



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

INFORME FINAL SEMESTRE SABÁTICO

**“Simulación de estrategias integradas de mejora continua e
Industria 4.0 en procesos productivos”**

M.C. Rosa Hilda Félix Jácquez

Febrero 2023

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 Definición del problema	5
1.2 Justificación	5
1.3 Objetivos.....	6
1.4 Materiales y Métodos	6
2. REVISIÓN DE LITERATURA	8
2.1 El contexto de Lean Manufacturing	8
2.2 Industria 4.0	11
2.2.1 La primera revolución industrial: la mecanización	11
2.2.2 La segunda revolución industrial: la energía eléctrica.....	12
2.2.3 La tercera revolución industrial: la automatización	12
2.2.4 La cuarta revolución industrial: la digitalización	13
2.3 Modelado de simulación de eventos discretos.	16
2.4 Investigaciones de mejores prácticas de LM e I4.0.....	17
3. ANÁLISIS CRÍTICO	21
3.1 Integración de los conceptos LM e I4.0	21
4. APLICACIÓN Y PROPUESTA DE UN CASO DE ESTUDIO	27
4.1 Descripción de las operaciones	29
4.2 Documentación del proceso	29
4.3 Mapa de la cadena de valor, VSM	31
4.4 Elementos de los Modelos de simulación	32
4.5 Representación de los Modelos de simulación	33
4.6 Integración de estrategias de LM e I4.0 en los modelos de simulación.....	35
5. RESULTADOS	37
5.1 Estadísticos de los modelos de simulación.	37
5.2 Discusión de resultados.....	42
6. CONCLUSIONES	44
7. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	45
Anexo 1	52
Anexo 2	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pasos para la implementación de LM.....	11
Figura 2. Las cuatro revoluciones industriales. Fuente: (Vaidya et al., 2018).....	14
Figura 3 Pasos para la implementación de Industria 4.0	16
Figura 4. Las relaciones entre LM y las tecnologías de la Industria 4.0.	22
Figura 5. Mapa de la cadena de Valor actual VSM	31
Figura 6. Modelo de simulación, escenario 1. Elaboración propia.....	33
Figura 7. Modelo de simulación, escenario 2. Elaboración propia.....	34
Figura 8. Modelo de simulación, escenario 3. Elaboración propia.....	34
Figura 9. Modelo de simulación, escenario 4. Elaboración propia.....	35
Figura 10. Modelo de simulación, escenario 5. Elaboración propia.....	35

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Publicaciones relacionadas con LM e Industria 4.0	19
Tabla 2. Modelos de simulación y descripción de los escenarios.....	32
Tabla 3. Modelos de simulación con el Diseño de estrategias de LM e Industria 4.0	36
Tabla 4. Tiempos promedio del estado del motor.	38
Tabla 5. Tiempos promedio del estado de los materiales.	39
Tabla 6. Porcentaje de tiempos por escenario.....	40
Tabla 7. Resumen de resultados de porcentaje de tiempos de los materiales.....	40
Tabla 8. Análisis de los modelos de simulación estudiados.	41

1. INTRODUCCIÓN

Los cambios que se han presentado a través del tiempo en la sociedad han dejado su huella en el desarrollo industrial. Hoy en día, como resultado del desarrollo acelerado de tecnologías disruptivas en años recientes, las empresas industriales están buscando soluciones para adaptar sus sistemas de fabricación, gestión y negocio a la creciente demanda de los clientes [1].

Una filosofía actual que las empresas están utilizando para la mejora de sus procesos es la manufactura esbelta, llamada también "Lean". Esta se define como un conjunto de principios, técnicas y herramientas de gestión de la producción que busca la mejora continua a través de eliminar o reducir el desperdicio [2]. El propósito de implementar esta filosofía de manufactura consiste en aumentar la eficiencia del sistema de fabricación mediante la eliminación de actividades que no agregan valor asegurando un flujo de fabricación continuo, aumentando la calidad y acortando el tiempo de entrega del producto requerido por el cliente [1].

Además, con los avances tecnológicos, desarrollos e innovaciones, la revolución industrial ha evolucionado a la cuarta revolución industrial que tiene como objetivo transformar las industrias tradicionales en inteligentes mediante la incorporación de tecnologías innovadoras. La Industria 4.0 permite que los activos físicos se integren en procesos digitales y físicos entrelazados, creando así fábricas inteligentes y entornos de fabricación inteligentes [3]. En este sentido, las empresas están invirtiendo cada vez más en herramientas y soluciones que permiten que sus procesos, máquinas, empleados e incluso los propios productos se integren en una única red integrada para la recopilación de datos, el análisis de datos y la evaluación del desarrollo y mejora del rendimiento de las empresas [4].

Investigaciones estudiadas destacan que los principios de Industria 4.0 y la manufactura esbelta, potenciados con cadenas de suministro globales, pueden entrelazarse para apoyar el desarrollo de la empresa generando efectos positivos en la productividad, la eficiencia y el desempeño [1][5][6].

Esta investigación como estudio exploratorio subraya la necesidad de encontrar estrategias de procesos de fabricación integrando sistemas de manufactura esbelta

eficientes soportados con procesos inteligentes de Industria 4.0 , con el propósito de transferir conocimiento acerca de los beneficios que se logran con la integración de los estos elementos, representados en escenarios a través de modelos de simulación, para tener una visión de su integración, y así desarrollar sistemas de producción avanzada.

El presente documento tiene la siguiente estructura: la Sección 1 que corresponde a la Introducción, donde se provee la descripción del contexto de la ocurrencia de los conceptos, Lean e industria 4.0. La Sección 2 incluye un resumen del estado del arte de las mejores prácticas de las estrategias en estudio, así como los puntos de vista de la posibilidad de interconectarlos en el ambiente industrial. La Sección 3 está basada en el análisis de los elementos clave de estrategias de manufactura actual. A través de un enfoque conceptual se presenta un marco de integración Lean e industria 4.0, destacando los efectos favorables sobre la producción en el entorno industrial. La Sección 4 representa el carácter aplicativo del trabajo a través de un caso de estudio llevando a cabo una propuesta de integración de Lean en el campo de la remanufactura, mejorando el proceso con el soporte de técnicas integradas de industria 4.0 y representadas en modelos de simulación de eventos discretos.

La Sección 5 tiene como objetivo validar los resultados estadísticos de los modelos estudiados y las discusiones. Finalmente, en la Sección 6 se presentan las conclusiones del proyecto, así como algunas propuestas de las futuras líneas de investigación.

1.1 Definición del problema

Las industrias manufactureras están cambiando rápidamente hacia un paradigma orientado a procesos en un entorno inteligente y conectado que les permita configurar estrategias de gestión eficiente para maximizar el rendimiento de los sistemas de manufactura. En este contexto, el dilema de las empresas se presenta cuando se analizan las estrategias de incursionar en tecnologías avanzadas o dirigir sus esfuerzos hacia la mejora continua. Es decidir qué es primero, tecnología o mejora; automatizar u optimizar

1.2 Justificación

Se espera que este trabajo de investigación sea una aportación de información y metodologías que ayuden a los directivos industriales a la toma de decisiones del abanico de posibilidades al incursionar en entornos inteligentes que se pueden agregar a sistemas de mejora continua para la eficiencia de los procesos.

Así mismo, con la propuesta de este proyecto, se busca que pueda contribuir al conocimiento de las disciplinas que aquí se integran, y que contribuya a las direcciones futuras de esta investigación interdisciplinaria.

Los beneficios que las organizaciones obtendrán se reflejarán en la oferta de una guía detallada a las empresas industriales en su proceso de diseño de estrategias que vinculen el proceso de manufactura con la industria 4.0, y consecuentemente puedan obtener resultados de desempeño eficientes y además rentables.

1.3 Objetivos

Objetivo general. Simular mediante modelos o prototipos las estrategias de la manufactura esbelta en los procesos de fabricación en el contexto de la industria 4.0.

Objetivos específicos:

- Definir un sistema con las características y elementos apropiadas
- Representar las estrategias de manufactura esbelta (LM)
- Seleccionar las herramientas de Industria 4.0 para integrar en el modelo
- Desarrollar el modelo de simulación integrando LM e Industria 4.0
- Realizar el análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados.
- Obtener las conclusiones y la discusión de los resultados

1.4 Materiales y Métodos

El desarrollo de la investigación sobre el análisis actual de los dos conceptos en estudio (Lean e Industria 4.0) partió de la necesidad de estudiar la integración y el comportamiento de ambos conceptos a través de un modelo de simulación que

podiera representar la interdependencia y correlación entre ambos. Adaptar las fábricas existentes mediante la introducción de tecnologías de la Industria 4.0 y la mejora continua a través de sistemas flexibles es un desafío para muchos gerentes en términos de enfoque estratégico.

Esta investigación se orientó hacia la revisión de la literatura sobre estudios del marco conceptual, así como metodologías y modelos que se han desarrollado para la integración LM-I4.0 con aplicabilidad en unidades productivas modernas. Con el propósito de encontrar nuevas oportunidades para elaborar e implementar un modelo de integración, se formularon los siguientes objetivos de investigación a través de un enfoque sistémico:

- Un estudio de literatura sobre el desarrollo e implementación de herramientas Lean y tecnologías de Industria 4.0 y una síntesis de los artículos más relevantes de los últimos años.
- Análisis de modelos de integración de los dos sistemas, Lean e Industria 4.0, con el fin de ofrecer un marco adecuado para la mejora productiva.
- Aplicar y validar el modelo conceptual sobre la implementación de la filosofía Lean y la Industria 4.0 mediante el diseño de modelos de simulación de un caso de estudio.
- Conclusiones y futuras líneas de investigación.

La revisión de literatura se realizó con base en recursos, tales como libros, colecciones de artículos publicados en revistas especializadas y publicados en congresos internacionales. Así, en el caso de estudio, se implementó el paquete de software ProModel para analizar y evaluar el desempeño de un sistema a través del modelado y simulación, en este caso de un sistema de remanufactura de componentes de la industria ferroviaria. El software EDraw Max se utilizó para mapear y analizar el mapa de flujo de valor para ofrecer soluciones Lean con el fin de mejorar los procesos de la cadena de valor y la aplicación en la Industria 4.0.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

Este apartado contempla la revisión de la literatura de los temas a investigar. Se contempla la revisión de artículos, journals y estudios de aplicación en revistas, libros y publicaciones internacionales durante los últimos 5 años. La revisión de literatura realizada proporciona información sobre los conceptos, principios y características de las disciplinas de Lean Manufacturing, Simulación de eventos discretos, y las tecnologías de la Industria 4.0.

