dentro de Six Sigma: DMAIC y DMADV. Ambas se utilizan para diferentes propósitos, pero comparten la misma filosofía de mejora continua y uso de herramientas estadísticas para tomar decisiones basadas en datos.

1. DMAIC: Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar

DMAIC es la metodología más utilizada dentro de Six Sigma y se aplica principalmente a la mejora de procesos existentes. Se compone de cinco fases estructuradas:

- **Definir**

En esta fase, se identifican los problemas del proceso y se definen los objetivos del proyecto. El equipo de mejora determina qué es lo que se necesita mejorar, quiénes son los clientes afectados, y cuáles son las expectativas de calidad. Se crean documentos clave como el proyecto charter, que incluye el alcance, el cronograma, y los recursos necesarios. Se identifican las CTQs anteriormente mencionadas, que son los atributos que el cliente considera más importantes. (Pyzdek & Keller, 2014)



Las herramientas más comunes para recabar y definir este tipo de información son: SIPOC (Suppliers, inputs, process, outputs, customers), VOC (Voz del cliente) y análisis de stakeholders.

SIPOC se trata de un diagrama que ayuda a las organizaciones a comprender y mapear un proceso a nivel alto. Es una herramienta útil en la fase de definición para delinear los componentes clave de un proceso antes de profundizar en los detalles desglosada en 5 elementos principales.

Los proveedores, son entes ya sean internas o externas que proporcionan recursos necesarios para el proceso. Los insumos, son materiales, información o recursos que son introducidos al proceso para producir el resultado deseado. El proceso, es el conjunto de actividades que transforman los insumos en productos o servicios. Las salidas, son los propios productos o servicios resultados del proceso anterior. Finalmente, los clientes con los destinatarios de las salidas.

S	I	P	O	C
Proveedores	Entradas	Proceso	Salidas	Clientes
¿Quién suministra lo que se necesita para ejecutar el proceso?	¿Cuáles son los insumos requeridos?	¿Qué hace el proceso?	¿Cuál es el resultado esperado del proceso?	¿Qué clientes necesitan la salida de este proceso?
Ejemplo:				
Departamento de finanzas de sucursales.	Ordenes de compras. Facturas.	Paso 1 Paso 2 Paso 3	Reportes financieros	Departamento financiero corporativo

Imagen 4. Esquema del mapa de proceso utilizando la metodología SIPOC. (Hernández, 2023)

VOC es una herramienta que se utiliza para capturar las expectativas, preferencias, y aversiones de los clientes con respecto a un producto o servicio. La VOC es crucial para definir las CTQs, que son los atributos que deben cumplirse para satisfacer a los clientes.

Las técnicas comunes para recopilar la Voz del Cliente incluyen:

- **Encuestas y cuestionarios:** Recopilan información directa de los clientes sobre sus necesidades y percepciones.
- **Entrevistas y grupos focales:** Permiten obtener información más profunda y detallada sobre lo que valoran los clientes.
- **Análisis de comentarios y quejas:** Revisa las interacciones pasadas con los clientes para identificar áreas de mejora. (George, 2002)

El **Análisis de Stakeholders** es una herramienta que se utiliza para identificar y evaluar a las partes interesadas en un proyecto o proceso. Los stakeholders son individuos, grupos, u organizaciones que tienen algún tipo de interés en el resultado del proyecto.

El análisis implica:

- **Identificación de Stakeholders:** Listar todos los individuos y grupos que pueden verse afectados por el proyecto.
- **Evaluación de Impacto e Influencia:** Determinar el nivel de interés y la influencia de cada stakeholder en el proyecto.
- **Estrategia de Comunicación:** Desarrollar planes para mantener informados y comprometidos a los stakeholders clave, especialmente aquellos con alta influencia.
- **Medir**

En esta etapa, se recopilan datos actuales del proceso para entender su rendimiento. Se identifican las métricas clave de rendimiento y se miden los niveles actuales de defectos o variabilidad. La medición precisa es crucial para identificar la brecha entre el estado actual y el deseado. También se realiza un análisis de capacidad del proceso para ver si cumple con los estándares requeridos.

Las herramientas más comunes en esta etapa son: Mapas de procesos, análisis de capacidad, diagramas de Pareto y gráficos de control.

Un **mapa de procesos** es un diagrama que muestra todos los pasos o actividades de un proceso, desde el inicio hasta el final. Se utiliza para entender cómo funciona el proceso, identificar dónde pueden ocurrir problemas y ver si hay pasos que se pueden mejorar o eliminar. (Rother & Shook, 2003)

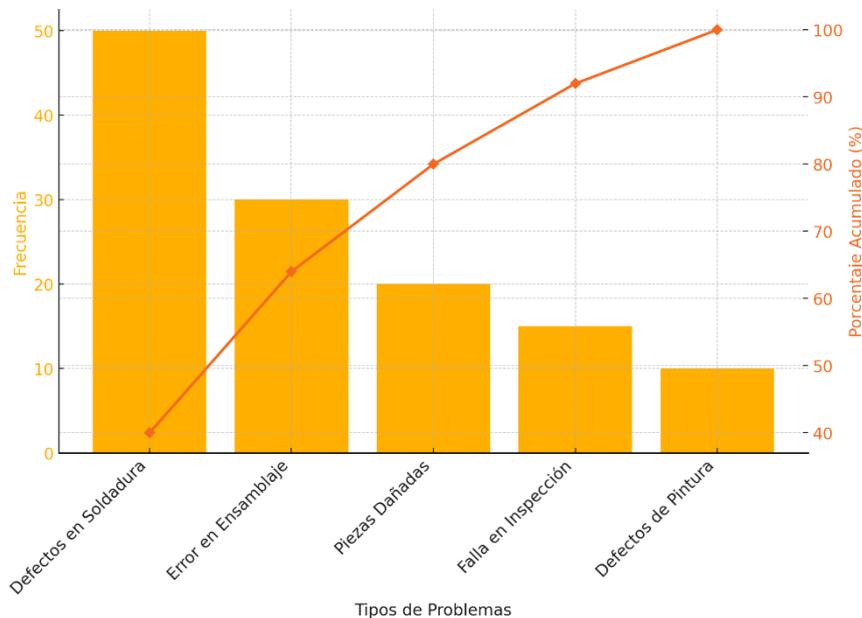
- Ejemplo: Si estás en una panadería, el mapa de procesos podría mostrar desde la compra de ingredientes hasta la entrega del pan al cliente.

El **análisis de capacidad** es una evaluación para ver si un proceso puede producir productos que cumplan con los estándares de calidad de manera consistente. Es como



verificar si una máquina puede hacer piezas dentro de las medidas exactas que se necesitan. Se utiliza para saber si el proceso es confiable y si puede mantener la calidad a lo largo del tiempo, o si necesita ajustes. (Montgomery, 2012)

Un **diagrama de Pareto** es un gráfico que te muestra cuáles son los problemas más importantes en un proceso. Se basa en la idea de que el 80% de los problemas se deben al 20% de las causas, priorizando los problemas a resolver. Ayuda a concentrarse en las pocas cosas que causan la mayoría de los problemas.



**Gráfico 7. Diagrama de Pareto a través de datos ficticios.
Elaboración propia con Excel.**

En el gráfico 8 se puede apreciar un ejemplo de un gráfico de Pareto donde en el eje X, vemos los tipos de problemas identificados y en el eje Y, a la derecha vemos el porcentaje acumulado y a la izquierda la frecuencia de ocurrencia de cada problema.

Si nos guiamos de la teoría de Pareto, en este caso, el 80% de los errores son resultado de: defectos de soldadura, error en el ensamblaje y piezas dañadas. De este modo podemos centrarnos en los problemas más críticos teniendo un impacto significativo en la mejora del proceso.

Un **gráfico de control** es una herramienta que nos ayuda a ver cómo varía un proceso con el tiempo. Es como un termómetro para medir la "salud" de un proceso, indicándote cuándo está funcionando bien y cuándo está ocurriendo algo. Monitorea un proceso y

detecta cualquier desviación o problema antes de que se convierta en un defecto grave. (Rother & Shook, 2003).

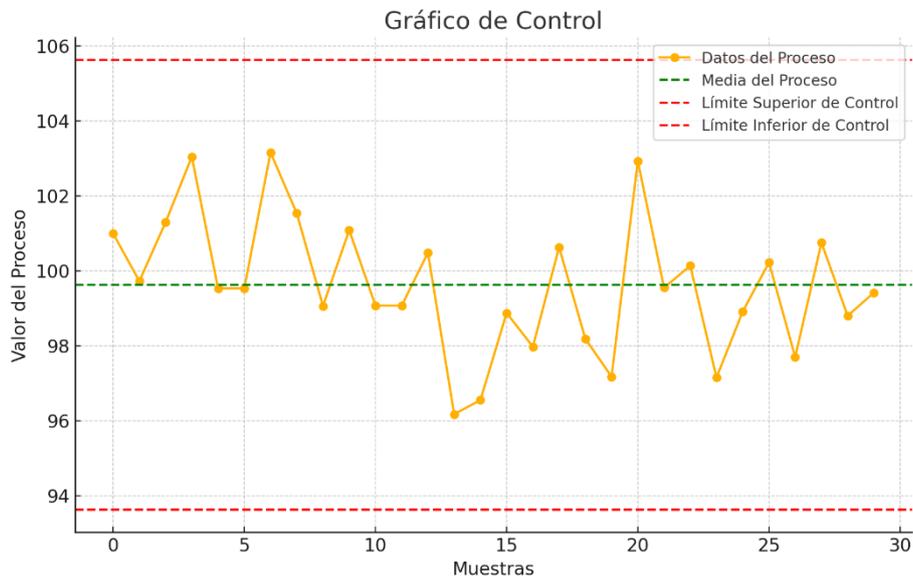


Gráfico 8. Ejemplo de gráfico de control. Elaboración propia con Excel.

En el gráfico 9, podemos observar un ejemplo de un gráfico de control. Los puntos amarillos nos están indicando los valores observados durante el proceso a lo largo del tiempo. La línea verde muestra el promedio del proceso, es decir el valor central en torno al cual deberían oscilar los datos si el proceso está bajo control. Por último, las líneas rojas nos indican los límites de control, si los datos se sitúan por fuera de estas líneas, el proceso no está bajo control.

En este caso, el proceso está bajo control ya que se encuentra dentro de los límites de control, sin embargo, se podrían ajustar un poco más ya que existen muchos picos durante el proceso.

- **Analizar**

Durante la fase de análisis, se examinan los datos recopilados para identificar las causas raíz de los problemas del proceso. El equipo busca patrones o factores específicos que estén contribuyendo a los defectos o variabilidad. Se utilizan técnicas de análisis estadístico para validar las hipótesis sobre las causas raíz.

Las herramientas más comunes para analizar la información: Análisis de Causa Raíz, Diagrama de Ishikawa, Análisis de Regresión y Análisis de Correlación.

El **Análisis de Causa Raíz** o en inglés, Root Cause Analysis (RCA) es un método sistemático para identificar las causas fundamentales de un problema o defecto en un



proceso. En lugar de tratar solo los síntomas del problema, RCA busca identificar y corregir las causas subyacentes para evitar que el problema vuelva a ocurrir.

Para llevar a cabo este método, se debe comenzar identificando el problema o defecto. Se utilizan herramientas como los "5 por qué" (preguntar "por qué" repetidamente hasta llegar a la causa raíz). Una vez identificada la causa raíz, se implementan acciones correctivas para eliminarla. (Rooney & Vanden, 2004)

Diagrama de Ishikawa, también conocido como Diagrama de Espina de Pescado o Diagrama de Causa y Efecto, es una herramienta visual utilizada para identificar, explorar, y visualizar todas las posibles causas de un problema o defecto específico. Su estructura recuerda a la espina de un pez, de ahí su nombre. (Waddell & Island, 2019)

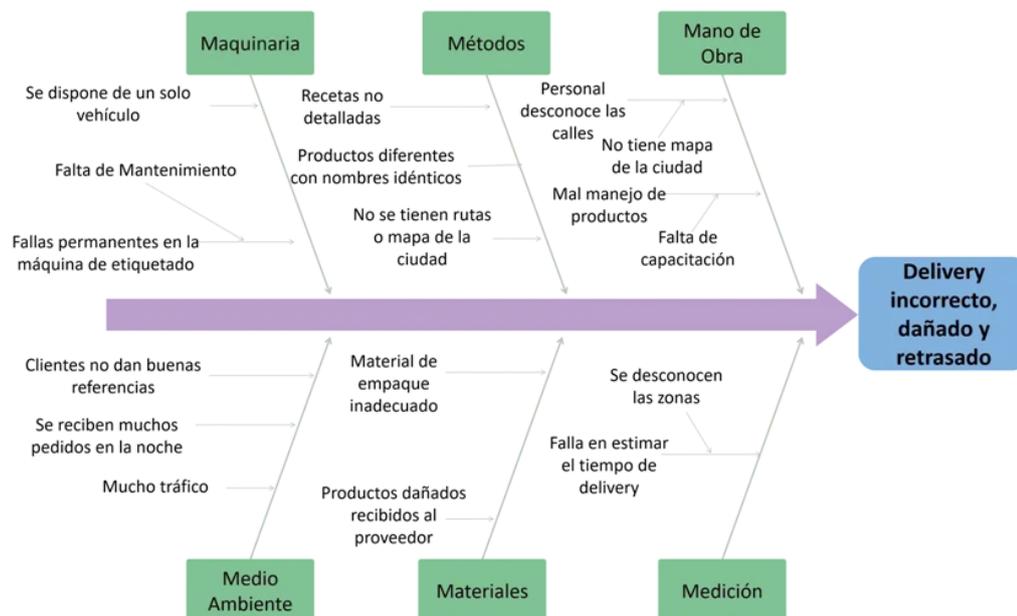


Gráfico 9. Diagrama de ishikawa para analizar una entrega incorrecta. (Diadepesca, 2021)

El problema o efecto se coloca en la "cabeza" del diagrama. Se identifican categorías principales de causas, que se representan como "huesos" que se conectan a la "columna vertebral" del diagrama (generalmente incluyen categorías como maquinaria, métodos, mano de obra, materiales, etc.).