2.1 El contexto de Lean Manufacturing

El término Lean Manufacturing o Manufactura esbelta (LM) se conoce por primera vez en un proyecto de investigación del Massachusetts Institute of Technology (MIT), para conocer las mejores prácticas de las industrias automotrices a nivel global [7]. Este grupo encontró que Toyota tenía prácticas que podían ser compartidas, publicando el aprendizaje en la obra titulada "La máquina que cambió al mundo".

LM es una filosofía empresarial moderna que se concentra en reducir el desperdicio en los procesos operativos con el fin de que estos sean lo más eficientes posible. Esta filosofía ha sido desarrollada por Toyota [7], y ha sido producto de la combinación del contexto histórico, la cultura nacional y la cultura de Toyota. Ha generado un creciente interés por los excelentes resultados que se han alcanzado a través de su implementación, no solamente en Toyota [8], sino en varias compañías de distintos países del mundo y sectores industriales . Para lograr este objetivo es necesario tener una mirada general que permita localizar las verdaderas causas raíz del desperdicio. En un contexto amplio, que comprenda a LM como una herramienta sistémica, se logrará importantes resultados de productividad. Cada herramienta de LM tiene un impacto específico en el desempeño global de la compañía y esta relación debe ser comprendida y aplicada a la medida y las necesidades de esta.

La manufactura esbelta es una práctica de producción que considera que el gasto de recursos para cualquier objetivo que no sea la creación de valor para el cliente final es un desperdicio [8]. Desperdicio es cualquier ineficiencia en el uso de equipo, material, trabajo, o capital.

La filosofía de LM se basa en la eliminación del desperdicio o de actividades que no agregan valor. Las actividades de valor agregado son aquellas operaciones que transforman, convierten o cambian un producto y por las cuales el cliente está dispuesto a pagar. Por otra parte, se consideran actividades de no valor agregado aquellas que no resultan en un cambio o transformación del producto, que el cliente no está dispuesto a pagar por ellas [9].

El secreto del éxito de Toyota se debe a su excelencia operacional, la cual se convirtió en su arma estratégica y está basada en metodologías de mejora de la calidad, tales como just-in-time, Kaizen, flujo pieza a pieza, Jidoka y heijunka [10]. Dichas herramientas contribuyeron a la expansión de la revolución de LM, pero el uso de estas por si solas no es suficiente, además de ello Toyota requirió de una filosofía fundamentada en desarrollar el liderazgo, los equipos y la cultura, con el fin de planificar una estrategia para formar relaciones con los proveedores y para conservar una cultura de aprendizaje [10].

En el diagrama de la casa TPS de Liker (2004), se encuentra en su base los principios que constituyen la esencia del trabajo y que deben encontrarse en todos los procesos, a saber, la filosofía del modelo Toyota (que incluye visión a largo plazo, respeto por las personas y aprendizaje continuo), gestión visual, uso de procesos estables y estandarizados y producción fluida (heijunka). En el diagrama TPS el primer pilar representa el Just-in-time, es decir, producir exactamente lo que se necesita cuando el usuario o estación de trabajo o cliente lo necesita. El segundo pilar es Jidoka, que significa construir calidad en el producto detectando anomalías en el proceso. En el centro están los principios de la mejora continua, incluidos los empleados y el trabajo en equipo, así como la reducción de desperdicios. Finalmente, lo más importante son los objetivos de mejor calidad, menores costos posibles, menor tiempo de ciclo, mejor seguridad y alta motivación en los empleados.

Se presenta a continuación, la descripción de las principales herramientas utilizadas en la metodología de la implementación de LM.

Kaizen: Término acuñado en Japón, se considera un sinónimo de mejora continua, la búsqueda incesante de mejores niveles de desempeño en materia de calidad, costo, tiempo de respuesta, velocidad de ciclo, productividad, seguridad y flexibilidad entre

otros [9]. Es la acumulación gradual de muchos pequeños mejoramientos hechos por todos los miembros de la empresa [11].

Mapas de la Cadena de Valor VSM: son representaciones gráficas del flujo de información y de materiales, desde que se coloca la orden, pasando por los proveedores, hasta que el material llega a la empresa para ser transformado y finalmente se despacha el producto terminado a los clientes [12],

El objetivo principal de estos mapas es el de resaltar oportunidades de mejoramiento mostrando los puntos en los que se desperdicia tiempo a través de la existencia de inventarios en proceso y demoras innecesarias [12],[13].

5S: De la misma forma en que Kaizen aporta la disciplina del mejoramiento continuo, 5S es el fundamento de la cultura de manufactura esbelta. 5S viene de cinco palabras japonesas que han sido utilizadas para mostrar una evolución desde el orden y la limpieza del sitio de trabajo hasta la disciplina personal [14].

Trabajo estándar: En procesos que buscan la mejora continua, es necesario generar y seguir procedimientos operativos estandarizados. Los estándares facilitan la incorporación del conocimiento individual en el acervo de la empresa, además de posibilitar el entrenamiento de nuevos trabajadores y los análisis de procesos para mejoramiento continuo [5]

Takt time: La palabra Takt viene del alemán taktzeit que significa ritmo, compás; hablando en términos para la ingeniería industrial es tiempo de ciclo, pero a diferencia del tiempo de ciclo que se conoce, este mide el ritmo de trabajo en una planta de manufactura [15].

La aplicación del concepto de LM en distintas organizaciones ha mostrado las diferencias entre las actividades que crean valor y las que generan desperdicio para desarrollar productos y servicios innovadores y satisfacer las demandas de los clientes [1].

Desde que se inició el estudio de la filosofía Lean, los autores [16],[17] han difundido los principios Lean en la producción, con las principales etapas y la manera de actuación, tal y como se indica en la Figura 1.

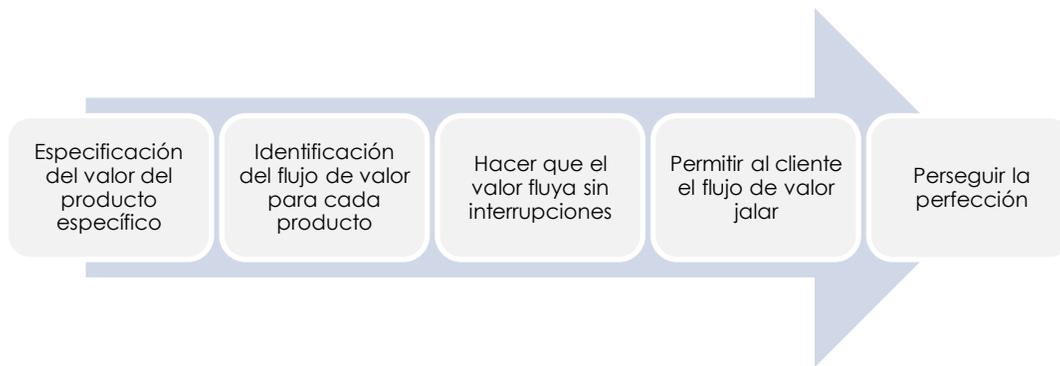


Figura 1. Pasos para la implementación de LM.

La organización de la producción Lean contribuye a la aceleración de los procesos, la reducción de desperdicios e implícitamente el aumento del valor agregado al cliente por la entrega de productos de calidad [1]. Al mismo tiempo LM también trae cambios positivos en la cultura organizacional y en que el hombre ocupe un lugar central en cualquier actividad que realice, desde el nivel operativo hasta la alta dirección.

2.2 Industria 4.0

2.2.1 La primera revolución industrial: la mecanización

Durante los últimos siglos, la manufactura ha estado en evolución, mostrando transformaciones a través de diversas etapas.

Para mediados del siglo XVIII, las actividades industriales se desarrollaban principalmente en talleres o en los hogares de manera manual y artesanal con la ayuda de máquinas sencillas y herramientas manuales. En esta etapa de fabricación artesanal es cuando inicia la llamada "Revolución industrial" que surge en Gran Bretaña a finales del siglo XVIII, conociéndose hasta la fecha como la Primera Revolución Industrial [18] [19]. Esta revolución industrial se consideró una solución que trajo consigo diversos cambios sociales y tecnológicos, así como la necesidad de otras fuentes de energía para las máquinas. En esta época se notaron importantes desarrollos en sectores industriales como la textil, el acero y la construcción mecánica. Se transformó todo sector manufacturero mediante la sustitución de la energía manual, los molinos de viento y las ruedas hidráulicas como combustible principal para la producción de alimentos, ropa y

vivienda [18], con innovaciones en el área de mecánica [13]. Permitió el desarrollo del tren a vapor en 1804 que aceleró el transporte de mercancías a nivel nacional, luego internacional, antes de convertirse en un medio de transporte de personas [19] [20].

2.2.2 La segunda revolución industrial: la energía eléctrica

En la primera revolución industrial se impulsó el crecimiento de industrias como el carbón, el hierro, los textiles y ferrocarriles, la segunda revolución industrial marcó la expansión de la electricidad, el petróleo, acero y las primeras líneas de montaje, que sucedió en el periodo de 1870 a 1914 [19] [21]. El inicio de la revolución se caracterizó por la adopción masiva de la electricidad, gracias a la invención de Tomás Alva Edison de la bombilla incandescente eléctrica hecha para los hogares en 1879. Cambió la forma en que la gente trabajaba y vivía, ya que la mayoría de las actividades se realizaban a la luz del día [19]. Esto conduce a otras invenciones: primeros teléfonos, ondas de radio, pequeños coches eléctricos, ascensores a edificios más altos, fonógrafos, películas cinematográficas, generadores eléctricos que conducen a refrigeradores y lavadoras y así sucesivamente. La electricidad reemplazó progresivamente a los motores de vapor en diversas aplicaciones. Otro gran invento de la época fue el motor de combustión interna que ayudó al diseño de los primeros automóviles y aviones. [21]

2.2.3 La tercera revolución industrial: la automatización

La tercera revolución industrial se desencadenó cuando se pasó de lo mecánico a lo analógico, de la tecnología eléctrica a la electrónica digital, y con la tecnología de la información dieron paso a los inicios de la automatización [19]. Los principales avances mostrados en esta etapa, a partir de principios de la década de 1970, son la informática, Internet y TIC que, en conjunto, llevaron a una revolución digital en la que el valor de la información ganó un impulso significativo con respecto al valor de los bienes físicos [22]. Los procesos de fabricación gradualmente se transformaron en más complejos, lo que generó la necesidad de una mayor velocidad, cualidades consistentes, mano de obra protegida y una planificación más precisa. Con esos objetivos en mente, el primer controlador lógico programable PLC, fue diseñado en 1969 para la industria del automóvil y tenía el propósito de controlar el proceso de manufactura, notando

avances instantáneos y permitiendo que el personal reaccionara más rápido ante contratiempos. Ejemplos de sus aplicaciones son controles de equipos, procesos, movimiento y lote. Las computadoras industriales son fáciles de programar y se adaptan a entornos extremos, reemplazando cables, temporizadores y secuenciadores que anteriormente eran más costosos de instalar, mantener y permitían muchos más errores humanos [18].