A partir de estas categorías, se identifican subcausas que contribuyen al problema.

Por ejemplo, si una línea de producción está experimentando defectos, un diagrama de Ishikawa podría ayudar a identificar si los defectos están relacionados con la maquinaria, la capacitación del personal, la calidad de los materiales, o el procedimiento de trabajo.

El **Análisis de Regresión** es una técnica estadística utilizada para entender la relación entre una variable dependiente (el resultado que se desea predecir o explicar) y una o más variables independientes (los factores que se cree que influyen en el resultado). Esta herramienta ayuda a identificar cómo cambian los valores de la variable dependiente en respuesta a cambios en las variables independientes.

Se recopilan datos históricos sobre la variable dependiente y las variables independientes. Se construye un modelo matemático que describe la relación entre ellas. El modelo se utiliza para predecir el comportamiento futuro de la variable dependiente o para identificar cuáles variables independientes tienen el mayor impacto.

Este método de análisis puede ser por ejemplo utilizado en un proceso de producción. Se podría utilizar el análisis de regresión para ver cómo la temperatura de operación (variable independiente) afecta la tasa de defectos (variable dependiente).

El **Análisis de Correlación** mide la relación entre dos variables y determina la fuerza y la dirección de su relación. A diferencia del análisis de regresión, que se centra en predecir una variable, el análisis de correlación se utiliza principalmente para entender si y cómo dos variables están relacionadas.

Para realizar este análisis se comienza recopilando datos sobre las dos variables que se desea analizar. Se calcula el coeficiente de correlación, que varía entre -1 y 1, y posteriormente se analizarán los resultados en función a los siguientes márgenes:

- Un valor cercano a 1 indica una fuerte correlación positiva (cuando una variable aumenta, la otra también lo hace).
- Un valor cercano a -1 indica una fuerte correlación negativa (cuando una variable aumenta, la otra disminuye).
- Un valor cercano a 0 indica que no hay correlación significativa.

Este análisis de correlación lo podríamos utilizar por ejemplo para ver la relación entre el tiempo de formación de los empleados y la calidad del producto final. (Moore, MacCabe & Craig, 2017)

- **Mejorar**

En esta fase, se desarrollan e implementan soluciones para eliminar las causas raíz de los problemas identificados. Se prueban y optimizan las soluciones para asegurar que mejoren el rendimiento del proceso sin introducir nuevos problemas. A menudo, se utilizan pruebas piloto antes de implementar las soluciones a gran escala.

Las herramientas más comunes para implementar soluciones son: Diseño de Experimentos, la simulación y el prototipado.

El **Diseño de Experimentos**, en inglés Design of Experiments (DOE) es una metodología estadística utilizada para planificar, realizar y analizar experimentos de



manera eficiente. Su objetivo es identificar las variables que afectan un proceso o producto y determinar cómo estas variables interactúan entre sí para optimizar el resultado. Es especialmente útil en la industria para mejorar procesos, reducir variaciones y maximizar la calidad del producto final. Un enfoque común es el diseño secuencial, donde los experimentos iniciales guían los experimentos posteriores para enfocarse en los factores más significativos. (Lopez-Cano, 2023)

La **simulación** es una técnica que permite modelar un sistema o proceso para estudiar su comportamiento bajo diferentes condiciones sin la necesidad de realizar experimentos físicos. Esto es crucial en la toma de decisiones y en la optimización de procesos complejos, donde realizar pruebas reales sería costoso o arriesgado. Las herramientas de simulación se utilizan en campos como la ingeniería, la logística, y la planificación urbana, permitiendo evaluar escenarios y estrategias antes de su implementación.

El **prototipado** consiste en la creación de modelos físicos o virtuales de un producto para evaluar su diseño, funcionalidad y usabilidad antes de la producción en masa. Este proceso es esencial en el desarrollo de productos innovadores, ya que permite identificar problemas y realizar mejoras antes de la fabricación a gran escala. El prototipado rápido, utilizando técnicas como la impresión 3D, ha revolucionado este campo al reducir significativamente el tiempo y costo de desarrollo. (Safetyculture, 2024)

- **Controlar**

La fase de control se centra en asegurar que las mejoras implementadas se mantengan a largo plazo. Se establecen sistemas de monitoreo y control para seguir el rendimiento del proceso y evitar la recurrencia de los problemas. También se documentan las lecciones aprendidas y se formalizan los procedimientos operativos estándar.

Las herramientas más comunes para llevar un control de los métodos utilizados son: los gráficos de control, los planes de control, las auditorías de procesos y la documentación estándar.

Los **gráficos de control** son herramientas estadísticas utilizadas para monitorear y controlar la calidad de un proceso a lo largo del tiempo. Estos gráficos permiten identificar variaciones en el proceso que pueden ser causadas por factores especiales o comunes, y ayudan a determinar si un proceso está bajo control estadístico. Se utilizan comúnmente en manufactura y otros sectores industriales para asegurar que la producción cumpla con los estándares de calidad. Los tipos más comunes incluyen gráficos X-barra, R, y gráficos de control para atributos como p y np.

Un **plan de control** es un documento que detalla los pasos necesarios para asegurar que un proceso o producto cumple consistentemente con los requisitos de calidad. Incluye información sobre las características críticas de calidad, los métodos de control, las frecuencias de inspección y las acciones correctivas a tomar en caso de

desvíos. Los planes de control son esenciales en la fabricación automotriz y otras industrias donde la consistencia y la calidad son cruciales.

Las **auditorías de procesos** son evaluaciones sistemáticas realizadas para verificar que los procesos se ejecutan conforme a los estándares establecidos y que cumplen con los requisitos de calidad. Estas auditorías pueden ser internas o externas, y su objetivo principal es identificar oportunidades de mejora, asegurar la conformidad y garantizar la eficiencia del proceso. Las auditorías de procesos son fundamentales para mantener la certificación de normas como ISO 9001⁷.

La **documentación estándar** se refiere a la creación y mantenimiento de documentos que establecen procedimientos, políticas y normas que guían las operaciones dentro de una organización. Estos documentos aseguran que todos los procesos se realicen de manera consistente y conforme a los requisitos regulatorios y de calidad. Incluyen manuales de procedimientos, instrucciones de trabajo, registros de calidad, y otros documentos críticos para la conformidad y la mejora continua.

Herramientas Comunes: Gráficos de Control, Planes de Control, Auditorías de Procesos, Documentación Estándar.

2. DMADV: Definir, Medir, Analizar, Diseñar, Verificar

DMADV es una metodología que se aplica principalmente al diseño de nuevos productos o procesos, o cuando un proceso existente necesita ser rediseñado de manera radical. También se conoce como DFSS (Design for Six Sigma).

- **Definir**

Similar a la primera fase de DMAIC, en DMADV se definen los objetivos del proyecto y las necesidades del cliente. Se establece un marco claro para lo que el nuevo diseño debe lograr en términos de calidad y rendimiento.

Al usarse mayoritariamente en productos nuevos, las herramientas más comunes serán: VOC (anteriormente comentada), Benchmarking y estudio de factibilidad.

Benchmarking es una herramienta utilizada por las organizaciones para comparar sus procesos, productos o servicios con los de otras empresas líderes en la industria. El objetivo es identificar las mejores prácticas y mejorar el rendimiento al adoptar

⁷ . “La norma ISO 9001 es una de las normas que fija los requisitos mínimos para un Sistema de gestión de calidad empleada en una organización”. (*ISO 9001: Qué Es y Quién la Certifica - Ferrovial, 2024*)



estrategias y métodos que han demostrado ser exitosos en otros contextos. El benchmarking puede ser interno (comparando diferentes departamentos o unidades dentro de la misma organización) o externo (comparando con competidores directos o empresas de otros sectores). (Bhutta & Huq, 2021)

Un **Estudio de Factibilidad** es un análisis exhaustivo que evalúa la viabilidad técnica, económica, y operativa de un proyecto antes de su implementación. Su objetivo es determinar si un proyecto tiene probabilidades de éxito y si vale la pena invertir recursos en él. Este estudio abarca diferentes aspectos, como análisis de mercado, evaluación técnica, análisis financiero y revisión legal. (Zairi, 2020)

- **Medir**

Aquí se miden las necesidades del cliente y se traducen en especificaciones técnicas. Se determinan las CTQs del nuevo diseño y se identifican los riesgos y restricciones. Se recopilan datos relevantes que puedan influir en el diseño.

Las herramientas más utilizadas en este tipo de mediciones son: Análisis de despliegue de la función de calidad, Análisis de Riesgos, Modelos de Capacidad.

El **Quality Function Deployment** (QFD) o despliegue de la función de calidad, es una metodología estructurada utilizada para traducir las necesidades del cliente (o "la voz del cliente") en requisitos técnicos específicos para un producto o servicio. Esta técnica es comúnmente utilizada en el desarrollo de nuevos productos y en la mejora de los existentes. El proceso QFD a menudo utiliza una herramienta conocida como "Casa de la Calidad" para relacionar los requisitos del cliente con las especificaciones del producto, ayudando a priorizar las características que aportan mayor valor. (Shillito, 2021).

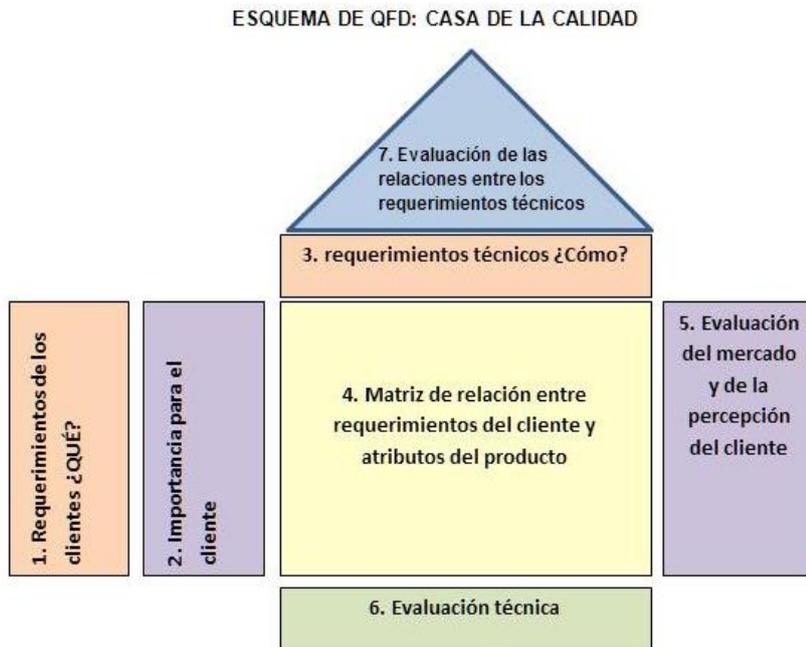
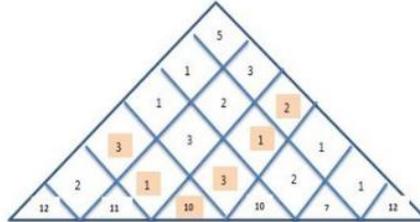


Imagen 5. Esquema de la casa de la calidad. (Administradora, 2017)



EJEMPLO QFD LA CASA DE LA CALIDAD



Importancia ponderada de los requisitos técnicos		1,7	1,6	1,4	1,4	1,0	1,7	EVALUACION COMPARATIVA (respecto a los requisitos del cliente) 5 = MEJOR 1 = PEOR				
¿CÓMO?	¿QUE?	Importancia para el cliente (1-5)	Ancho del papel	Espesor del papel	redondez del rollo de papel	Grosor del recubrimiento del papel	resistencia del papel	Color del papel	NOSOTROS	EMPRESA 1	EMPRESA 2	
			1	2	3	4	5	6				
1	Papel no se rompa	5	1	3	5	1	5	1	1	3	3	1
2	Acabado consistente	1	1	1	1	3	1	1	3	2	4	2
3	La tinta no se corra	3	1	5	1	3	2	1	5	4	3	3
4	Impresiones claras	5	2	1	3	5	1	3	3	4	5	4
Importancia ponderada respecto requerimientos del cliente (absoluta)			19	36	44	42	37	24	38	49	53	
Importancia ponderada respecto requerimientos del cliente (relativa)			1	1,9	2,3	2,2	1,9	1,3	1,0	1,3	1,4	
EVALUACIÓN PONDERADA DE LOS REQUISITOS DEL CLIENTE RESPECTO A LOS DEL PRODUCTO	ABSOLUTA		33	62	75	72	63	41				
	RELATIVA		1	2	2	2	2	1				
EVALUACION COMPARATIVA (respecto a los requisitos técnicos) 5 = MEJOR 1 = PEOR	NOSOTROS		4	2	1	2	1	3				
	EMPRESA 1		3	3	3	3	4	1				
	EMPRESA 2		5	1	4	1	3	2				

Gráfico 10. Diseño de un modelo QFD sobre el diseño de papel. (Administradora, 2017)

El gráfico 11 nos muestra un ejemplo de la implementación de un modelo QFD en una empresa de fotocopiadoras que quiere llegar a más clientes y para ello se basa en encuestas y estudios de mercado para conocer las prioridades de estos.

Una vez realizados todos los cálculos necesarios se puede observar la importancia que tiene cada requerimiento para satisfacer las necesidades del cliente. En este caso si ordenásemos de mayor a menor nos hacemos una idea de que características técnicas son más importantes para satisfacer los requisitos del cliente. En este caso:

1. Redondez del rollo de papel
2. Grosor del recubrimiento del papel

3. Resistencia del papel
4. Espesor del papel
5. Color del papel
6. Ancho del papel

El Análisis de Riesgos es un proceso sistemático para identificar, evaluar y gestionar riesgos en proyectos o procesos. Este análisis ayuda a las organizaciones a anticipar problemas potenciales y a desarrollar estrategias para mitigarlos o gestionarlos de manera efectiva. Se utiliza ampliamente en gestión de proyectos, desarrollo de productos, y operaciones, y es fundamental para asegurar la continuidad del negocio y minimizar las pérdidas.

Los **Modelos de Capacidad** son herramientas utilizadas para evaluar la capacidad de un proceso, sistema u organización para cumplir con los requisitos establecidos. En la gestión de calidad, el análisis de capacidad se utiliza para determinar si un proceso es capaz de producir resultados que se mantengan dentro de los límites especificados de manera consistente. Un modelo de capacidad comúnmente utilizado es el CMMI (modelos de madurez de capacidades) que se aplica especialmente en el desarrollo de software y otros proyectos técnicos. (Montgomery, 2021).

- **Analizar**

En esta fase, se desarrollan conceptos de diseño que puedan cumplir con los requisitos especificados. Se analizan diferentes alternativas y se selecciona el mejor enfoque. Se realizan estudios de viabilidad para determinar la efectividad del diseño propuesto.

Las herramientas más comunes son: Análisis de Tolerancias, Simulación (anteriormente comentada), Análisis de Sensibilidad.

El análisis de tolerancias es una herramienta utilizada en ingeniería para evaluar cómo las variaciones permitidas en las dimensiones y otros parámetros de un producto afectan su funcionamiento y ensamblaje. Este análisis es esencial para garantizar que un producto funcione correctamente incluso cuando sus componentes presentan pequeñas variaciones debido a procesos de fabricación.

Este tipo de análisis se utiliza ampliamente en el diseño y la manufactura para asegurarse de que todas las piezas encajen y funcionen correctamente, evitando costosos errores en la producción. Por ejemplo, en la fabricación de dispositivos mecánicos como fotocopiadoras, el análisis de tolerancias se emplea para asegurar que componentes como rodillos, engranajes y bandejas de papel se ensamblen de manera correcta y funcionen sin problemas, a pesar de las pequeñas variaciones en sus dimensiones.

El análisis de sensibilidad es una técnica utilizada para determinar cómo las variaciones en las variables de entrada de un modelo afectan el resultado final. Este análisis es fundamental para identificar cuáles son los factores que más influyen en el rendimiento de un producto, permitiendo a los diseñadores centrarse en las variables más críticas durante el proceso de optimización.



En la práctica, el análisis de sensibilidad se aplica en diversas etapas del diseño y desarrollo de productos. Por ejemplo, en el diseño de fotocopiadoras, este análisis puede ayudar a determinar cómo cambios en la velocidad de impresión, el tipo de papel o la formulación de la tinta afectan la calidad de la impresión y la durabilidad del equipo. (Wang & Oliveira, 2020)

- **Diseñar**

Se lleva a cabo el diseño detallado del producto o proceso. Esto incluye la creación de prototipos, la simulación de funcionamiento, y la optimización del diseño para satisfacer los criterios de calidad y costo. El diseño se perfecciona iterativamente hasta que cumple con todos los requisitos

Las herramientas más Comunes: Prototipado Diseño y Simulación, DOE. (anteriormente comentados)

- **Verificar**

La fase final es la verificación del diseño a través de pruebas y validaciones exhaustivas. Se aseguran de que el diseño cumple con las especificaciones y se ajusta a los requisitos del cliente. Si es necesario, se realizan ajustes antes de la producción en masa o la implementación total del nuevo proceso.

En esta fase las herramientas más utilizadas son: Pruebas Beta, Validación de Proceso, Planes de Control (anteriormente comentada).

Las **pruebas Beta** son una fase crucial en el ciclo de desarrollo de un producto donde este es entregado a un grupo selecto de usuarios externos antes de su lanzamiento oficial. Durante esta fase, los usuarios prueban el producto en un entorno real para identificar cualquier fallo o área de mejora que no haya sido detectada en pruebas internas.

En la industria tecnológica, como en el desarrollo de software, las pruebas Beta permiten a los desarrolladores recibir retroalimentación directa de los usuarios finales sobre la funcionalidad, la usabilidad y el rendimiento del producto. En la manufactura de productos físicos, como las fotocopiadoras, las pruebas Beta pueden involucrar a clientes clave o usuarios avanzados que prueban el equipo en condiciones normales de uso. (Montgomery, 2013)

La **validación de proceso** es una metodología sistemática utilizada para asegurar que un proceso de manufactura o producción cumple consistentemente con las especificaciones predefinidas y produce productos de calidad. Implica una serie de pruebas y evaluaciones para confirmar que el proceso es capaz de operar de manera confiable bajo condiciones normales de producción.

La validación de proceso es crítica para garantizar la consistencia en la calidad del producto y para cumplir con los requisitos regulatorios y de la industria. Esto es especialmente importante en sectores donde la calidad es vital para la seguridad y la satisfacción del cliente. Además, una validación de proceso adecuada puede reducir desperdicios, evitar reprocesos y mejorar la eficiencia operativa. (Taguchi & Jugulum, 2002)

Comparación entre DMAIC y DMADV

Como podemos ver, ambos procesos tienen fases similares pero cada uno de ellos está enfocado en ámbitos diferentes. DMAIC, se enfoca en mejorar los procesos existentes, eliminando defectos y optimizando el rendimiento. Por otro lado, DMADV, se utiliza para diseñar nuevos procesos o productos, asegurando que desde el principio se cumplan los estándares de Six Sigma.



4. Análisis de la cadena de suministro en el contexto de la industria 4.0

4.1. Transformación digital de la cadena de suministro

La transformación digital en la cadena de suministro se refiere a la incorporación de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), Big Data, inteligencia artificial (IA), blockchain, y la automatización avanzada, conceptos que desarrollaremos más adelante en este mismo apartado, para mejorar la eficiencia, la visibilidad y la flexibilidad de las operaciones

Este cambio no solo afecta a las funciones internas de las empresas, sino que también impacta en la colaboración y la integración con proveedores, clientes y otros socios comerciales.

La digitalización de la cadena de suministro permite la creación de redes de suministro inteligentes y conectadas que pueden responder de manera proactiva a las variaciones en la demanda, las interrupciones en el suministro, y los cambios en el entorno de mercado. Esta capacidad de respuesta es esencial en un entorno competitivo donde la agilidad y la capacidad de adaptación son cruciales para el éxito. Para ello, a continuación, vamos a ver en profundidad que tecnologías innovadoras se están utilizando como transición a esta era digitalizada.

4.2. Tecnologías habilitadoras y su integración

La Industria 4.0 está impulsada por una serie de tecnologías avanzadas que transforman la manera en que las fábricas y las cadenas de suministro operan. Estas tecnologías incluyen el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA), el Big Data, la robótica avanzada, la impresión 3D, el blockchain y la realidad aumentada y virtual.

Anteriormente hemos visto las diferentes metodologías que puede implementar la empresa para mejorar la eficiencia y efectividad de sus procesos, dando una pequeña pincelada sobre las nuevas tecnologías que podrían ser de utilidad para cada uno de ellos.

En el siguiente apartado vamos a profundizar en estas nuevas tecnologías disruptivas, haciendo hincapié en las mejoras que puede proporcionar cada una de ellas y acompañándolas con algunos ejemplos.

La industria 4.0, se centra en 9 pilares básicos:

1. Internet de las cosas (IoT)
2. Inteligencia Artificial (IA)
3. Big data
4. Robótica avanzada
5. Blockchain y ciberseguridad
6. Impresión 3D
7. Realidad aumentada
8. Simulaciones
9. Computación en la nube



Imagen 6. Los 9 pilares de la industria 4.0. Elaboración con IA.



4.2.1. Internet de las Cosas (IoT)

El IoT se trata una red de dispositivos interconectados que pueden recopilar y compartir datos en tiempo real. En el contexto de la Industria 4.0, el IoT permite la creación de fábricas inteligentes donde las máquinas y dispositivos están interconectados, lo que facilita el monitoreo y el control de los procesos de producción.

Según un estudio realizado por Xu, He y Li (2014) en el "Journal of Manufacturing Systems", podemos ver como mejora la eficiencia operativa en las fábricas inteligentes al proporcionar datos en tiempo real que informan sobre el estado de las máquinas y los procesos productivos.

Aplicaciones en la cadena de suministro

1. Seguimiento y Monitorización en Tiempo Real

El IoT permite un seguimiento continuo y en tiempo real de productos, vehículos y activos a lo largo de toda la cadena de suministro. Esto se logra mediante el uso de dispositivos GPS, etiquetas RFID, y sensores que recopilan datos sobre la ubicación, temperatura, humedad, y otras condiciones críticas de los productos en tránsito. Esta aplicación es esencial para mejorar la transparencia, reducir el riesgo de pérdidas o daños, y optimizar las rutas de entrega. Empresas como Walmart utiliza estas tecnologías para garantizar la seguridad y eficiencia en sus operaciones logísticas.

2. Gestión Inteligente de Inventarios

La implementación de IoT en los almacenes permite una gestión más precisa y automatizada del inventario. Sensores y estanterías inteligentes monitorizan continuamente los niveles de stock y activan reabastecimientos automáticos cuando los niveles caen por debajo de un umbral determinado. Esto no solo reduce los costos asociados con el exceso de inventario, sino que también minimiza el riesgo de desabastecimiento.

3. Automatización de Procesos Logísticos

El IoT se integra con robots y sistemas automatizados para mejorar la eficiencia en los procesos de preparación de pedidos, embalaje y distribución en los almacenes. Estos sistemas conectados pueden trabajar de manera autónoma o en colaboración con trabajadores humanos (cobots), lo que reduce los tiempos de operación y minimiza los errores. Amazon ha invertido considerablemente en la automatización de sus centros de distribución mediante el uso de robots equipados con IoT para acelerar y perfeccionar la gestión de pedidos. (Lorenzo, 2024)

4. Optimización del Transporte y Distribución

Los datos recopilados por los dispositivos IoT se utilizan para optimizar las rutas de transporte, teniendo en cuenta variables como el tráfico, las condiciones meteorológicas y la demanda en tiempo real. Esto ayuda a reducir los tiempos de entrega y los costos operativos, así como a minimizar el impacto ambiental. Empresas de logística como DHL utilizan IoT para optimizar las rutas de sus vehículos y mejorar la eficiencia en la entrega de mercancías.

5. Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo es otra aplicación clave del IoT en la cadena de suministro. Los sensores IoT instalados en equipos y vehículos recopilan datos sobre el estado de las máquinas, lo que permite prever fallos antes de que ocurran y programar mantenimientos en los momentos más convenientes. Esto reduce significativamente el tiempo de inactividad y los costos asociados a reparaciones de emergencia. Empresas industriales y logísticas, como General Electric (GE) y Caterpillar, utilizan el mantenimiento predictivo para mejorar la confiabilidad y eficiencia de sus operaciones (Webbylab, 2023) (Ahman, Khan & Fayaz, 2023).