A fines de la década de 1980, las empresas comenzaron a ver las computadoras como una necesidad para mejorar sus operaciones. El primer teléfono celular fue diseñado en el mismo período. La próxima década, se introdujo la World Wide Web y, en 1996, internet se convirtió en parte de los hogares y la mayoría de las operaciones de negocios. En la década de 2000, la revolución digital se extendió por el mundo en desarrollo y la penetración de Internet, los teléfonos inteligentes crecieron exponencialmente.

En la década actual, los servicios en la nube llevaron a la era digital más allá, permitiendo que los dispositivos móviles manejen cantidades extremas de datos de servidores remotos. Las tecnologías digitales aún se siguen mejorando.

2.2.4 La cuarta revolución industrial: la digitalización

El nombre de cuarta revolución industrial fue dado en Alemania por Klaus Schwab en el Foro Económico Mundial de 2016. En Estados Unidos a este proceso de transformación se le llamó Industria 4.0.

La cuarta revolución industrial es un término que hace referencia a la combinación de componentes físicos, inteligentes y de conectividad para la creación de sistemas ciber físicos. Estos sistemas permiten la automatización en diversas áreas, ya que combinan procesos digitales con maquinaria mediante el uso del Internet de las Cosas IoT [23][24][25].

Según [23], el IoT "proporciona una forma de obtener una mejor visibilidad y conocimiento de las operaciones y activos de la empresa a través de la integración de sensores de máquina, middleware , software y sistemas de almacenamiento y computación back-end en la nube ". Los autores sostienen que la digitalización de la empresa permite a los usuarios estudiar grandes cantidades de datos a través de métodos analíticos de vanguardia, lo que resulta en ganancias de eficiencia operativa,

productividad acelerada. Otros beneficios que declaran [18] y [26] además de la integración, la transparencia, las ganancias de eficiencia y rentabilidad son las cadenas de suministro flexibles y reconfigurables.

La Figura 2 muestra esquemáticamente un resumen de las cuatro revoluciones industriales.

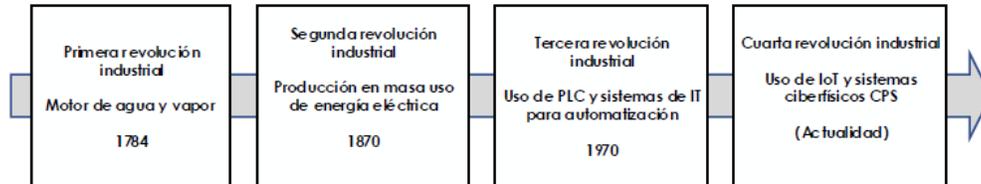


Figura 2. Las cuatro revoluciones industriales. Fuente: [18]

La Industria 4.0 (I4.0) está provocando cambios significativos en los sectores industriales en el mundo globalizado. I4.0 es un conjunto de tecnologías físicas y digitales disruptivas que ofrecen nuevos valores y servicios a clientes y organizaciones [18] [8]

La I4.0 es un conjunto integrado de sistemas de producción inteligentes y tecnologías de información avanzadas que se basan en conjuntos de sistemas de software integrados. Para los autores [11] [9], la I4.0 es un conjunto de tecnologías basadas en la digitalización e interconexión de todas las unidades de producción presentes dentro de un sistema económico; se convertirá en un desafío competitivo para las empresas. Las empresas del entorno empresarial actual deben estar preparadas para este nuevo desafío competitivo [27].

A continuación, se identifican las tecnologías más destacadas que son la base para permitir una implementación adecuada de I 4.0. La revisión realizada de la literatura disponible permitió identificar diversos artículos que describen tecnologías habilitadoras que abarca la I4.0. entre ellas se describen el big data, Internet de las cosas IoT, computación en la nube, robots autónomos, manufactura aditiva, sistemas ciberfísicos y realidad aumentada.

Cada uno se puede resumir de la siguiente manera:

- IoT. Es la tecnología que proporciona conectividad entre sensores, máquinas y dispositivos móviles y humanos, lo que permite la interoperabilidad interna y externa de las organizaciones y hace que los datos sean más accesibles y ubicuos [23] [28] [29].
- Big data. Es un entorno en el que se almacena una gran cantidad de datos no estructurados, estructurados y semiestructurados, que llegan de diversas fuentes y se conectan a través de IoT, para proporcionar información precisa y rápida para toma de decisiones [30][28]
- Computación en la nube: término genérico que denota acceso remoto con una respuesta extremadamente rápida a los datos almacenados en un entorno externo, a través de IoT. [23]
- Sistema ciber físico. Sistemas que combinan estadísticas y aproximación computacional con datos en tiempo real extraídos de sistemas físicos, para abordar la respuesta de una estructura bajo varios escenarios, con el objetivo de indicar la mejor decisión. De hecho, están transformando tecnologías para sistemas de gestión interconectados entre recursos físicos y computacionales, aprovechando la interconectividad de máquinas inteligentes, resilientes y auto adaptativas [23][28]
- Robot autónomo. Son robots inteligentes, flexibles y cooperativos. Eventualmente, interactuarán entre sí y trabajarán de manera segura junto a los humanos, aprendiendo de ellos y decidiendo por sí mismos [23][28]
- Manufactura aditiva. Esta tecnología, también conocida como impresión 3D, puede producir pequeños lotes de productos personalizados que ofrecen ventajas constructivas, como en el diseño de piezas complejas [23][28][12]. El proceso comprende depositar un material capa sobre capa.
- Realidad aumentada. Esta tecnología expande la información en el entorno que rodea a un ser humano, lo que permite que el ser humano interactúe con objetos virtuales que coexisten simultáneamente con un entorno físico en un entorno físico. forma virtual, en el mismo espacio del entorno real [23][28] [31].

Estudios especializados recientes han estimado que el cambio a la Industria 4.0 conduce no solo a cambios tecnológicos sino también a cambios en los modelos de negocio, seguidos de cambios sociales. Han surgido ciertas dificultades que enfrentan las empresas industriales al implementar la Industria 4.0, incluso a nivel operativo de los pisos de producción [52], como problemas de capacitación de recursos humanos para

el aprendizaje de nuevas habilidades y competencias digitales, integración hombre-máquina y seguridad de datos

Es necesario tener el mejor conocimiento posible de las prácticas de la industria para que la adaptación de los actuales métodos de LM a la fabricación inteligente se pueda llevar a cabo de manera eficiente. Una metodología que presenta [32] describe las pautas generales para la implementación de un proyecto de Industria 4.0, y los pasos como se muestran en la Figura 3.



Figura 3 Pasos para la implementación de Industria 4.0

Tras la investigación de los conceptos clave de las tecnologías I4.0 y las herramientas Lean aplicadas en la práctica, se pueden destacar los efectos favorables de la combinación de las dos prácticas en el entorno industrial de la Industria 4.0, aumentando la productividad y el rendimiento de los sistemas de producción [32].

La tecnología e infraestructura de la I4.0 contribuye a dar mayor soporte a los sistemas de LM básicamente en los niveles operativos de la empresa y también asegura la interconexión entre departamentos en la empresa, y entre empresas al exterior.

2.3 Modelado de simulación de eventos discretos.

La simulación es una técnica bien conocida para usar computadoras para imitar o simular las operaciones de varios tipos de instalaciones o procesos del mundo real [33].

Un modelo de simulación es un modelo computacional que consiste en la abstracción o representación simplificada de un modelo dinámico complejo [34].

La simulación de sistemas de eventos discretos es el modelado de sistemas en los que la variable de estado cambia solo en un conjunto discreto de puntos en el tiempo [35]. La

simulación de eventos discretos (DES) representa las entradas y salidas de un sistema incluyendo explícitamente una representación detallada de los procesos internos donde el estado de las variables cambia cuando ocurre un evento discreto [36].

Los modelos DES están compuestos de elementos que evolucionan simultáneamente y asincrónicamente y que interactúan entre ellos por medio de la sincronización y mecanismos al paso de información.

Los pasos en un estudio de simulación que propone [35] son: 1. Formulación del problema 2. Definición de objetivos y plan general del proyecto 3. Conceptualización del modelo 4. Recopilación de datos 5. Traducción del modelo 6.

Verificación 7. Validación 8. Diseño experimental 9. Corridos de producción y análisis 10. Documentación y elaboración de informes.

2.4 Investigaciones de mejores prácticas de LM e I4.0.

Para lograr los objetivos de calidad, costo, reducción del tiempo de ciclo, seguridad y motivación de los empleados, el enfoque de LM requiere la adopción de un conjunto de principios y herramientas, incluyendo Just-in-time, Jidoka, trabajo en equipo, reducción de desperdicios y mejora continua [37]. Y más recientemente se está produciendo un cambio de paradigma en las empresas, la Industria 4.0 ahora impulsada para permitir que las empresas logren un cambio tecnológico importante. Aprovechando la interconectividad de productos, máquinas, la cadena de suministro y los clientes, y al utilizar las capacidades de toma de decisiones de los sistemas, las empresas pueden mejorar la alta variabilidad, velocidad y rentabilidad [11]. Mediante el uso de Internet de las cosas, sistemas ciber físicos y computación en la nube, entre otras cosas, es posible alcanzar niveles previamente inaccesibles de desempeño operativo. Esta revolución obliga a las organizaciones de fabricación a revisar sus estrategias y posiblemente revisar si la táctica de Lean anterior debe adaptarse o reconsiderarse para priorizar el despliegue de tecnología de la Industria 4.0 [11].