Tecnologías específicas

- **RFID (Radio-Frequency Identification):** Utilizado para rastrear productos a lo largo de la cadena de suministro, proporcionando datos en tiempo real sobre la ubicación y el estado de los artículos.
- **GPS Trackers:** Dispositivos que permiten la monitorización en tiempo real de la ubicación de los vehículos y envíos, mejorando la visibilidad y optimización de rutas.
- **Sensores Inteligentes:** Recogen datos sobre condiciones ambientales (temperatura, humedad, etc.) en almacenes y durante el transporte, asegurando la calidad del producto.
- **Estanterías Inteligentes:** Estas estanterías equipadas con sensores IoT pueden monitorear automáticamente los niveles de inventario y alertar cuando se necesita reposición.
- **Robots de Picking Automatizado:** Equipados con IoT, estos robots optimizan el proceso de selección y empaquetado de productos en almacenes, mejorando la eficiencia operativa.
- **Wearables IoT:** Dispositivos portátiles como gafas inteligentes o pulseras que proporcionan a los trabajadores de la cadena de suministro datos en tiempo real, mejorando la precisión y seguridad en las operaciones.



4.2.2. Inteligencia Artificial (IA) y Aprendizaje Automático

La inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático son tecnologías que permiten a las máquinas aprender de los datos y mejorar continuamente sus capacidades. Estas tecnologías analizan grandes volúmenes de datos y mejoran la toma de decisiones en los procesos de producción.

Lee, Davari y Singh (2018) nos muestran en el "Journal of Industrial Information Integration", que la implementación de la IA en la manufactura puede reducir significativamente los costos operativos y aumentar la productividad mediante la automatización de tareas repetitivas y la optimización de procesos.

Aplicaciones en la cadena de suministro

1. Optimización de la Gestión de Inventarios

El uso de algoritmos de aprendizaje automático permite optimizar los niveles de inventario mediante la predicción de la demanda y la gestión dinámica del stock. Esto es particularmente útil en industrias con productos perecederos o de alta rotación. Los modelos de aprendizaje profundo, como el aprendizaje por refuerzo, se utilizan para mejorar la toma de decisiones en tiempo real, reduciendo los costos de almacenamiento y minimizando los desabastecimientos.

2. Predicción y Planificación de la Demanda

Los sistemas de IA analizan grandes volúmenes de datos históricos y en tiempo real para prever fluctuaciones en la demanda, lo que permite a las empresas ajustar sus operaciones de producción y distribución de manera más eficiente. Esta capacidad de predicción ayuda a mitigar los riesgos asociados con la sobreproducción o el agotamiento de inventarios.

3. Optimización de Rutas Logísticas

La IA permite la optimización de rutas de transporte al analizar datos en tiempo real sobre tráfico, clima y otros factores que afectan la entrega. Los algoritmos de IA pueden seleccionar las rutas más eficientes, lo que reduce los costos de transporte y mejora los tiempos de entrega.

4. Automatización de Procesos y Toma de Decisiones

Los sistemas de IA pueden automatizar decisiones operativas complejas, como la selección de proveedores, la asignación de recursos y la priorización de pedidos. Esto no solo reduce la carga de trabajo manual, sino que también mejora la precisión y rapidez en la toma de decisiones. Las empresas están utilizando la IA para mejorar la coordinación entre diferentes partes de la cadena de suministro, asegurando que las operaciones sean más ágiles y adaptativas a los cambios del mercado.

5. Mejora en la Resiliencia de la Cadena de Suministro

En un contexto de crecientes interrupciones globales, como pandemias o conflictos, la IA se ha convertido en una herramienta esencial para mejorar la resiliencia de la cadena de suministro. Al anticipar posibles disrupciones y proponer estrategias de mitigación, la IA ayuda a las empresas a mantener la continuidad operativa y a responder rápidamente a los cambios en el entorno global. (Priore, Pino & Parreño, 2019).

Tecnologías específicas

- **Algoritmos de Aprendizaje Automático (Machine Learning):** Utilizados para predecir la demanda de productos, optimizar inventarios y mejorar la planificación de la producción.
- **Sistemas de Optimización de Rutas:** Software de IA que analiza datos en tiempo real sobre tráfico y clima para seleccionar las rutas de transporte más eficientes.
- **Chatbots y Asistentes Virtuales:** Utilizados para automatizar la gestión de pedidos, atención al cliente y consultas internas, mejorando la eficiencia operativa.
- **Sistemas de Visión Artificial:** Implementados en el control de calidad y gestión de inventarios, permitiendo inspecciones automatizadas y precisas.
- **Plataformas de IA para la Gestión de Riesgos:** Utilizan modelos predictivos para anticipar posibles disrupciones en la cadena de suministro y proponer acciones correctivas.

4.2.3. Big Data

El Big Data se refiere a la capacidad de recopilar, almacenar y analizar grandes volúmenes de datos procedentes de diversas fuentes. En la Industria 4.0, el análisis de Big Data al igual que hemos comentado con la IA, permite a las empresas obtener diferentes puntos de vista valiosos sobre sus operaciones, identificar tendencias y optimizar los procesos de producción.

El estudio de Wamba et al. (2015), en el “International Journal of Production Economics” nos muestra como el uso del Big Data puede ayudar a tomar decisiones estratégicas y operativas claves para aumentar la competitividad.



Aplicaciones en la cadena de suministro

1. Análisis Predictivo para la Demanda

Big Data permite analizar grandes volúmenes de datos históricos y en tiempo real para predecir la demanda de productos con mayor precisión. Esto ayuda a las empresas a ajustar su producción e inventario, reduciendo el riesgo de sobreproducción o desabastecimiento.

2. Optimización de la Logística

A través del análisis de datos en tiempo real, las empresas pueden optimizar rutas de transporte, teniendo en cuenta factores como el tráfico, el clima y la disponibilidad de vehículos. Esto reduce los costos de transporte y mejora los tiempos de entrega .

3. Gestión de Inventarios en Tiempo Real

Big Data permite a las empresas gestionar inventarios de manera dinámica y en tiempo real, ajustando los niveles de stock según las fluctuaciones de la demanda y minimizando los costos asociados con el almacenamiento.

4. Mejora en la Toma de Decisiones

Las herramientas de análisis de Big Data proporcionan información valiosa para la toma de decisiones estratégicas, permitiendo a las empresas responder rápidamente a cambios en el mercado y optimizar su cadena de suministro. (Zhao & Wu, 2021)

Tecnologías específicas

- **SAP HANA:** Una plataforma de análisis en tiempo real que permite a las empresas gestionar grandes volúmenes de datos, optimizando operaciones logísticas y mejorando la toma de decisiones en la cadena de suministro.
- **Apache Hadoop:** Un framework de software de código abierto utilizado para almacenar y procesar grandes conjuntos de datos distribuidos, permitiendo un análisis eficiente de datos a gran escala.
- **IBM Watson Supply Chain:** Utiliza Big Data y análisis predictivo para proporcionar visibilidad en tiempo real de la cadena de suministro, ayudando a las empresas a anticipar y mitigar riesgos.
- **Tableau:** Herramienta de visualización de datos que permite a las empresas crear dashboards interactivos para el análisis de datos de la cadena de suministro, facilitando la toma de decisiones basada en datos.
- **Microsoft Azure Machine Learning:** Plataforma que permite el análisis predictivo y el aprendizaje automático aplicado a datos de la cadena de suministro para optimizar procesos y mejorar la eficiencia operativa.

4.2.4. Robótica Avanzada

La robótica avanzada implica el uso de robots en la manufactura que son capaces de realizar tareas complejas con alta precisión y eficiencia. Estos robots están equipados con sensores y sistemas de control avanzados que les permiten interactuar con su entorno y adaptarse a los cambios en tiempo real.

En un estudio publicado en el "Journal of Manufacturing Technology Management" por El Makrini et al. (2019), se demuestra que la implementación de robótica avanzada en la manufactura puede reducir significativamente los costos y mejorar la calidad del producto final mediante la automatización de tareas críticas.

4.2.5. Blockchain

La tecnología blockchain proporciona una forma segura y transparente de registrar y verificar transacciones. En la cadena de suministro, el blockchain se utiliza para garantizar la trazabilidad de los productos, mejorar la seguridad y reducir el fraude. (Saberri et al, 2019)

La impresión 3D permite la fabricación de objetos tridimensionales a partir de modelos digitales, lo que facilita la producción rápida y personalizada de componentes y productos finales. Esta tecnología está transformando la manufactura al permitir la producción bajo demanda y la reducción de desperdicios. (Gao et al, 2015)

Aplicaciones en la cadena de suministro

1. Trazabilidad y Transparencia

Blockchain permite un seguimiento detallado y en tiempo real de los productos a lo largo de la cadena de suministro. Cada transacción se registra en un libro mayor inmutable, garantizando la transparencia y autenticidad del producto desde su origen hasta el consumidor final. Esto es especialmente útil en industrias como la alimentaria y farmacéutica.

2. Automatización de Contratos Inteligentes (Smart Contracts)

Los contratos inteligentes en blockchain ejecutan automáticamente acuerdos cuando se cumplen condiciones preestablecidas. Esto mejora la eficiencia operativa al reducir la necesidad de intermediarios y automatizar pagos y entregas.

3. Prevención de Fraudes y Mejoras en la Seguridad

Al proporcionar un registro inmutable y verificable de cada transacción, blockchain reduce significativamente el riesgo de fraudes y falsificaciones. Esto es crucial en industrias donde la autenticidad y calidad del producto son vitales, como el lujo y la manufactura de alta tecnología.



4. Optimización de Procesos Logísticos

Blockchain facilita la coordinación y sincronización entre diferentes partes de la cadena de suministro, mejorando la eficiencia logística al reducir los tiempos de espera y los costos asociados. (Wang, Han & Beyon, 2019)

Tecnologías específicas

- IBM Food Trust: Una plataforma blockchain que proporciona trazabilidad en tiempo real de alimentos, mejorando la transparencia y seguridad en la cadena de suministro alimentaria.
- VeChain: Un sistema blockchain diseñado para gestionar y certificar la calidad y autenticidad de productos a lo largo de la cadena de suministro, utilizado en sectores como la salud y el lujo.
- Provenance: Utiliza blockchain para verificar la procedencia y autenticidad de productos, especialmente en las industrias alimentaria y de moda, asegurando la transparencia desde la fuente hasta el consumidor final.
- Everledger: Plataforma blockchain que rastrea el origen de productos de alto valor, como diamantes y vinos finos, garantizando su autenticidad y previniendo fraudes.
- ShipChain: Una plataforma blockchain que optimiza la logística y el transporte, proporcionando visibilidad completa del envío desde el origen hasta la entrega final.

4.2.6. Realidad Aumentada y Virtual

Las tecnologías de realidad aumentada (AR) y realidad virtual (VR) están mejorando la interacción entre los trabajadores y los sistemas de producción. La AR permite a los operarios visualizar información y guías en tiempo real, mientras que la VR se utiliza para el entrenamiento y la simulación de escenarios complejos. (Nee et al. 2012)

Aplicaciones en la cadena de suministro

1. Optimización de Procesos de Picking y Embalaje

La realidad aumentada (AR) guía a los trabajadores en almacenes, mostrando rutas y ubicaciones exactas de los productos, lo que acelera el picking y reduce errores. DHL ha implementado AR para mejorar la eficiencia en sus almacenes.

2. Formación y Capacitación en Tiempo Real

AR proporciona a los empleados instrucciones visuales y guías en tiempo real mientras realizan sus tareas, reduciendo la curva de aprendizaje y mejorando la precisión. Boeing utiliza AR para capacitar a sus técnicos en la instalación de cableados.

3. Mantenimiento Asistido

Los técnicos utilizan AR para acceder a manuales de reparación y diagnósticos en tiempo real, lo que mejora la eficiencia en el mantenimiento de maquinaria y equipos. Caterpillar ha integrado AR para asistencia en el campo durante reparaciones de maquinaria pesada.

4. Visualización de Procesos y Simulaciones

AR permite la simulación de procesos complejos en la cadena de suministro antes de su implementación, identificando posibles cuellos de botella y optimizando flujos de trabajo. General Electric utiliza AR para simular procesos de ensamblaje en sus fábricas, reduciendo errores y mejorando la eficiencia. (Nee et al. 2012)

Tecnologías específicas

- **Microsoft HoloLens:** Gafas inteligentes que permiten a los trabajadores de la cadena de suministro visualizar instrucciones y guías en tiempo real, mejorando la precisión en tareas como el picking y ensamblaje.
- **Google Glass Enterprise Edition:** Utilizado en almacenes y centros de distribución para proporcionar a los trabajadores acceso a datos en tiempo real, optimizando el flujo de trabajo y la gestión de inventarios.
- **Vuzix Smart Glasses:** Ofrecen capacidades de AR para asistencia remota, permitiendo a los técnicos recibir soporte en tiempo real durante reparaciones y mantenimiento.
- **PTC Vuforia:** Una plataforma de AR que permite la creación de aplicaciones industriales para el mantenimiento, inspección y formación, mejorando la eficiencia y reduciendo errores.
- **Scope AR:** Una plataforma de AR que ofrece soluciones para la capacitación y el soporte técnico en la cadena de suministro, proporcionando instrucciones visuales y en tiempo real a través de dispositivos móviles y gafas inteligentes.

4.2.7. Computación en la nube (Cloud computing)

La computación en la nube ha transformado la forma en que las empresas gestionan sus cadenas de suministro. Las soluciones en la nube ofrecen una mayor flexibilidad, escalabilidad y acceso en tiempo real a los datos, permitiendo a las empresas reaccionar rápidamente a los cambios en la demanda, optimizar sus operaciones y colaborar de manera más eficaz con sus socios comerciales.



Aplicaciones en la cadena de suministro

1. Gestión de Datos y Almacenamiento Escalable

La computación en la nube permite a las empresas almacenar y procesar grandes volúmenes de datos de la cadena de suministro de manera escalable y flexible.

2. Colaboración y Comunicación en Tiempo Real

Las soluciones en la nube permiten la colaboración en tiempo real entre diferentes partes de la cadena de suministro, mejorando la coordinación y respuesta a cambios de mercado.

3. Optimización de Procesos y Análisis Predictivo

Las herramientas de análisis en la nube utilizan Big data y aprendizaje automático para predecir la demanda, optimizar rutas logísticas y mejorar la toma de decisiones estratégicas.

Tecnologías específicas

- **Oracle SCM Cloud:** Esta plataforma en la nube permite la integración completa de la cadena de suministro, desde la planificación hasta la ejecución. Oracle SCM Cloud ofrece herramientas para la gestión de pedidos, planificación de la demanda, gestión de inventarios y logística. Su capacidad para conectarse con otras plataformas y proveedores hace que sea una opción popular para grandes empresas globales.
- **SAP Integrated Business Planning (IBP):** SAP IBP es una solución integral para la planificación y optimización de la cadena de suministro. Ofrece funcionalidades avanzadas como planificación de ventas y operaciones, gestión de inventarios, y simulación de escenarios. Al estar basada en la nube, SAP IBP permite una colaboración en tiempo real entre todos los actores de la cadena de suministro.
- **Microsoft Dynamics 365:** Dynamics 365 utiliza inteligencia artificial para optimizar las operaciones y mejorar la toma de decisiones. Su integración con otras herramientas de Microsoft, como Power BI, facilita el análisis de datos y la creación de informes personalizados. (Breivold & Sandstrom, 2015)

Estas tres plataformas de gestión de la cadena de suministro combinan planificación de los recursos empresariales (ERP) y gestión de las relaciones con los clientes (CRM), proporcionando una visión unificada de las operaciones de la cadena de suministro.

- **Amazon Web Services (AWS):** AWS ofrece una amplia gama de servicios en la nube, incluyendo almacenamiento, bases de datos, análisis y machine learning, que son esenciales para gestionar los datos generados a lo largo de

la cadena de suministro. AWS es conocido por su seguridad robusta, escalabilidad y flexibilidad, lo que lo convierte en una opción preferida para empresas de todos los tamaños.

- **Microsoft Azure:** Similar a AWS, Azure proporciona servicios en la nube que permiten a las empresas almacenar, procesar y analizar datos a gran escala. Azure también ofrece soluciones específicas para la cadena de suministro, como Azure IoT para la monitorización de activos en tiempo real y Azure Machine Learning para la optimización de procesos.
- **Google Cloud:** Google Cloud se destaca por sus capacidades avanzadas de análisis de datos y machine learning. Con Google BigQuery y TensorFlow, las empresas pueden analizar grandes volúmenes de datos de la cadena de suministro y aplicar inteligencia artificial para mejorar la eficiencia operativa y la previsión de la demanda.

Plataformas como Slack, Microsoft Teams, y Zoom se integran con soluciones de gestión de la cadena de suministro para facilitar la comunicación y la colaboración entre equipos distribuidos geográficamente. (Borgia, 2014)

4.2.8. Ciberseguridad

La digitalización de la cadena de suministro ha expuesto a las empresas a nuevos riesgos cibernéticos. Las infraestructuras conectadas, la integración de sistemas con proveedores y la dependencia de tecnologías como IoT y Cloud Computing aumentan las vulnerabilidades. Un ciberataque en cualquier punto de la cadena puede interrumpir las operaciones, causar pérdidas económicas y dañar la reputación de la empresa. Por ello, la ciberseguridad se ha convertido en un aspecto crítico para proteger los datos sensibles y asegurar la continuidad del negocio.

Aplicaciones en la cadena de suministro

1. Protección de Datos Sensibles

La ciberseguridad es esencial para proteger datos críticos de la cadena de suministro, como información sobre inventarios, transacciones y datos de clientes, frente a accesos no autorizados y ciberataques.

2. Garantía de la Integridad de las Transacciones

La ciberseguridad asegura que las transacciones electrónicas realizadas en la cadena de suministro sean auténticas y estén protegidas contra fraudes. Esto se logra mediante el uso de tecnologías como blockchain y certificados digitales que verifican la identidad de las partes involucradas y la validez de las transacciones.



3. Mitigación de Riesgos Cibernéticos

Ayudan a identificar y mitigar riesgos cibernéticos que podrían interrumpir la cadena de suministro. Esto incluye la detección y respuesta a amenazas como el ransomware, el phishing y otras formas de ciberataques dirigidos a interrumpir operaciones críticas.

4. Cumplimiento Normativo

Facilita el cumplimiento de normativas y regulaciones internacionales sobre la protección de datos y la seguridad de la información en la cadena de suministro. Las empresas utilizan auditorías de seguridad y herramientas de gestión de cumplimiento para asegurar que sus operaciones cumplan con las normativas locales e internacionales.

5. Resiliencia Operativa

Implementar medidas de ciberseguridad robustas permite a las empresas mantener la continuidad de las operaciones de la cadena de suministro incluso ante incidentes cibernéticos. Tecnologías como la detección de intrusiones y la recuperación ante desastres son fundamentales para asegurar que las empresas puedan responder rápidamente a amenazas y minimizar el tiempo de inactividad. (Khan & Estay, 2021)

Tecnologías específicas

- **Firewalls y Sistemas de Prevención de Intrusiones (IPS)**

Estas herramientas tradicionales se han adaptado a las necesidades de la cadena de suministro moderna. Protegen las redes de accesos no autorizados y detectan intentos de intrusión antes de que puedan causar daño. Ejemplos de proveedores incluyen Fortinet y Palo Alto Networks.

- **Seguridad en IoT**

Dado el creciente uso de dispositivos IoT en la cadena de suministro, la seguridad de estos dispositivos es fundamental. Las soluciones de seguridad IoT incluyen autenticación de dispositivos, cifrado de datos y actualizaciones de firmware seguras. Cisco y Symantec ofrecen soluciones específicas para la protección de dispositivos IoT.

- **Sistemas de Detección y Respuesta ante Amenazas (EDR)**

Estas herramientas monitorizan continuamente la actividad en los endpoints (dispositivos finales) para detectar comportamientos anómalos que puedan indicar un ataque. Proveedores como CrowdStrike y Carbon Black están a la vanguardia en este ámbito.

- **Soluciones SIEM**

Los sistemas de Gestión de Información y Eventos de Seguridad (SIEM) recogen y analizan los logs y eventos de seguridad generados por las diferentes partes de la infraestructura de TI. Esto permite una detección temprana de amenazas y una respuesta rápida. Herramientas como Splunk y IBM QRadar son utilizadas para monitorizar la cadena de suministro en tiempo real, permitiendo la correlación de eventos y la identificación de incidentes de seguridad.

- **Monitorización en Tiempo Real**

La capacidad de monitorizar en tiempo real todos los eventos de seguridad a lo largo de la cadena de suministro permite a las organizaciones responder rápidamente a cualquier amenaza potencial. Esto es crucial para minimizar el impacto de los ciberataques y garantizar la continuidad operativa.

Como se puede observar, las tecnologías de la Industria 4.0 comparten y combinan una serie de beneficios individuales que cada una de ellas ofrece. Esta sinergia permite la creación de un entorno industrial más eficiente, avanzado y competitivo. Por ejemplo, la integración de IoT, IA, Big Data, y robótica avanzada no solo optimiza los procesos de producción y reduce costos operativos, sino que también mejora la calidad del producto y la capacidad de respuesta a las demandas del mercado. Esta convergencia tecnológica resulta en una mejora significativa en la eficiencia operativa y la innovación, posicionando a las empresas para afrontar con éxito los desafíos del entorno industrial moderno.

La Industria 4.0 está redefiniendo la manera en que las empresas operan, integrando tecnologías avanzadas que permiten una mayor interconectividad, eficiencia y flexibilidad en los procesos de producción. Al comprender los fundamentos y las tecnologías clave de la Industria 4.0, las empresas pueden aprovechar estas innovaciones para mejorar su competitividad y adaptarse a un entorno industrial en constante evolución.

4.3. Modelos de madurez digital

La madurez digital en la cadena de suministro se refiere al grado en que una organización ha integrado tecnologías digitales avanzadas en sus operaciones de manera efectiva y estratégica. Esta integración no solo abarca la adopción de tecnologías como IoT, Big Data, inteligencia artificial, y blockchain, sino también la capacidad de utilizarlas de manera coherente y coordinada para mejorar la eficiencia, la visibilidad, y la resiliencia en la cadena de suministro. (Westerman, Bonnet & McAfee, 2014)



4.3.1. Niveles de madurez Digital

La madurez digital se puede dividir en diferentes niveles o etapas, que reflejan la progresión desde una digitalización básica hasta la integración completa de tecnologías avanzadas:

- **Nivel 1:** Digitalización Inicial

La empresa comienza a digitalizar procesos manuales básicos, como la gestión de inventarios y la recopilación de datos de ventas.

- **Nivel 2:** Integración de Procesos

Se implementan sistemas ERP y otras tecnologías para integrar diferentes áreas de la empresa, mejorando la eficiencia y la comunicación interna.

- **Nivel 3:** Automatización y Análisis

Se adoptan tecnologías como el IoT y el Big Data para automatizar procesos y realizar análisis predictivos, optimizando la planificación y la operación de la cadena de suministro.

- **Nivel 4:** Digitalización Avanzada y Colaborativa

La empresa utiliza IA, blockchain y realidad aumentada para colaborar en tiempo real con proveedores y clientes, logrando una cadena de suministro totalmente integrada y transparente.

- **Nivel 5:** Innovación Continua

La empresa no solo ha integrado tecnologías digitales, sino que también adopta un enfoque continuo de mejora e innovación, utilizando datos y tecnologías emergentes para adaptarse rápidamente a los cambios del mercado.

5. Beneficios y oportunidades de la industria 4.0 en la cadena de suministro

La Industria 4.0 ha desencadenado una transformación sin precedentes en la cadena de suministro, introduciendo tecnologías avanzadas que han optimizado las operaciones, reducido costes y aumentado la capacidad de respuesta de las empresas. En este apartado se explora en profundidad los principales beneficios y oportunidades que la Industria 4.0 ofrece a la CS.

5.1. Eficiencia Operativa

Uno de los beneficios más destacados es la significativa mejora en la eficiencia operativa. La integración del IoT, big data y la IA ha permitido a las empresas automatizar procesos, optimizar el uso de recursos y reducir los tiempos de producción.

Según Schoenherr y Speier-Pero (2015), el uso de IoT y big data ha permitido a las empresas recopilar y analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real, lo que ha mejorado considerablemente la precisión en la previsión de la demanda y la gestión de inventarios. Esta capacidad de anticipar las necesidades del mercado ha llevado a una reducción en los tiempos de ciclo y a una mayor eficiencia operativa en toda la cadena de suministro.

Müller, Kiel, y Voigt (2018) señalan que la implementación de tecnologías de automatización, como los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS) y los robots colaborativos (cobots), ha permitido a las empresas reducir los costos operativos y mejorar la velocidad y precisión de las operaciones. Estos avances han optimizado los flujos de trabajo, eliminando cuellos de botella y mejorando la productividad.

5.2. Reducción de Costos

La Industria 4.0 ha demostrado ser un catalizador para la reducción de costos en la cadena de suministro. La automatización y digitalización de procesos han permitido a las empresas minimizar el desperdicio, optimizar el uso de materiales y reducir los costos asociados con el transporte y el almacenamiento.

Kache y Seuring (2017) destacan que la integración de big data y análisis predictivo ha permitido a las empresas optimizar el uso de recursos, reduciendo el desperdicio y mejorando la eficiencia energética. Estos avances han contribuido a una disminución significativa en los costos operativos, al mismo tiempo que promueven prácticas sostenibles dentro de la cadena de suministro.



La digitalización de la cadena de suministro también ha permitido una optimización significativa en las operaciones de transporte. Saeed y Kersten (2019) subrayan que las tecnologías de la Industria 4.0, como los sistemas de gestión de transporte (TMS) basados en IA, han mejorado la planificación y ejecución de rutas, lo que ha resultado en una reducción de los costos de transporte y en una mayor puntualidad en las entregas.

5.3. Aumento de la flexibilidad y adaptabilidad

La capacidad de adaptarse rápidamente a los cambios en el mercado es crucial para el éxito de cualquier cadena de suministro. La Industria 4.0 ha potenciado la flexibilidad y adaptabilidad de las operaciones logísticas, permitiendo a las empresas responder de manera más eficaz a las fluctuaciones en la demanda y a las interrupciones en la cadena de suministro.