En la revisión de la literatura se encontró un minucioso análisis de la relación entre los principios de Lean que son los que aportan mayores beneficios con la Industria 4.0 [11]. El análisis se basa en el diagrama TPS de [37], que incluye el Just- In-Time, Jidoka, Reducción de desperdicio, Gente y trabajo en equipo y los Cimientos, se incluyeron las

de Robots autónomos, Simulación, Sistemas de Integración, Internet de las cosas, la nube, Realidad aumentada, Big Data Analytics y Ciberseguridad. Se incluyeron, además, cuatro categorías de los niveles de capacidad de la relación LM e I4.0., como son: Monitoreo, Control, Optimización y Autonomía.

Los autores concluyen que las categorías de Lean que más se mejoran por la Industria 4.0 son las de Just-In-Time, los cimientos y Jidoka. Dentro de estas categorías, los principios cubiertos con mayor frecuencia son: Flujo continuo, Administración visual, Desperdicio, Control de calidad en la estación y el Sistema Pull.

Las tecnologías más comúnmente utilizadas para mejorar los principios Lean son Internet de las cosas, Simulación, Robots autónomos, Realidad aumentada y Big data analytics. Internet de las cosas y la realidad aumentada se utilizan principalmente para apoyar el nivel de monitoreo, mientras que los robots autónomos soportan principalmente el nivel de autonomía. La simulación es la tecnología más utilizada a nivel de optimización. En cuanto a los niveles de capacidad, cabe señalar que el nivel de capacidad de Monitoreo fue significativamente más estudiado que los demás. Para este nivel de capacidad, los artículos encontrados se refieren principalmente a los principios Lean de gestión visual, desperdicio y flujo continuo. Las principales tecnologías utilizadas en el nivel de monitoreo son Internet de las cosas, realidad aumentada y simulación. El nivel de capacidad de Optimización la mayoría aborda el nivel de autonomía y menos frecuente para el nivel de control. Este resultado puede demostrar la relativa novedad del paradigma Industria 4.0. Sin embargo, esto indica la necesidad de seguir trabajando en el uso de tecnologías de la Industria 4.0 para otros niveles de capacidad.

En la búsqueda y revisión de la literatura propia, se realizó una revisión de artículos que relacionan la I4.0 y la filosofía de LM, considerando publicaciones del 2019 en adelante, localizados en las bases de Science Direct, Taylor and Francis, Springer, IEEE y Google Scholar.

La Tabla 1 muestra la literatura revisada presentando las principales aportaciones de los diversos autores, así como los enfoques de las investigaciones.

Tabla 1 Publicaciones relacionadas con LM e Industria 4.0

Autores	Principales aportaciones	Enfoque
[38]	Abordar el impacto de I4.0 en las competencias de los profesionales Lean. Se observa que además de las habilidades técnicas vinculadas a la programación y la ciencia de datos, las habilidades analíticas e interpersonales conforman las habilidades socioculturales necesarias para el futuro profesional en el contexto de I4.0.	Investigación exploratoria
[39]	Diseño y aplicación del concepto VSM digital para mejorar el método Lean VSM original con potencial de crear una base racionalizada hacia Industria 4.0.	Conceptual y aplicación
[6]	Analizar la relación de conceptos de I4.0 y LP. El análisis muestra que las empresas han aplicado los conceptos de I4.0 y LP como estrategias de gestión.	Revisión de literatura
[40]	Explorar la relación entre el diseño lean, el ecodiseño y las estrategias I4.0 para diseñar productos ecoeficientes.	Revisión de literatura
[41]	Elaborar la conexión entre los principios y métodos de la producción Lean y las tecnologías de la I4.0 utilizando el método de estudio Delphi y Domain Mapping Matrices (DMM). Esta contribución servirá como base fundamental para que las empresas implementen Lean 4.0 en su producción.	Aplicación de metodología
[42]	Presentar los conceptos y la metodología de la industria 4.0 desarrollados para eliminar la falta de valor agregado en los flujos de fabricación de producción. Se presenta un ejemplo basado en el dominio de producción de tarjetas electrónicas.	Revisión conceptual y caso de estudio
[43]	Evaluar la relación entre la integración de la SC, la agilidad de la SC y el desempeño financiero. Se demuestra que si bien las tecnologías digitales de la Industria 4.0 fortalecen el efecto de la agilidad de la SC en el desempeño financiero, no moderan la relación entre la integración de la SC y la agilidad de la SC	Aplicación
[44]	Estudiar el impacto potencial de la cuarta revolución industrial: la Industria 4.0 y sus avances tecnológicos asociados en el rendimiento de la cadena de suministro (SC). Aportar nuevos conocimientos sobre el tema y proporcionar una visión de futuro para futuras investigaciones.	Investigación exploratoria
[1]	Mostrar la implementación de Lean en el campo de la fabricación flexible, correlacionada con la integración de técnicas de Industria 4.0, como el gemelo digital y la simulación, conduciendo a procesos de producción mejorados mediante una reconfiguración rápida y flexible, siendo los dos conceptos interdependientes.	Investigación exploratoria
[8]	Analizar la integración de conceptos de I4.0 con producción lean. Los resultados obtenidos muestran que las herramientas I4.0 podrían integrarse con la producción lean de tal manera que las empresas puedan mejorar su productividad y flexibilidad	Investigación exploratoria
[45]	Modelo referencial que fusiona los conceptos y roles inherentes de SC con las nuevas tendencias tecnológicas dirigidas hacia la digitalización, la automatización y el aumento del uso de las tecnologías de la información y la comunicación en las cadenas de valor mundiales de la logística.	Propuesta de modelo conceptual
[46]	Integrar los enfoques Lean e I4.0 para los procesos MRO de aeronaves y simular su implementación en el sistema de simulación de eventos discretos AnyLogic. En este artículo se propone la metodología del proceso de simulación y el diagrama de flujo del proceso de mantenimiento de aeronaves.	Aplicación de metodología
[47]	Desarrollar un enfoque que evalúe las tecnologías de la Industria 4.0 para elementos adecuados de un Sistema de Producción Esbelta.	Investigación exploratoria
[48]	Investigar las prácticas de la industria con respecto al uso combinado de la I4.0 y herramientas esbeltas en el sector manufacturero. datos en tiempo real, IoT para el intercambio de datos, análisis de big data, Cyber Physical Systems (CPS), algoritmos predictivos y robots se encuentran entre las aplicaciones I4.0 más populares utilizadas	Investigación exploratoria

	para admitir atributos lean como flujo continuo, Kanban, trabajo estandarizado, TPM y mejora continua.	
[5]	Evaluar cómo los principios Lean pueden respaldar la Industria 4.0 en la búsqueda de un mayor valor para el cliente y la excelencia en la fabricación	Literatura y estudio de caso
[49]	Estudiar la combinación de tecnologías de I4.0 y principios de LM dando paso a Lean 4.0. Artículo de reflexión que propone algunos casos prácticos de Lean 4.0 concretados por una simulación basada en el estudio de caso de una empresa marroquí para mejorar la productividad.	Revisión de literatura
[50]	Identificar asociaciones en las operaciones entre las capacidades de la I4.0 y la integración con la eliminación de desperdicios Lean. Muestra el beneficio para las pymes al utilizar la I 4.0 en la implementación lean y respalda los esfuerzos de las organizaciones de fabricación para volverse más eficientes utilizando las capacidades y soluciones de la I4.0.	Revisión de literatura
[51]	Identificar y evaluar barreras significativas contra la implementación de BDA con dos enfoques, en el contexto de las cadenas de suministro de fabricación indias (SC).	Investigación exploratoria
[52]	Mostrar el enfoque en adoptar la cultura de LM al estilo japonés y la ingeniería digital I4.0 para capacitar a los estudiantes con curso semestral basado en el aprendizaje basado en proyectos (PBL)	Aplicación
[11]	Caracterizar los impactos de las tecnologías I4.0 en los principios Lean de acuerdo con los niveles de capacidad objetivo. Los resultados obtenidos muestran un fuerte apoyo a las tecnologías de I4.0 para Just-in-time y Jidoka, pero poco o ningún apoyo a la reducción de desperdicios y Personas y Trabajo en Equipo.	Aplicación
[53]	Identifica varios métodos Lean e Industria 4.0 que tienen el potencial de mitigar pérdidas en la productividad.	Revisión de literatura
[22]	Analizar en forma cuantitativa y cualitativa la relación entre Lean e I4.0 para ilustrar la visión completa de las diferentes posibilidades al vincular los dos métodos.	Revisión de literatura
[54]	Estudiar la influencia de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en la relación entre la fabricación sostenible 6R y lean six sigma DMAIC. Se utiliza un estudio de caso de una línea de ensamblaje para investigar la efectividad del enfoque propuesto.	Investigación exploratoria y estudio de caso

Elaboración propia

De este grupo de muestras de artículos investigados, se resume que existe una estrecha relación de los conceptos integrados de las tecnologías de I4.0 con las herramientas de LM, aportando mejoras a la productividad sin perder flexibilidad en los procesos, así como la mejora de la agilidad y el rendimiento de las cadenas de suministro.

3. ANÁLISIS CRÍTICO

3.1 Integración de los conceptos LM e I4.0

LM se ha utilizado ampliamente para maximizar el valor para los clientes y minimizar el desperdicio. El principio clave detrás de LM es la minimización de la variación y el desperdicio del proceso para maximizar el valor agregado para los clientes [38].

En este contexto, las herramientas I4.0 podrían integrarse con LM de tal manera que las empresas puedan mejorar su productividad y flexibilidad. Sin embargo, algunos autores indican que el factor humano puede ser considerado como la parte más importante para que las empresas integren estas disciplinas [8][39] [52].

Una propuesta que se ha analizado apunta a que el método LM de Value Stream Mapping (VSM) se pueda aumentar para incluir en los principios de la Industria 4.0 colectivamente en un Digital Value Stream Map (DVSM). De esta manera, ambos enfoques pueden ratificarse dentro de un propósito común, minimizando las incongruencias que pueden surgir de una aplicación aislada [39].

Las relaciones temporales entre los métodos LM y las tecnologías de la Industria 4.0 se pueden relacionar de manera amplia, como se muestran en la Fig. 2. Aquí, la casa de las relaciones temporales contiene los 35 métodos de un sistema LM. Esta casa de las relaciones temporales comprende tecnologías de Industria 4.0. Algunas tecnologías se resumen en los dos grupos "tecnologías de visualización" y "tecnologías de comunicación", otras se insertan en las relaciones temporales [47]

Abajo, en el sótano de la casa de las relaciones temporales hay dos cajas, como se muestra en la Figura 4. Un recuadro contiene los métodos lean de apoyo, que pueden ampliarse con tecnologías digitales. El otro incluye las tecnologías básicas de Industria 4.0, como sensor, actuador, infraestructura de comunicación y software, que son la base de las tecnologías de Industria 4.0 [55][47].