Wamba y Akter (2015) argumentan que la implementación de tecnologías de análisis predictivo y sistemas automatizados ha mejorado la resiliencia de las cadenas de suministro, permitiendo a las empresas anticipar y mitigar los riesgos asociados con interrupciones en la cadena de suministro. Esto ha aumentado la capacidad de las empresas para adaptarse a las cambiantes condiciones del mercado y mantener la continuidad del negocio. Además, la Industria 4.0 ha hecho posible la producción personalizada, permitiendo a las empresas adaptar sus productos a las necesidades específicas de los clientes. Esto no solo mejora la satisfacción del cliente, sino que también proporciona una ventaja competitiva en mercados altamente dinámicos.

5.4. Sostenibilidad y Responsabilidad social

Otro beneficio clave de la Industria 4.0 es su contribución a la sostenibilidad y responsabilidad social en la cadena de suministro. La integración de tecnologías avanzadas ha permitido a las empresas reducir su huella de carbono, minimizar el desperdicio y promover prácticas sostenibles.

Según Kache y Seuring (2017), las tecnologías de la Industria 4.0 han permitido a las empresas reducir su impacto ambiental mediante la optimización del uso de recursos y la adopción de energías renovables. Estos avances han sido cruciales para cumplir con las regulaciones ambientales y responder a la creciente demanda de los consumidores por productos sostenibles. La Industria 4.0 también ha facilitado la implementación de prácticas sostenibles en la cadena de suministro, como la economía circular y la gestión eficiente de residuos. Estas prácticas no solo mejoran la sostenibilidad de las operaciones, sino que también contribuyen a la responsabilidad social corporativa, fortaleciendo la reputación de las empresas ante sus clientes y la sociedad en general.

5.5. Innovación y desarrollo tecnológico

La Industria 4.0 ha impulsado la innovación y el desarrollo tecnológico en la cadena de suministro, abriendo nuevas oportunidades para el crecimiento empresarial y la mejora continua.

Schoenherr y Speier-Peró (2015) destacan que la adopción de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y la robótica avanzada, ha fomentado la innovación en procesos, permitiendo a las empresas desarrollar soluciones más eficientes y efectivas para los desafíos operativos. Esta capacidad de innovación es esencial para mantener la competitividad en un entorno empresarial en constante evolución.

Conclusiones

Con una visión general de los impulsores de las nuevas tecnologías en la cadena de suministro, a través del artículo de Saeed y Kersten titulado "*The Influence of Digital Transformation on Supply Chain Performance: A Comparative Case Study Analysis*", publicado en *Supply Chain Management Review*, podemos ver cómo la transformación digital ha impactado en el rendimiento de la cadena de suministro de diversas empresas.

El estudio analiza diversas empresas de sectores como manufactura, logística y retail para evaluar cómo la adopción de tecnologías digitales, como IoT, big data y sistemas ERP avanzados, ha influido en el rendimiento de sus cadenas de suministro. Las empresas que han implementado estas tecnologías han logrado una mayor eficiencia operativa, reflejada en la reducción de tiempos de ciclo, mejora en la precisión de la demanda y optimización de inventarios, mientras que las que continúan con métodos tradicionales han enfrentado mayores costos y tiempos de respuesta más lentos. Además, las empresas digitalizadas han experimentado una significativa reducción de costos logísticos y operativos gracias a la automatización y mejor planificación basada en análisis de datos en tiempo real. En términos de gestión de la cadena de suministro, estas empresas también han demostrado una mayor efectividad en la gestión de riesgos y la resiliencia, con mejor visibilidad y control, lo que les ha permitido adaptarse mejor a cambios en la demanda y manejar interrupciones. Finalmente, la digitalización ha llevado a mejoras en la satisfacción del cliente y en el rendimiento global, superando a las empresas que no han adoptado estas tecnologías en términos de crecimiento de ventas y cuota de mercado.

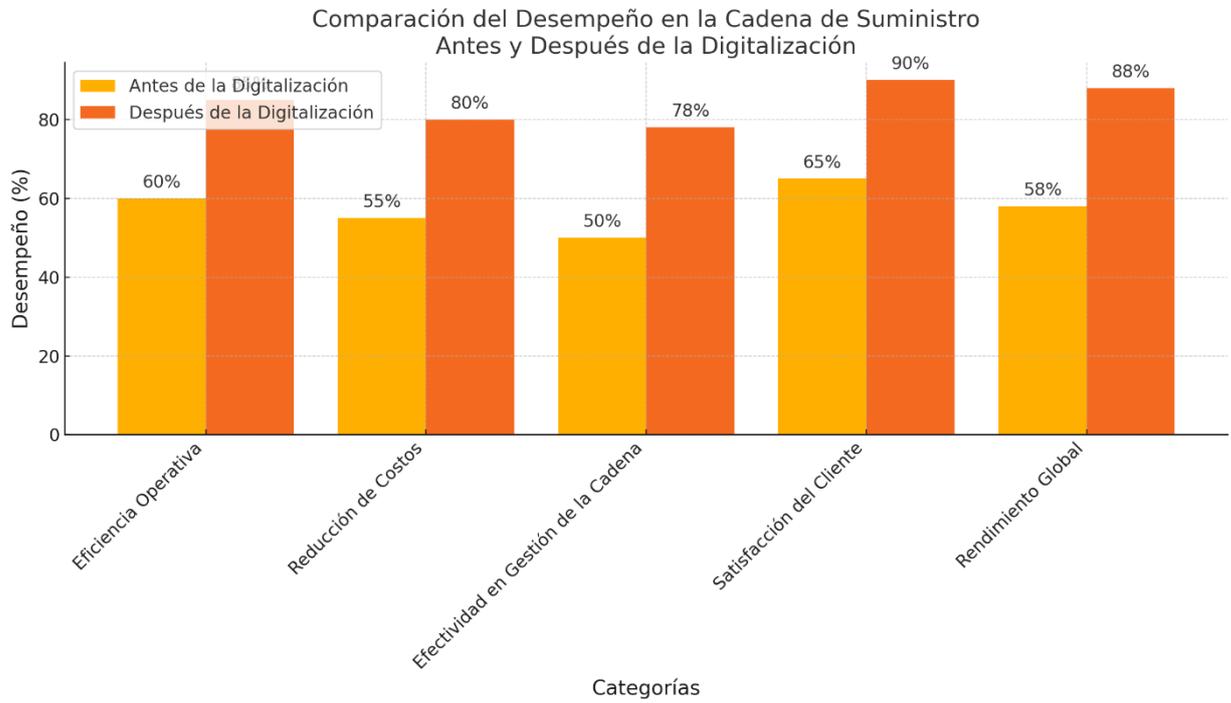


Gráfico 11. Comparativa de desempeños en la cadena de suministro. Elaboración propia a través de los datos de Saeed y Kersten 2019.

6. Desafíos y barreras para la implementación de la industria 4.0

Aunque la Industria 4.0 ha traído consigo numerosos beneficios y oportunidades para las cadenas de suministro, también ha presentado una serie de desafíos y barreras que las empresas deben superar para lograr una implementación exitosa.

Este apartado analiza los principales obstáculos que enfrentan las organizaciones al adoptar tecnologías de la Industria 4.0 en sus operaciones logísticas y de producción, respaldado por estudios académicos y literatura relevante que exploran estos desafíos.

6.1. Costos Iniciales y Retorno de Inversión

La implementación de tecnologías de la Industria 4.0 requiere una inversión significativa en infraestructura, hardware, software y capacitación. Estos costos iniciales pueden ser prohibitivos para muchas empresas, especialmente para las pequeñas y medianas empresas (PYMES), que pueden no tener los recursos financieros necesarios para acometer tal transformación.

Schoenherr y Speier-Peró (2015) argumentan que uno de los mayores desafíos para las empresas que buscan adoptar la Industria 4.0 es el alto costo de implementación. Esto incluye la compra de equipos avanzados, la actualización de infraestructuras tecnológicas, y la inversión en formación y desarrollo de habilidades para los empleados. Además, la incertidumbre sobre el retorno de la inversión (ROI) es una barrera significativa para la adopción de estas tecnologías. Las empresas a menudo encuentran difícil justificar los costos iniciales cuando los beneficios de la Industria 4.0 pueden no ser inmediatos y pueden tardar en materializarse. Esta incertidumbre puede desalentar a las organizaciones a realizar las inversiones necesarias para adoptar plenamente la Industria 4.0 (Müller et al., 2018).

6.2. Complejidad de la implementación

La integración de estas tecnologías en los sistemas existentes puede ser un proceso complicado y costoso, que requiere una planificación meticulosa y la reestructuración de procesos operativos.

Según Kache y Seuring (2017), uno de los mayores desafíos en la implementación de la Industria 4.0 es la integración de sistemas dispares y la gestión de grandes volúmenes de datos generados por IoT y big data. La falta de interoperabilidad entre los sistemas y la dificultad para integrar nuevos flujos de datos en infraestructuras existentes pueden llevar a ineficiencias y retrasos en la implementación. La adaptación de los procesos de producción y gestión para incorporar tecnologías avanzadas requiere una reestructuración significativa. Esto no solo implica la actualización de equipos y software, sino también la capacitación de la fuerza laboral para manejar estas nuevas tecnologías de manera efectiva. La resistencia al cambio y la falta de



habilidades especializadas son barreras adicionales que pueden dificultar la transición hacia la Industria 4.0 (Müller, Kiel, & Voigt, 2018).

6.3. Seguridad y Privacidad de los Datos

La digitalización de la cadena de suministro y la creciente conectividad entre dispositivos y sistemas han aumentado significativamente la vulnerabilidad de las empresas a los ciberataques y las brechas de seguridad. La ciberseguridad se ha convertido en una preocupación crítica para las organizaciones que adoptan tecnologías de la Industria 4.0, ya que un ataque cibernético puede tener consecuencias devastadoras para las operaciones y la reputación de la empresa.

Saeed y Kersten (2019) destacan que la proliferación de dispositivos conectados en la cadena de suministro ha creado nuevos puntos de entrada para los ciberataques. La falta de estándares de seguridad y la implementación deficiente de medidas de protección en dispositivos IoT pueden comprometer la seguridad de la red y exponer datos sensibles a amenazas externas.

La Industria 4.0 genera y gestiona grandes volúmenes de datos, lo que plantea desafíos en términos de protección de datos y cumplimiento de regulaciones como el Reglamento General de Protección de Datos (GDPR) en Europa. Las empresas deben asegurarse de que los datos sean gestionados de manera segura y que se cumplan todas las normativas relevantes para evitar sanciones y daños a la reputación (Kache & Seuring, 2017).

6.4. Normativa y gestión del impacto ambiental

El marco regulatorio para la Industria 4.0 aún está en desarrollo, y la falta de normativas claras y estándares globales puede dificultar la implementación de nuevas tecnologías. Las empresas deben navegar por un entorno normativo complejo que varía según la región y la industria.

Además, la interoperabilidad entre tecnologías y plataformas es un desafío cuando no existen estándares comunes, lo que puede llevar a problemas de integración y compatibilidad. La adopción de estándares internacionales, como los promovidos por organismos como ISO, es esencial para asegurar la cohesión y la eficiencia en la cadena de suministro digital.

Por otro lado, las empresas también se deben enfrentar el desafío de gestionar el impacto ambiental de estas tecnologías. Si bien la digitalización puede llevar a una mayor eficiencia operativa y una reducción en el uso de recursos, también plantea desafíos en términos de sostenibilidad.

Kache y Seuring (2017) destacan que la digitalización de la cadena de suministro puede generar un aumento en el consumo de energía y en la producción de residuos

electrónicos. Las empresas deben encontrar un equilibrio entre la adopción de tecnologías avanzadas y la gestión sostenible de sus operaciones para minimizar su impacto ambiental. Para abordar estos desafíos, las empresas deben implementar prácticas sostenibles que incluyan el uso de energías renovables, la economía circular y la gestión eficiente de los recursos. Esto no solo ayudará a mitigar el impacto ambiental, sino que también contribuirá a la responsabilidad social corporativa y a la mejora de la reputación empresarial (Müller et al., 2018).

6.5. Resistencia al Cambio Organizacional

La transición hacia la Industria 4.0 requiere un cambio cultural significativo dentro de las organizaciones. La resistencia al cambio por parte de la fuerza laboral y la falta de habilidades especializadas son desafíos clave que las empresas deben abordar para implementar con éxito tecnologías avanzadas.

Wamba y Akter (2015) señalan que la resistencia al cambio es una barrera común en la adopción de nuevas tecnologías. Los empleados pueden sentirse amenazados por la automatización y la digitalización, temiendo por su seguridad laboral. Esto puede llevar a una falta de compromiso y a la adopción ineficaz de las nuevas tecnologías. La falta de habilidades especializadas en áreas como la gestión de big data, la ciberseguridad y el manejo de sistemas automatizados es un desafío importante. Las empresas deben invertir en la capacitación y el desarrollo continuo de sus empleados para garantizar que cuenten con las habilidades necesarias para operar en un entorno de Industria 4.0 (Kache & Seuring, 2017). Esto incluye no solo la formación técnica, sino también el desarrollo de habilidades blandas que faciliten la adaptación al cambio.