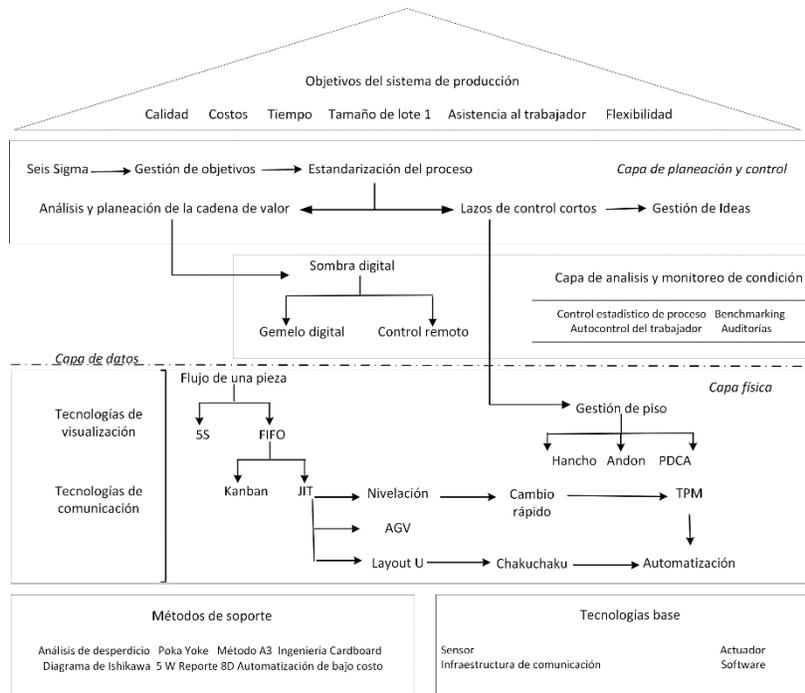


Figura 4. Las relaciones entre LM y las tecnologías de la Industria 4.0. Fuente: [55]

Al combinar LM e Industria 4.0, hace que Lean sea más fuerte y eficiente. Y la integración tiene un impacto positivo en el valor del producto, la satisfacción del cliente y la competitividad. Por otro lado, son unánimes sobre la forma en que los dos métodos se influyen entre sí [22].

LM tiene algunas limitaciones, como la volatilidad de la demanda y la poca personalización del producto. A través de la aplicación de las tecnologías I4.0 al proceso productivo, será posible hacer de la producción LM un sistema efectivo, así como eliminar sus limitaciones con combinación justa entre la tecnología y el hombre.

Adicionalmente se ha estudiado la combinación de Lean Six Sigma, I4.0, KPIs y los elementos de manufactura sustentable, resultando una dimensión adicional para ver el estado de la producción y tomar decisiones más informadas. Esta integración proporciona un mejor potencial de producción sostenible en el futuro de acuerdo con las modernas tecnologías de fabricación de Industria 4.0 y un objetivo de toda la industria para reducir los desperdicios. La solución también es escalable para proporcionar acceso a sensores IoT, datos recopilados o interfaz con un gemelo digital. Esto permitiría la integración de más fuentes de datos para habilitar tecnologías como el aprendizaje autónomo y el mantenimiento predictivo. Otro aspecto importante es la integración a la cadena de suministro de las organizaciones, para informar a los

proveedores de mayores tasas de defectos y gestionar los envíos de mercancías en función de la reutilización o el reciclaje [54][56].

En la era actual del Big Data (BD), se pueden generar y recopilar fácilmente grandes volúmenes de datos de valor a gran velocidad a partir de una amplia variedad de fuentes enriquecidas de datos. Por lo tanto, BD puede ayudar a los fabricantes a ser más racionales, informados y receptivos en la forma de tomar las decisiones. La competitividad en el mundo de la manufactura se ve reforzado por estas características de BD. Varias etapas representan el ciclo de vida de los datos en el que se explotan los datos en la manufactura [57][58][59].

En este contexto del análisis crítico se resume que la implementación de la Industria 4.0 es un enfoque principal para las economías en todo el mundo con el fin de mejorar la competitividad y la productividad de la industria manufacturera [60].

El análisis teórico muestra que la Industria 4.0 proporciona un potencial significativo al acercar el entorno de comunicación, interconexión y relaciones entre personas, lugares, cosas y máquinas. También exige un replanteamiento y un cambio drástico en materia de gobierno y gestión estratégica y operativa [61].

Para comprender la transformación empresarial que supondrán las fábricas del futuro, es necesario profundizar en los cambios en los procesos empresariales, tal y como propone el paradigma I4.0. En su visión amplia y global, involucra a todo el entorno de fabricación, proponiendo también nuevas perspectivas para los procesos de negocio [62].

Algunas publicaciones que se abordaron en esta investigación muestran diversas aplicaciones de la Industria 4.0, relacionadas con temas como en el diseño lean, diseño ecológico, puertos y terminales marítimos, cadenas de suministro, y estudios en el impacto que tiene en las PYMES, sobre todo en países en desarrollo, que tienen interés en conocer acerca de los retos y beneficios por el uso de tecnologías digitales en los procesos de manufactura, en la era moderna.

En la perspectiva de la sustentabilidad, el diseño esbelto y el diseño ecológico, asociados con las tecnologías de la Industria 4.0, los autores [40] subrayan que pueden ser un enfoque estructurado y metodológico eficiente en el desarrollo de productos basados en las estrategias de la economía circular. Afirman que las decisiones tomadas

durante la etapa de diseño del producto pueden afectar significativamente la sostenibilidad de los productos a lo largo de su ciclo de vida. Por tanto, el diseño esbelto combinado con el ecodiseño y la Industria 4.0 representan un modelo innovador para incluir la sostenibilidad en todo el ciclo de vida del producto.

Otro caso estudiado por [63] es el de los puertos y terminales que desde la década de 2010 han entrado en una quinta etapa de evolución caracterizada por su transformación digital y alineación con las prácticas de la Industria 4.0. En este punto, los autores enfatizan que no hay duda de que la cadena de suministros es otra habilitación tecnológica que probablemente contribuirá a la transformación digital de los puertos. El intercambio de información digital dentro de las cadenas de suministro se considera un requisito previo central para implementar la Industria 4.0, en relación con una de sus características principales, la interconexión horizontal y vertical. Además de la implementación técnica, aspectos como la falta de confianza, los beneficios poco claros para los proveedores y las diferentes percepciones de la Industria 4.0 dificultan el intercambio de información digital, especialmente por parte de las pequeñas y medianas empresas (PYME) [64].

El control de calidad y el diagnóstico de fallas son dos direcciones de investigación en los últimos años que los autores [65] y [66] han abordado, concluyendo que los enfoques de aprendizaje automático han demostrado ser efectivos en estas dos áreas. Sin embargo, muchos problemas aún no se abordan por completo, entre los cuales el mantenimiento preventivo se indica como una de las áreas importantes.

[67] refieren que la reducción de los ciclos de desarrollo de productos totalmente personalizables plantea otros grandes desafíos para los sistemas de producción. Los autores enfatizan que, para superar estos desafíos, el Deep Reinforcement Learning (DRL) se está aplicando cada vez más para la optimización de los sistemas de producción. La manufactura aditiva, una técnica de fabricación digital, ha experimentado un importante desarrollo encontrando sus aplicaciones en diversos sectores como el automóvil, aeroespacial, médico, materiales, arquitectura, construcción, alimentación, moda, etc. [68]. Como un ejemplo, los autores hacen mención que la industria

automotriz aprovecha esta tecnología para desarrollar nuevos productos de manera rápida y eficiente, reduciendo así el costo de desarrollo del producto.

Algunos avances en la investigación de la Industria 4.0 han identificado que los conceptos de fabricación sostenible y el uso de las nuevas tecnologías pueden permitir que la Industria 4.0 tenga impactos positivos en todas las dimensiones de la sostenibilidad de manera integrada, y también apoyando la implementación de la Industria 4.0 en los siguientes aspectos: desarrollo de modelos de negocio sostenibles; sistemas de producción sostenibles y circulares; cadenas de suministro sostenibles; diseño de productos sostenibles; y desarrollo de políticas para garantizar el logro de los objetivos sostenibles en la agenda de Industria 4.0 [69].

Varios autores han realizado investigaciones para identificar, clasificar y crear una interacción entre las barreras psicológicas para adoptar tecnologías de Industria 4.0 en el sector manufacturero. Una revisión exhaustiva de la literatura realizada por [20] seguida por una discusión con expertos académicos y de la industria reconoció 20 barreras que impiden la implementación exitosa de la Industria 4.0. Los hallazgos revelan que 'Miedo a la pérdida de empleo', 'Miedo a la pérdida de datos/Riesgo de violaciones de seguridad', 'Falta de educación avanzada y continua de los empleados' y 'Falta de estándares y arquitectura de referencia', con los pesos de mayor importancia, surgieron como las barreras psicológicas más prominentes en las economías en desarrollo.

En otro estudio de [70] se analizaron los pros y los contras de la Industria 4.0 de manera sistemática para brindar información desde una perspectiva académica. Este estudio identificó que las ventajas de la Industria 4.0 son una ventaja competitiva estratégica, eficiencia y eficacia organizativas, agilidad organizativa, innovación en la fabricación, rentabilidad, seguridad y calidad mejoradas del producto, experiencia agradable para el cliente, operaciones mejoradas y beneficios ambientales y sociales. Las desventajas identificadas en este estudio son el impacto negativo del intercambio de datos en un entorno competitivo, el manejo de las aprensiones de los empleados y los sindicatos, la necesidad de mano de obra altamente calificada, las implicaciones sociotécnicas de la I4.0, ciberseguridad y alto costo inicial [70][27]. Otro factor crítico que afecta la implementación exitosa son los factores sociales y técnicos [71].

Otras investigaciones demuestran que los principales riesgos a los que se enfrenta la adopción de la Industria 4.0 en las PYMES incluyen la falta de experiencia y una

mentalidad estratégica a corto plazo. La Industria 4.0 ofrece una oportunidad única para rediseñar los procesos productivos de las PYMES y adoptar nuevos modelos de negocio [72][73].

Los autores [74] han observado que la falta de motivación de los socios y clientes , así como el miedo al fracaso sobre la aplicación de las tecnologías I4.0 son los principales desafíos. Los hallazgos del estudio ayudarán a las PYMES a formular estrategias para implementar tecnologías de Industria 4.0 para procesos comerciales éticos y sostenibles. Los enfoques convencionales, como LM, están limitados a la hora de mitigar pérdidas de productividad debido a su implementación desafiante en el entorno de ingeniería bajo pedido. Los nuevos conceptos y tecnologías de la Industria 4.0 tienen el potencial de mitigar estas pérdidas a través de los procesos de digitalización, pero se investigan poco en la industria de la ingeniería bajo pedido. En este contexto, [53] identifica varios métodos Lean e Industria 4.0 que tienen el potencial de reducir o eliminar estas pérdidas. En conclusión, la revolución I4.0 ya está afectando a muchos países e industrias. En algún lugar más rápido, en algún lugar más lento, todas las empresas acudirán a él. Por lo tanto, las organizaciones deben comprender correctamente la concepción de la revolución. Si quieren tener éxito, deben tomar la iniciativa en la aplicación de proyectos de transformación [75][53].

4. APLICACIÓN Y PROPUESTA DE UN CASO DE ESTUDIO

Para mostrar cómo se podría aplicar la integración de los conceptos LM e I4.0 en una situación del mundo real, se desarrolló un estudio de caso. La empresa seleccionada para este estudio fue una multinacional dedicada a la remanufactura de motores Diesel usados en el funcionamiento de locomotoras, ubicada en el estado de San Luis Potosí en México. Esta compañía suministra sus componentes a empresas en la unión americana, así como a países en Latinoamérica en sus procesos de mantenimiento o reparación de las unidades de sus clientes. Está en funcionamiento en la capital desde hace más de 20 años y emplea aproximadamente a 200 personas.

Para el desarrollo del proyecto, que es un Nuevo Proyecto de Ingeniería, NPI, en la compañía donde se realiza el estudio, se comenzó con un motor prestado a una planta hermana quien ya se encontraba laborando con estos motores de similar marca, fue proporcionado acceso digital a los planos que conformaban el motor, logrando acceder a las características de las piezas que lo componen para la parte de calificación del mismo, un tiempo ciclo de 800 horas como base comparativa y un equipo de trabajo experimentado.

Este proyecto consiste en instalar a futuro una nueva línea de remanufactura de componentes de la marca X, donde se realizará una reparación de estos. Además, debido a las cada vez más estrictas normas de contaminación, se realizará una transformación del motor a trabajar de un modelo 0 a un modelo 1+ el cual tendrá menor cantidad de emisiones, para lo cual se realizó un plan de trabajo para atraer la aceptación de este nuevo proyecto por las plantas extranjeras. Si se logra la aceptación final del proyecto, las plantas extranjeras decidirán enviar parte de sus motores (un equivalente al 10% de su producción) a la planta, y se procederá con la implementación de la línea físicamente, instalando los componentes necesarios que se detectaron con anterioridad y poniendo en función la línea, para lo cual se recurrirá a la contratación de nuevo personal que implica más oportunidades de trabajo en la región, obteniendo un aumento considerable en las horas hombre a capitalizar por parte de la empresa, lo cual se verá traducido en un incremento de ingreso de capital al sitio, de tal modo que se logrará un retorno de inversión en corto plazo, con la llegada pronosticada de 90 motores para los próximos 3 años.

El objetivo principal del estudio del caso es analizar el proceso de desarmado, calificación de partes, ensamblado y pruebas de calidad que requiere el componente para su reparación y transformación de un modelo 0 a un modelo 1+, para su futuro trabajo dentro de una nueva línea de proceso que funcione de manera efectiva y con una buena calidad mediante un modelo de simulación que integre estrategias de manufactura esbelta e Industria 4.0.

La pregunta de investigación es ¿Se pueden integrar estrategias de manufactura esbelta e Industria 4.0, para justificar e instalar una nueva línea para el componente, que sea competente con los tiempos del sitio, y cumplir la demanda esperada?

En primera instancia se puede asegurar que se cuenta con un equipo de trabajo con la preparación para el manejo de estos motores, debido a que ya se habían remanufacturado hace algunos años en la empresa, y al hecho de que actualmente se remanufacturan otros modelos de motores, que, pese a no ser iguales, conservan una buena similitud en el proceso de estos, lo que permite contar con operadores con amplia experiencia para realizar las operaciones necesarias.

En cuanto a términos de tiempo, se logró demostrar que se puede ser completamente competente contra la planta hermana, con la toma de tiempos realizada, calculando un total de 250 horas de trabajo efectivo por motor, muy por debajo del tiempo de 800 horas pronosticado por la planta hermana, considerando una holgura considerable para las pautas, demoras y traslados que requiera el proceso completo.

Para el cumplimiento de la demanda, se realizó un estudio de diferentes escenarios, en el cual se consideró una eficiencia del 49.2 % (proporcionado por el departamento financiero de la empresa y comprobado por el VSM que se analiza más adelante), comparada con una jornada laboral de 8 horas y una semana de trabajo de lunes a viernes.

Las variables que se representan en los modelos consideran a las variables independientes conformadas por los materiales, las operaciones, los métodos, el recurso humano, las máquinas, los recursos financieros, estrategias de mejora. Así mismo, se incluyen las variables dependientes representadas por la productividad y el tiempo de entrega al cliente.

4.1 Descripción de las operaciones

- Desarme del motor. Durante el desarme del motor se clasifican las piezas que se extraen del mismo, dependiendo del material de que están fabricadas y considerando si estas pueden ser reusadas o retrabajadas.
- Calificación de partes. Las piezas que fueron identificadas mediante el BOM deben ser trabajadas para lograr la transformación del motor, se decide comenzar por calificar cuales de estas piezas realmente pueden ser reutilizadas mediante un proceso de calificación y/o certificación interna (empleando las CTQ's obtenidos de los planos de las piezas), para que puedan emplearse nuevamente.
- Armado del motor. Terminando de calificar todas las piezas que así lo requieren, se procede a rearmar el motor, colocando las piezas que habían sido cambiadas, se logrará la transformación deseada del motor, del modelo del motor inicial, a uno que produzca menos emisiones al ambiente.
- Cabina de pruebas. Terminado el proceso de armado, el motor debe pasar una serie de pruebas para comprobar que el motor cumple con las normas de calidad deseadas, para esto se cuenta con una cabina que trabaja los motores de manera que estos no estén conectados directamente a una locomotora.

4.2 Documentación del proceso

La documentación del proceso se realiza en tres partes principales:

El desarme del motor, en donde se elabora, autoriza y entrega una hoja de proceso y un JSA.

La calificación de partes, en donde se elaboran las hojas de proceso, JSA's y planes de calidad de cada una de las 108 piezas a retrabajar.

El armado del motor, donde se elaborarán las hojas de proceso, un JSA y el plan de calidad todas y cada una de ellas debidamente revisadas por los departamentos correspondientes y autorizadas por los jefes de estos mismos departamentos, para finalmente subirse a la plataforma de la empresa.

Se realiza un listado de las herramientas necesarias para llevar a cabo el proceso de principio a fin, de modo que estas herramientas puedan adquirirse para uso exclusivo de

la línea y no se tenga que recurrir a emplear herramientas hechizas y/u otros dispositivos que puedan poner en riesgo la integridad del trabajador y/o la calidad del producto.

a) Hojas de proceso

La de hojas de proceso del desarmado, así como las hojas de más de 100 partes que se llevan a recalificación y una hoja de proceso del armado del motor, son elaboradas tomando en cuenta el orden en que se llevan a cabo las operaciones, el análisis detallado de las operaciones que deben realizarse para llevar a cabo el proceso, mencionando herramientas necesarias, así como sus medidas y todo dato que pueda ser útil para nuevas personas que necesiten conocer en un futuro el proceso. Se incluyen, además, ayudas visuales para el mejor entendimiento de las actividades y el equipo de seguridad necesario para desarrollar las actividades de manera segura. Ver Anexo 1.

b) JSA's

Se elaboran JSA's del desarmado, armado y calificación de las 106 partes en donde se puntualiza el equipo de seguridad que se requiere en cada una de las actividades del proceso, así como las actividades principales del proceso hablando en términos de seguridad, es decir, las operaciones que podrían contener un mayor riesgo para el operario, poder llevar a cabo la operación sin ningún riesgo alguno, trabajando siempre a la par con el departamento de EHS con ayuda pertinente para salvaguardar la integridad de los trabajadores de la línea. Ver Anexo 1.

c) Planes de calidad

Se elaboran planes de calidad para la calificación de las partes, así como del armado, dentro de las cuales se hace uso de los planos de cada componente, analizando de este modo los CTQ's de cada una de las operaciones, prestando una atención vital a ellos. Las características que se analizan dentro de estas hojas son las medidas y tolerancias que deben tener los componentes para poder reutilizar las partes que se están calificado, así como en caso del armado del motor, los torques que debe dársele a cada uno de los tornillos del motor para que cumpla con los estándares de calidad dados por la empresa. Ver Anexo 1.

Para dar inicio al estudio del caso, se tomó en cuenta los principios de LM mencionados anteriormente, así como los pasos para la introducción de I4.0.

4.3 Mapa de la cadena de valor, VSM

El mapa de la cadena de valor, VSM, proporciona el flujo de información y el flujo de los materiales, desde la recepción de la orden hasta la entrega del producto terminado. Permiten detectar actividades que agregan valor y separarlas de las que no lo agregan en el proceso de manufactura de un producto o familia de productos [11]. Una de las primeras etapas de definición para iniciar con la mejora continua, es el mapa de la cadena de valor que, como herramienta de manufactura esbelta, abarca el panorama completo de un proceso productivo, haciendo la conexión con el cliente y el proveedor. El VSM para el proceso en estudio se muestra en la Figura 5.

Las actividades que agregan valor son los tiempos ciclo de cada una de las operaciones desde el desensamble hasta el embarque del producto final.

El tiempo ciclo total que se obtiene es de 250 horas, resultando en una eficiencia de 49.2 %, donde se puede observar que existen importantes áreas de oportunidad para la mejora del proceso. Estas se encuentran en los tiempos muertos entre operaciones por los tiempos ciclo individuales sumamente largos.