7. Tendencias futuras y oportunidades

La cadena de suministro ha experimentado una transformación significativa con la incorporación de tecnologías emergentes. Sin embargo, a medida que estas tecnologías continúan evolucionando, surgen nuevas tendencias y oportunidades que prometen redefinir aún más las operaciones logísticas y la gestión de la cadena de suministro. En este apartado, se analizan las innovaciones emergentes, el futuro de la automatización, las perspectivas de la colaboración humano-máquina, el impacto de la Industria 5.0, y las nuevas habilidades y competencias que serán requeridas.

7.1. Innovaciones Emergentes

Las innovaciones tecnológicas han sido un motor clave para la mejora de la eficiencia en la cadena de suministro. Entre las más destacadas se encuentran la inteligencia artificial avanzada, la computación cuántica y los gemelos digitales. Estas tecnologías están comenzando a redefinir la manera en que las empresas gestionan sus operaciones, ofreciendo nuevas oportunidades para optimizar procesos y mejorar la toma de decisiones.

- **Inteligencia Artificial y Gemelos Digitales:** La inteligencia artificial (IA) se ha consolidado como una herramienta poderosa en la cadena de suministro, permitiendo predicciones más precisas y decisiones automatizadas. Los gemelos digitales, por su parte, permiten a las empresas crear réplicas virtuales de sus procesos físicos, lo que facilita la optimización en tiempo real (Schoenherr & Speier-Peró, 2015). Estas tecnologías, aunque aún en sus primeras etapas, prometen transformar la eficiencia operativa a través de simulaciones precisas y la capacidad de prever posibles fallos antes de que ocurran.
- **Computación Cuántica:** La computación cuántica es otra tecnología emergente con un potencial disruptivo significativo. A medida que esta tecnología avanza, se espera que revolucione la capacidad de procesamiento de datos complejos, permitiendo a las cadenas de suministro resolver problemas de optimización que actualmente son imposibles de abordar con las computadoras clásicas (Saeed & Kersten, 2019). Esto podría llevar a mejoras drásticas en áreas como la planificación de rutas y la gestión de inventarios.

7.2. Futuro de la Automatización

La automatización en la cadena de suministro no es un concepto nuevo, pero su futuro parece aún más prometedor con el avance de la robótica avanzada, los vehículos autónomos, y los sistemas automatizados de almacenamiento y recuperación (AS/RS).

Estos sistemas no solo mejoran la velocidad y precisión en las operaciones, sino que también ofrecen importantes reducciones en los costos operativos.

- **Robótica y Vehículos Autónomos:** Los robots colaborativos (cobots) y los vehículos autónomos están revolucionando la forma en que se gestionan los almacenes y el transporte de mercancías. Un estudio reciente mostró que la implementación de sistemas AS/RS puede reducir el tiempo de operación en un 30%, mientras que los vehículos autónomos están reduciendo significativamente los costos logísticos (Müller, Kiel, & Voigt, 2018).
- **Impacto Económico:** La adopción de estas tecnologías tiene un impacto económico positivo al reducir la dependencia de la mano de obra humana en tareas repetitivas y propensas a errores, lo que se traduce en una mayor eficiencia operativa y reducción de costos (Christopher & Ryals, 2014).

7.3. Perspectivas de la Colaboración Humano-Máquina

La colaboración entre humanos y máquinas es una de las tendencias más emocionantes en la cadena de suministro. A medida que las tecnologías como la IA y los cobots avanzan, la interacción entre trabajadores humanos y máquinas se vuelve cada vez más fluida y productiva. Esta colaboración permite combinar la adaptabilidad y creatividad humanas con la precisión y consistencia de las máquinas.

- **Colaboración Eficiente:** La integración de cobots en las líneas de producción ha demostrado aumentar la productividad en un 20%, al permitir que los trabajadores humanos se enfoquen en tareas de mayor valor añadido mientras que los cobots manejan las tareas repetitivas (Wamba & Akter, 2015). Esta simbiosis no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también reduce el riesgo de errores y mejora la calidad del producto final.
- **Desafíos y Oportunidades:** Sin embargo, esta tendencia también presenta desafíos, como la necesidad de una capacitación continua para los trabajadores humanos y la adaptación a un entorno de trabajo cada vez más tecnológico (Saeed & Kersten, 2019). Las empresas que logren equilibrar esta colaboración podrán aprovechar al máximo las capacidades de ambas partes.

7.4. Impacto de la Industria 5.0

Industria 5.0 representa una nueva dirección en la gestión empresarial, donde las tecnologías avanzadas se utilizan para empoderar a las personas y reducir la carga de trabajo impuesta por las máquinas. Esta revolución no solo impactará a todas las industrias, sino que abrirá un abanico de oportunidades ilimitadas para las empresas.

El término ha ganado popularidad en los últimos años, alineándose con una visión renovada y ambiciosa de los negocios y la economía, centrada en el valor social por



encima de las ganancias económicas. Desde la introducción de la robótica en los entornos industriales, las máquinas se han encargado de tareas peligrosas, repetitivas y monótonas. Sin embargo, con los avances tecnológicos, estas máquinas ahora son más inteligentes y están mejor conectadas.

Mientras que la Industria 4.0 se enfocaba en la automatización y la reducción de la intervención humana en la producción, la Industria 5.0 busca combinar la computación cognitiva con la creatividad y el ingenio humano. Este enfoque pone el bienestar humano y ambiental en el centro de las operaciones, utilizando tecnología avanzada no solo para mejorar la productividad, sino también para aliviar el estrés de los trabajadores.

Industria 5.0 adopta el mismo enfoque tecnológico que su predecesora, la Industria 4.0, pero con un objetivo más amplio: crear un entorno en el que los trabajadores prosperen y se fomente la producción circular y el uso eficiente de los recursos. Además, este enfoque prepara a las industrias para ser más resilientes ante impactos externos, aumentando así su competitividad y sostenibilidad.

Características de la Industria 5.0

Las industrias son un pilar fundamental para la economía y la prosperidad de cualquier país. En medio de la transición hacia la Industria 5.0, es crucial que las industrias lideren los cambios hacia un enfoque más humano, digital y sostenible. Las siguientes son algunas de las características clave de la Industria 5.0:

- **Fabricación Autónoma:** Se enfoca en aumentar la productividad y reducir los costos mediante la eliminación de tareas repetitivas, permitiendo a los trabajadores humanos centrarse en tareas estratégicas y creativas.
- **Enfoque en la Experiencia del Cliente:** Las empresas deben ofrecer experiencias personalizadas y comprometidas, utilizando la tecnología para mejorar la satisfacción del cliente y aumentar la retención.
- **Hiperpersonalización:** La Industria 5.0 permite a las empresas adaptar productos y servicios a las necesidades específicas de cada cliente, utilizando big data para ajustar la oferta en tiempo real.
- **Productos Personalizados:** Con la personalización, los productos pueden alinearse mejor con las preferencias individuales, lo que fortalece las relaciones con los clientes y aumenta las ventas.
- **Cadena de Suministro Receptiva:** Una cadena de suministro flexible puede adaptarse rápidamente a los cambios en la demanda, mejorando la eficiencia y reduciendo los costos.

- **Productos Interactivos:** Integrar sistemas interactivos permite a los clientes experimentar un producto antes de comprarlo, lo que aumenta la satisfacción y las ventas.
- **Centrado en el Ser Humano:** Este enfoque prioriza el bienestar de los trabajadores, ajustando las operaciones para mejorar la calidad de vida de los empleados y satisfacer las necesidades de los clientes.
- **Resiliencia:** La capacidad de las empresas para adaptarse a interrupciones y cambios es crucial en la Industria 5.0, asegurando su éxito a largo plazo.
- **Sostenibilidad:** Este enfoque no solo busca reducir el impacto ambiental, sino también mejorar la eficiencia de los recursos y la moral de los empleados.
- **Valor Social:** La Industria 5.0 pone el valor social en el centro de la producción, minimizando la contaminación y los residuos, y promoviendo procesos productivos circulares.
- **Artesanía y Toque Humano:** La combinación de habilidades humanas y robótica colaborativa permite una producción más creativa y personalizada, lo que mejora la calidad y el valor de los productos.
- **Robots Colaborativos:** Los cobots liberan a los trabajadores de tareas monótonas, permitiéndoles concentrarse en actividades más innovadoras y estratégicas.

Industria 5.0 está diseñada para hacer que la producción sea más sostenible y centrada en el ser humano, respetando los límites del planeta y mejorando la competitividad empresarial. Esta revolución no solo transforma la manera en que las empresas operan, sino que también redefine el papel de las industrias en la sociedad, alineando el crecimiento económico con la responsabilidad social y ambiental. (Christopher & Ryals, 2014).



8. Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo sintetizan los hallazgos principales, discuten las implicaciones para la industria, ofrecen recomendaciones para las empresas y sugieren áreas de investigación futura en el contexto de la Industria 4.0 y su impacto en la cadena de suministro.

8.1. Resumen de hallazgos principales

Este trabajo ha explorado cómo la Industria 4.0 ha transformado la cadena de suministro a través de la adopción de tecnologías avanzadas como IoT, big data, inteligencia artificial y automatización. Los hallazgos principales destacan una mejora significativa en la eficiencia operativa y una reducción de costos, logradas gracias a la optimización de procesos, la automatización y la mejora en la previsión de la demanda. Sin embargo, también se han identificado desafíos clave, como la complejidad en la implementación de estas tecnologías, los altos costos iniciales de inversión, la resistencia al cambio dentro de las organizaciones y la creciente preocupación por la ciberseguridad.

Además, se ha enfatizado la importancia de integrar prácticas sostenibles en la cadena de suministro digitalizada, subrayando que la Industria 4.0 no solo debe enfocarse en la eficiencia económica, sino también en la responsabilidad social y ambiental. La capacidad de innovar y adaptarse a las demandas cambiantes del mercado ha surgido como un factor crucial para el éxito a largo plazo de las empresas en un entorno cada vez más competitivo.

8.2. Implicaciones para la industria

Los hallazgos de este trabajo tienen importantes implicaciones para la industria. La adopción de la Industria 4.0 es esencial para que las empresas permanezcan competitivas en el mercado global. La eficiencia operativa mejorada y la reducción de costos permiten a las organizaciones ofrecer productos y servicios de mayor calidad a precios más competitivos. Sin embargo, para capitalizar estos beneficios, las empresas deben superar las barreras tecnológicas, culturales y financieras asociadas con la implementación de estas nuevas tecnologías.

Además, la creciente importancia de la sostenibilidad implica que las empresas deben integrar prácticas sostenibles en sus operaciones diarias para cumplir con las expectativas de los consumidores y las regulaciones gubernamentales. Esto no solo mejorará la reputación de la empresa, sino que también contribuirá a la resiliencia a largo plazo de la organización frente a desafíos ambientales y sociales.

8.3. Recomendaciones para empresas

A partir de los hallazgos y las implicaciones de este estudio, se recomienda a las empresas que busquen adoptar la Industria 4.0 en sus cadenas de suministro que inviertan tanto en tecnología como en la capacitación de su personal. La formación continua en áreas clave como big data, ciberseguridad y gestión de sistemas automatizados es esencial para mantenerse competitivos. Además, es crucial que las empresas desarrollen una estrategia clara para la integración de nuevas tecnologías, asegurando una transición suave que minimice interrupciones en las operaciones. La sostenibilidad también debe ser una prioridad; integrar prácticas sostenibles no solo responde a las demandas sociales y regulatorias, sino que también fortalece la competitividad a largo plazo. Finalmente, dado el creciente riesgo de ciberataques, se recomienda priorizar la ciberseguridad mediante la implementación de protocolos robustos y auditorías regulares.

8.4. Áreas de investigación futuras

Las tendencias futuras en la cadena de suministro, impulsadas por innovaciones tecnológicas y el avance hacia Industria 5.0, presentan tanto desafíos como oportunidades para las empresas. La adopción de nuevas tecnologías, la automatización avanzada y la colaboración humano-máquina no solo mejorarán la eficiencia operativa, sino que también crearán valor adicional a través de la personalización y la sostenibilidad. Sin embargo, para capitalizar estas tendencias, las empresas deben invertir en el desarrollo de nuevas habilidades y competencias, asegurando que su fuerza laboral esté preparada para el futuro.



9. Estudio económico

El objetivo de este apartado es evaluar el coste económico y de tiempo asociado al desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster. Se analizarán los recursos humanos y materiales involucrados, las fases del proyecto, y los costes correspondientes, para obtener un cálculo detallado del coste total del proyecto. Esto permitirá comprender el esfuerzo económico requerido para llevar a cabo el trabajo y optimizar recursos en futuros proyectos similares.

9.1. Fases del proyecto – Coste de tiempo

Para la realización de este proyecto, se ha llevado a cabo un conjunto de tareas, que se describirán a continuación. Asimismo, se presentará una evaluación detallada del tiempo invertido en cada una de ellas.

Tabla 2. Coste de tiempo para la realización del TFM. Elaboración propia.

ACTIVIDADES	HORAS
Interpretar y entender detalladamente la normativa que rige el TFM	1
Elegir, delimitar y definir claramente el tema o área de estudio del TFM.	1
Establecer los objetivos específicos de la investigación	10
Desarrollar un plan de investigación y diseñar la metodología adecuada.	5
Realizar investigaciones en archivos o consultar fuentes primarias relevantes.	50
Tomar notas detalladas y organizadas sobre las lecturas e investigaciones.	50
Estructurar y organizar las ideas y contenidos que se van a desarrollar en el documento.	30
Recuperar, adaptar, diseñar o crear las figuras, tablas o anexos necesarios para el TFM.	20
Procesar, interpretar y analizar los datos obtenidos durante la investigación.	20
Sintetizar, relacionar y desarrollar las ideas clave que sustentan el argumento del TFM.	20
Asegurar que todas las citas y referencias cumplen con las normas APA	5
Total <i>Horas</i> destinadas el TFM	212

9.2. Material utilizado – Coste económico

Para la realización de este trabajo se han utilizado materiales tangibles que han supuesto un coste económico, entre ellos se encuentran:

Tabla 3. Coste económico del trabajo. Elaboración propia.

Concepto	Coste (€)
Internet	20
Electricidad	50
Coste Matrícula	158
TOTAL	228

La realización de este Trabajo de Fin de Máster (TFM) ha implicado un considerable esfuerzo en tiempo y estudio. En cuanto al coste económico, el proyecto ha requerido una inversión total de 228 euros, que incluye gastos directos como internet, electricidad y la matrícula correspondiente al curso. A pesar de esta inversión económica ajustada, se ha logrado acceder a recursos esenciales, incluyendo bases de datos, y otros materiales necesarios para la investigación, lo que ha sido clave para el desarrollo del trabajo.

En lo que respecta al tiempo, la ejecución de este TFM ha requerido aproximadamente una inversión de 212 horas distribuidas a lo largo de las diversas fases del proyecto. Este tiempo ha sido empleado en una serie de actividades fundamentales, tales como la interpretación de la normativa del TFM, la selección y delimitación del tema de estudio, la formación en técnicas metodológicas, y la redacción y edición del documento final. Sin embargo, es importante destacar que la parte más costosa, tanto en tiempo como en esfuerzo, ha sido la búsqueda y análisis de información, así como la estructuración del trabajo. La búsqueda de información ha implicado una revisión exhaustiva de la literatura existente, la consulta de múltiples fuentes primarias y secundarias, y la evaluación crítica de la relevancia y fiabilidad de los datos recopilados. Este proceso no solo ha sido laborioso, sino también crucial para asegurar que la investigación se fundamenta en bases sólidas y que aborda de manera efectiva la influencia de las nuevas tecnologías en la cadena de suministro.

La estructuración del trabajo, por su parte, ha requerido un esfuerzo considerable para organizar las ideas y los contenidos de manera coherente y lógica. Esto ha implicado no solo la redacción de cada sección, sino también la revisión continua y la reestructuración del contenido para asegurar que el argumento central del TFM se presenta de manera clara y convincente.



En resumen, aunque el coste económico del TFM ha sido relativamente bajo, la verdadera inversión se encuentra en el tiempo y esfuerzo dedicados a las etapas de búsqueda, análisis de información, y estructuración del trabajo.

Referencias

Administradora. (2017, 29 marzo). QFD LA CASA DE LA CALIDAD: herramienta de planificación del diseño. Contauditorizate. <https://contauditorizate.wordpress.com/2017/03/29/qfd-la-casa-de-la-calidad-herramienta-de-planificacion-del-diseno/>

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787-2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>

Bhutta, K. S., & Huq, F. (2021). Benchmarking – Best Practices in Manufacturing Companies. *Benchmarking: An International Journal*

Bolstorff, P., & Rosenbaum, R. (2011). *Supply Chain Excellence: A Handbook for Dramatic Improvement Using the SCOR Model (3rd ed.)*. AMACOM.

Borgia, E. (2014). The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues. *Computer Communications*

Breivold, H. P., & Sandström, K. (2015). Internet of Things for Industrial Automation – Challenges and Technical Solutions. 2015 IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems

Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*, 8(1), 37-44. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1336426>

Chopra, S., & Meindl, P. (2016). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation (6th ed.)*. Pearson.

Christopher, M. (2016). *Logistics & Supply Chain Management*. Pearson UK.

Christopher, M., & Ryals, L. (2014). Supply Chain Strategy: Its Impact on Shareholder Value. *International Journal of Logistics Management*.

Coyle, J. J., Langley, C. J., Novack, R. A., & Gibson, B. J. (2016). *Supply Chain Management: A Logistics Perspective (10th ed.)*. Cengage Learning.

Diadepesca. (2021, 6 noviembre). Diagrama de ishikawa: ejemplos de empresas | Dia De Pesca. Dia de Pesca. <https://diadepesca.com.ar/espina-de-pescado-ejemplo-de-una-empresa/>

El Makrini, I., Vergnano, A., & de Backer, E. (2019). "Impact of Advanced Robotics in Manufacturing Systems: A Case Study". *Journal of Manufacturing Technology Management*.



Referencias

Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., ... & Zavattieri, P. D. (2015). "The Status, Challenges, and Future of Additive Manufacturing in Engineering". *Journal of Manufacturing Science and Engineering*.

Geissbauer, R., Schrauf, S., Koch, V., & Kuge, S. (2014). *Industry 4.0: Opportunities and Challenges of the Industrial Internet*. PwC Report. Retrieved from <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industry-4.0.html>

George, M.L. (2002). *Lean Six Sigma: Combining Six Sigma Quality with Lean Speed*. McGraw-Hill.

George, M.L., Rowlands, D., Price, M., & Maxey, J. (2005). *The Lean Six Sigma Pocket Toolbook: A Quick Reference Guide to 100 Tools for Improving Quality and Speed*. McGraw-Hill Education.

Goldratt, E. M. (1990). *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*. North River Press.

Gupta, M., & Boyd, L. (2008). *Theory of Constraints: A Theory for Operations Management*. *International Journal of Operations & Production Management*.

Gutierrez, A., Kothari, A., Mazuera, C., & Schoenherr, T. (2020, 7 julio). Taking supplier collaboration to the next level. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/taking-supplier-collaboration-to-the-next-level>

Hernández, J. (2023, 7 septiembre). Análisis de procesos con SIPOC. Agile Experience - Curso Scrum Master - Formación Con Certificación Oficial. <https://agileexperience.es/2019/12/30/analisis-de-procesos-con-sipoc/>

Home, P. (2013, 17 mayo). Cómo calcular el nivel de calidad sigma de un proceso – PDCA Home. <https://www.pdcahome.com/4466/calcular-el-nivel-sigma-del-proceso/>

Hugos, M. H. (2018). *Essentials of Supply Chain Management (4th ed.)*. Wiley.

ISO 9001: qué es y quién la certifica - Ferrovial. (2024, 16 junio). Ferrovial. <https://www.ferrovial.com/es-es/sostenibilidad/social/usuarios-clientes/certificaciones/iso-900>

J. F., & Schleier, J. G. (2010). *Theory of Constraints Handbook*. McGraw-Hill.

Jordan, M. I., & Mitchell, T. M. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349(6245), 255-260. <https://doi.org/10.1126/science.aaa8415>

Kache, F., & Seuring, S. (2017). Challenges and Opportunities of Digital Information at the Intersection of Big Data Analytics and Supply Chain Management. *International Journal of Operations & Production Management*.

Referencias

Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group.

Khan, A., & Estay, C. (2021). Cybersecurity in supply chain management: a critical review and future directions. *Supply Chain Management: An International Journal*

Lee, H. L. (2002). Aligning supply chain strategies with product uncertainties. *California Management Review*, 44(3), 105-119.

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>

López-Cano, E. (2023). Capítulo 11: Diseño de experimentos. En *Estadística Aplicada a las Ciencias y la Ingeniería*. Recuperado de <https://emilopezcano.github.io>

Lorenzo, A. (2024, 11 abril). Amazon invierte más de 700 millones en robótica e Inteligencia Artificial sólo en Europa. *elEconomista.es*. <https://www.eleconomista.es/tecnologia/noticias/12763161/04/24/amazon-invierte-mas-de-700-millones-en-robotica-e-inteligencia-artificial-solo-en-europa.html>

Manyika, J., Chui, M., Brown, B., Bughin, J., Dobbs, R., Roxburgh, C., & Byers, A. H. (2011). Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity.

Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1-25. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x>

Monczka, R. M., Handfield, R. B., Giunipero, L. C., & Patterson, J. L. (2016). *Purchasing and Supply Chain Management* (6th ed.). Cengage Learning.

Montgomery, D. C. (2021). *Introduction to Statistical Quality Control* (8th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

Montgomery, D.C. (2012). *Introduction to Statistical Quality Control*. Wiley

Moore, D.S., McCabe, G.P., & Craig, B.A. (2017). *Introduction to the Practice of Statistics* (9th Edition). W.H. Freeman.

Müller, J. M., Kiel, D., & Voigt, K. I. (2018). What Drives the Implementation of Industry 4.0? The Role of Opportunities and Challenges in the Context of Sustainability. *Sustainability*.

Nee, A. Y. C., Ong, S. K., Chryssolouris, G., & Mourtzis, D. (2012). "Augmented Reality Applications in Design and Manufacturing". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*.



Referencias

Priore, P., de la Fuente, D., Pino, R., & Parreño, J. (2019). Applying machine learning to the dynamic selection of replenishment policies in fast-changing supply chain environments. *International Journal of Production Research*

Pyzdek, T., & Keller, P. (2014). *The Six Sigma Handbook, Fourth Edition*. McGraw-Hill Education.

Rooney, J.J., & Vanden Heuvel, L.N. (2004). *Root Cause Analysis for Beginners*. Quality Progress.

Rother, M., & Shook, J. (2003). *Learning to See: Value Stream Mapping to Create Value and Eliminate MUDA*. Lean Enterprise Institute.

Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). "Blockchain Technology and Its Relationships to Sustainable Supply Chain Management". *International Journal of Production Research*.

Saeed, N., & Kersten, W. (2019). The influence of digital transformation on supply chain performance: A comparative case study analysis. *Supply Chain Management Review*.

SafetyCulture. (2024). Diseño experimental o de experimentos (DoE). SafetyCulture. Recuperado de <https://safetyculture.com>

Schoenherr, T., & Speier-Peró, C. (2015). Data Science, Predictive Analytics, and Big Data in Supply Chain Management: Current State and Future Potential. *Journal of Business Logistics*.

Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Crown Business.

Shillito, M. L. (2021). *Advanced QFD Applications for Lean Product Development*. Boca Raton, FL: CRC Press.

Slack, N., Chambers, S., & Johnston, R. (2010). *Operations Management (6th ed.)*. Pearson.

Stevenson, W. J. (2018). *Operations Management (13th ed.)*. McGraw-Hill Education.

Supply Chain Council. (2005). *Supply Chain Operations Reference Model (SCOR): Version 8.0*. Supply Chain Council Inc.

Taguchi, G., & Jugulum, R. (2002). *The Mahalanobis-Taguchi Strategy: A Pattern Technology System*. Wiley.

Tian, F. (2016). An agri-food supply chain traceability system for China based on RFID & blockchain technology. 13th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2016.7538424>

Referencias

Tools, D. (2018, 6 mayo). Revolución Industrial – De Industria 1.0 a Industria 4.0. Desoutter Industrial Tools. <https://www.desouttertools.mx/su-industria/noticias/%7Bidentificaci%C3%B3n%7D/revolucion-industrial-de-industria-1-0-a-industria-4-0?id=1015>

Waddell, K., & Island, R. (2019). Practical Guide to Root Cause Analysis: Using Ishikawa Diagrams for Business Process Improvement. Business Expert Press.

Wamba, S. F., & Akter, S. (2015). Big Data Analytics in Supply Chain Management: A Resource-Based View. International Journal of Production Economics.

Wamba, S. F., Akter, S., Edwards, A., Chopin, G., & Gnanzou, D. (2015). "How 'Big Data' Can Make Big Impact: Findings from a Systematic Review and a Longitudinal Case Study". International Journal of Production Economics.

Wang, H., & Oliveira, M. (2020). Computer Simulation Techniques in Engineering: Tools for Decision Making. Wiley.

Wang, Y., Han, J. H., & Beynon-Davies, P. (2019). Understanding blockchain technology for future supply chains: A systematic literature review and research agenda.

Westerman, G., Bonnet, D., & McAfee, A. (2014). Leading digital: Turning technology into business transformation. Harvard Business Review Press.

Xu, L., He, W., & Li, S. (2014). "Internet of Things in Industries: A Survey". Journal of Manufacturing Systems.

Zairi, M. (2020). Effective Benchmarking: A Management Guide for Industry Leaders. New York, NY: Springer.

Zhao, J., & Wu, Q. (2021). Big Data Analytics in Supply Chain Management: Trends and Opportunities. Journal of Supply Chain Management Science.