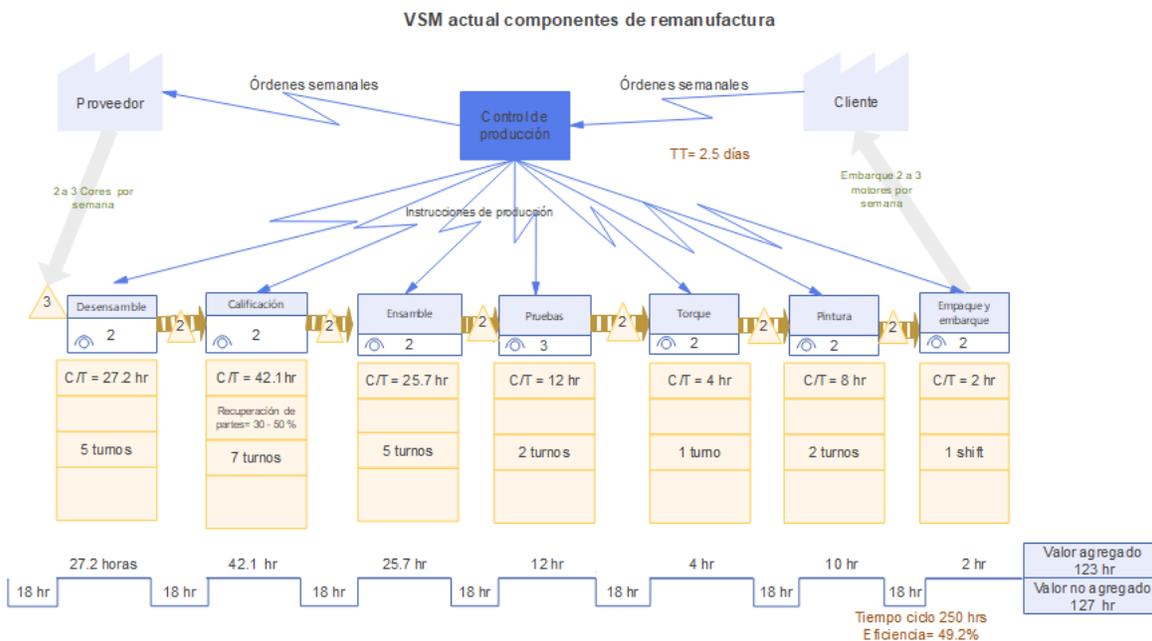


Figura 5. Mapa de la cadena de Valor actual VSM. Elaboración propia.

Con el propósito de reducir estos tiempos muertos, se proponen diferentes escenarios al combinar las variables independientes que afectan e impactan a las variables dependientes del proceso.

4.4 Elementos de los Modelos de simulación

Se modelaron 5 escenarios que simulan las estrategias diseñadas: en el escenario se presenta el modelo inicial sin ninguna estrategia, el escenario 2 muestra el modelo con una mejora en el layout, el escenario 3 representa la estrategia de mejora en el tiempo ciclo y nueva disposición de materiales, el escenario 4 representa la disposición de materiales en punto de uso (POU) y disposición de kit de materiales, y el escenario 5 contempla herramientas de comunicación e información en la nube. Ver Tabla 2.

La descripción de los elementos del escenario 5 se presentan en el Anexo 2.

Tabla 2. Modelos de simulación y descripción de los escenarios.

Modelos de simulación	Descripción
Escenario 1	Modelo de situación actual, con las condiciones iniciales del proceso de remanufactura del componente.
Escenario 2	Modelo actual con cambio en la distribución del layout para reducir recorridos del personal, reduciendo el tiempo ciclo y la productividad.
Escenario 3	En base al escenario 2, se considera el surtimiento de materiales tipo supermercado para que la disposición de los componentes sea ágil y rápida.
Escenario 4	Adicional al escenario 3 se implementan Kits de materiales en punto de uso (POU).
Escenario 5	Al escenario 4, se le adicionan herramientas digitales del IoT, para la comunicación en las diferentes áreas, usando la información en la nube, las estadísticas e información para la toma de decisiones.

Elaboración propia.

4.5 Representación de los Modelos de simulación

Los modelos de simulación de las cinco estrategias se representaron en el layout de la compañía, configurando las distribuciones de los escenarios y sus estrategias correspondientes, como a continuación se describen.

Escenario 1. Modelo de situación actual, con las condiciones iniciales del proceso de remanufactura del componente. Ver Figura 6.

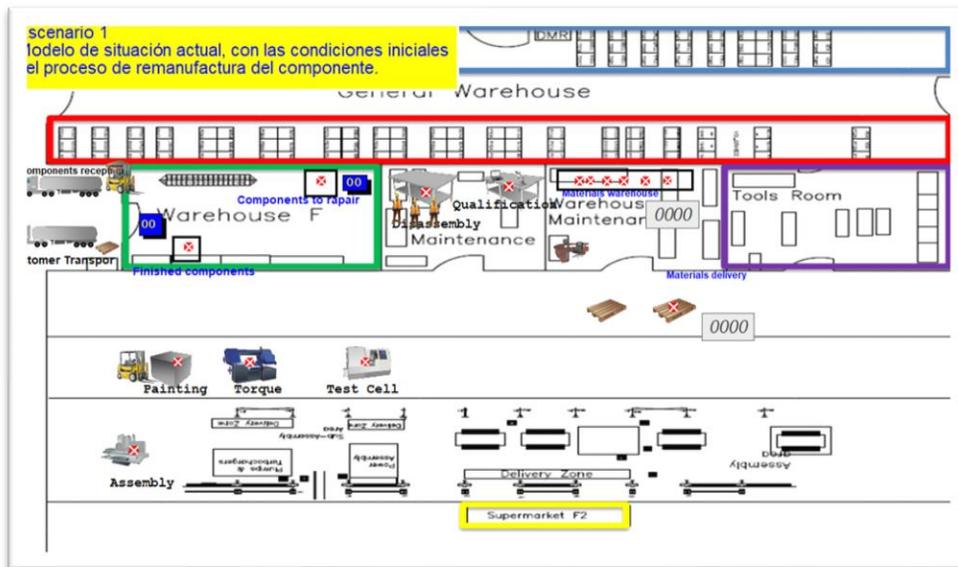


Figura 6. Modelo de simulación, escenario 1. Elaboración propia.

Escenario 2. Modelo actual con cambio en la distribución del layout para reducir recorridos del personal, reduciendo el tiempo ciclo y la productividad. Ver Figura 7.

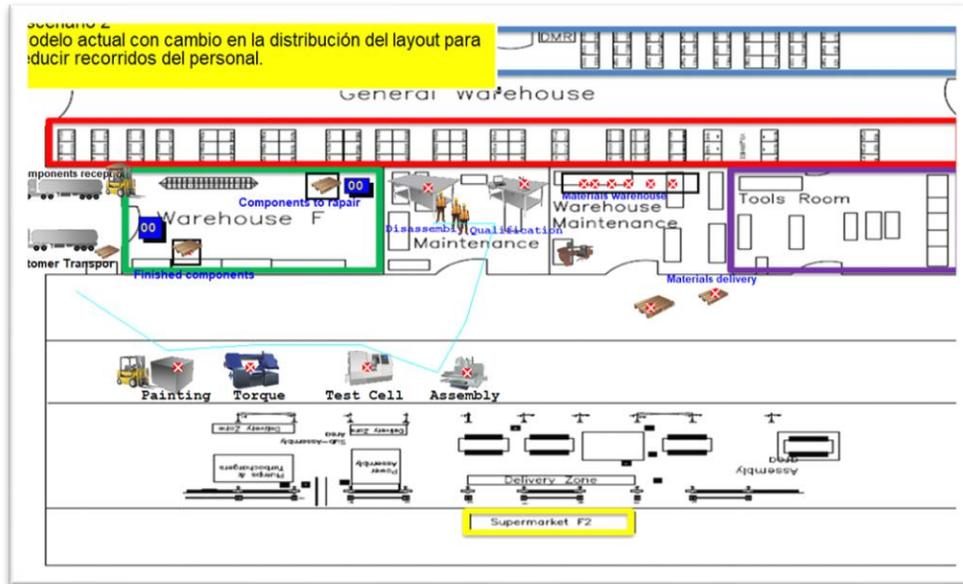


Figura 7. Modelo de simulación, escenario 2. Elaboración propia.

Escenario 3. En base al escenario 2, se considera el surtimiento de materiales tipo supermercado para que la disposición de los componentes sea ágil y rápida. Ver Figura 8.

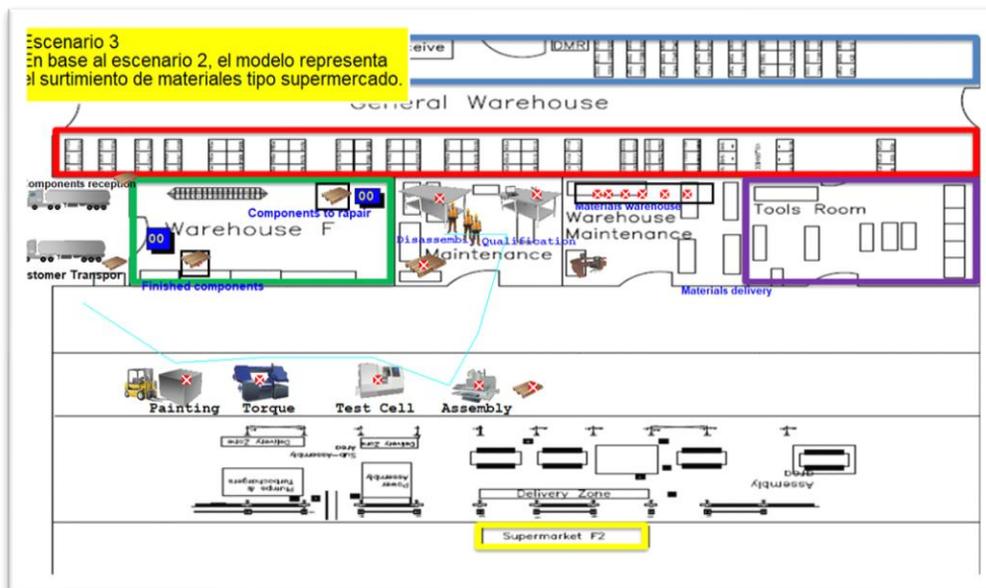


Figura 8. Modelo de simulación, escenario 3. Elaboración propia.

Escenario 4. Adicional al escenario 3 se implementan Kits de materiales en punto de uso (POU). Ver Figura 9.

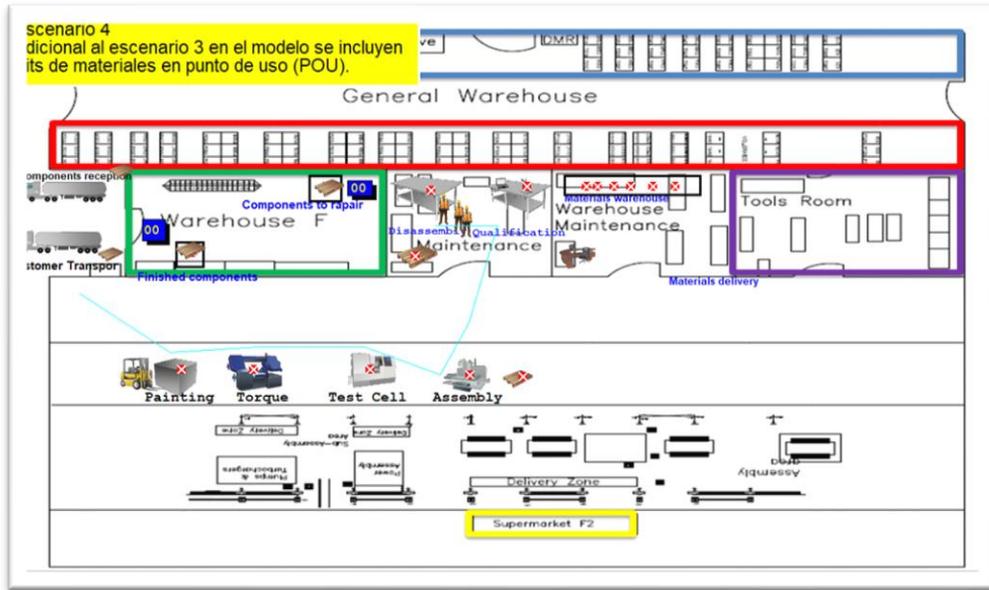


Figura 9. Modelo de simulación, escenario 4. Elaboración propia.

Escenario 5. Al escenario 4, se le adicionan herramientas digitales del IoT, para la comunicación en las diferentes áreas, usando la información en la nube, las estadísticas e información para la toma de decisiones. Ver Figura 10.

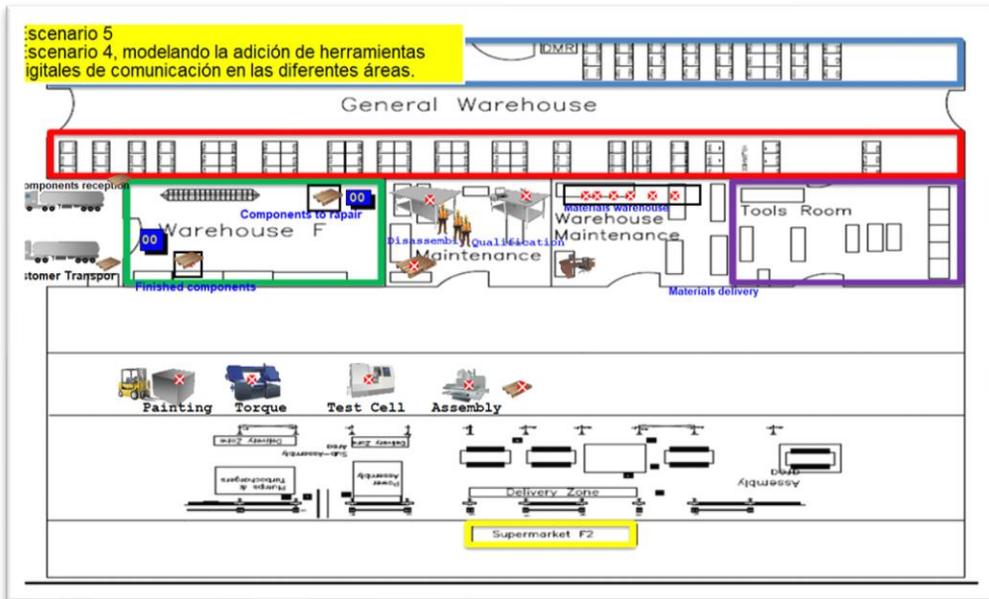


Figura 10. Modelo de simulación, escenario 5. Elaboración propia.

4.6 Integración de estrategias de LM e I4.0 en los modelos de simulación

En la Tabla 2 se describen las estrategias simuladas para cada uno de los escenarios estudiados, haciendo notar que estos se van mejorando en cada nivel, para encontrar el estado óptimo en el que se va a lograr el valor objetivo esperado.

Tabla 3. Modelos de simulación con el Diseño de estrategias de LM e Industria 4.0

Modelos de simulación	Descripción	Diseño de estrategias de LM, SC e I4.0
Escenario 1	Modelo de situación actual, con las condiciones iniciales del proceso de remanufactura del componente.	Ninguna
Escenario 2	Modelo actual con cambio en la distribución del layout para reducir recorridos del personal, reduciendo el tiempo ciclo y la productividad.	Manufactura esbelta: Rediseño de layout.
Escenario 3	En base al escenario 2, se considera el surtimiento de materiales tipo supermercado para que la disposición de los componentes sea ágil y rápida.	Manufactura esbelta: Reducción tiempos muertos de operario Cadena de suministros SC: Nueva disposición de materiales
Escenario 4	Adicional al escenario 3 se implementan Kits de materiales en punto de uso (POU).	Manufactura esbelta: Instalación de kits de materiales en POU. Cadena de suministros: Orden de materiales por Kit.
Escenario 5	Al escenario 4, se le adicionan herramientas digitales del IoT, para la comunicación en las diferentes áreas, usando la información en la nube, las estadísticas e información para la toma de decisiones.	Industria 4.0: Herramientas digitales de comunicación, información en la nube

Elaboración propia

5. RESULTADOS

5.1 Estadísticos de los modelos de simulación.

El estado de las entidades muestra que el total de salidas promedio de los escenarios 1,2,3,4 y 5 resultan en 28, 28, 31, 38 y 40 motores respectivamente, mostrando que el escenario 5 presentan la salida de 40 motores, que son los estadísticos esperados del valor objetivo planteado al inicio del proyecto, que era de 40 motores, además, el tiempo promedio que el motor permanece en el sistema es de 210.99 horas.

Los resultados por cada escenario de los tiempos esperados o promedio se describen como sigue:

1. El escenario 1 muestra una salida de 28 motores, con inventario de 1 motor, un tiempo total en el sistema de 250,09 horas, tiempo promedio del motor en movimiento lógico es de 99.36 horas, el tiempo promedio que el motor permanece en espera es de 28.52 horas, el tiempo promedio que el motor está en remanufactura es de 122.17 horas y un tiempo de bloqueo de 0.05 horas. Los traslados y las esperas suman un total de 250.09 horas, que representan los tiempos de no valor agregado o desperdicio en demoras.
2. El escenario 2 tiene una salida de 28 motores, quedando en proceso 1 pieza y resultando un tiempo ciclo promedio de 226.09 horas. El tiempo promedio en movimiento lógico de 99.86 horas, con tiempo promedio en esperas de 4.07 horas, y un tiempo promedio del motor en remanufactura de 122.17 horas. El tiempo total de no valor agregado resultó en 103.93 horas representando el 45.96 % del tiempo ciclo.
3. El escenario 3 dispone de 31 motores terminados, en un tiempo ciclo de 213.18 horas, quedando 1 motore en proceso, y muestra que el tiempo promedio en movimiento lógico es de 81.73 horas, el tiempo promedio de espera es de 3.48 horas, y el tiempo que el motor estuvo en remanufactura es de 111.17 horas, así como un tiempo de bloqueo de 5.8 horas. El tiempo de no valor agregado resulta de 91.01 horas, representando el 42.69 % del tiempo ciclo.

4. El escenario 4 muestra una producción total de 38 motores y 1 motor en proceso, en un tiempo ciclo de 212.45 horas, con tiempo promedio en movimiento lógico de 92.18 horas, tiempo promedio de esperas de 3.51 horas, un bloqueo de 5.10 horas, y con tiempo promedio de operación de 111.67 horas. El tiempo muerto total es de 100.79 horas, el cual representa el 47.44 % del tiempo total.
5. Finalmente, el escenario 5 arroja un total de 40 motores en un tiempo ciclo de 210.99 horas, con tiempos promedio en movimiento lógico de 91.90 horas, en espera de 3.19 horas y en operación de 111.17 horas. El resultado del tiempo de no valor agregado es de 99.82 horas equivalente al 47,31% del tiempo total.

Los resultados del estado de la producción por cada escenario se describen en la tabla 4, donde se puede observar que el escenario 5 refleja el programa esperado de los 40 componentes remanufacturados durante un año.

Tabla 4. Tiempos promedio del estado del motor.

Escenario	Salidas totales (motores)	Inventario en proceso (motores)	Tiempo en Sistema Promedio (hr)	Tiempo en lógica de movimiento Promedio (hr)	Tiempo en Espera Promedio (hr)	Tiempo en Operación Promedio (hr)	Tiempo de Bloqueo Promedio (hr)
1	28.00	1.00	250.09	99.36	28.52	122.17	0.05
2	28.00	1.00	226.09	99.86	4.07	122.17	0.00
3	31.00	1.00	213.18	81.73	3.48	122.17	5.80
4	37.00	1.00	212.45	92.18	3.51	111.67	5.10
5	40.00	0.00	210.99	91.90	3.19	111.17	4.73

Elaboración propia.

La Tabla 5 representa las salidas, inventarios y tiempos de traslados, en espera y bloqueos de los insumos que entran al proceso de remanufactura en la estación de ensamble, donde se puede observar que el escenario 5 refleja las mejores condiciones del estado de los materiales, reduciendo los tiempos de inventario en el sistema.

Tabla 5. Tiempos promedio del estado de los materiales.

Escenario	Salidas de Materia Prima	Inventario de materiales	Tiempo en Sistema Promedio (hr)	Tiempo en lógica de movimiento Promedio (hr)	Tiempo en Espera Promedio (hr)	Tiempo de Bloqueo Promedio (hr)
1	28.00	12.00	3,908.68	0.92	325.56	3582.21
2	28.00	12.00	3,907.18	0.42	325.52	3581.24
3	31.00	9.00	3815.92	0.00	294.24	3521.68
4	38.00	2.00	3737.89	0.00	245.71	3,492.18
5	40.00	2.00	356.24	0.00	220.07	136.17

Los resultados del estado de las entidades medido en porcentaje de sus tiempos resultan como sigue:

1. El escenario 1 refleja que el motor se encuentra en movimiento lógico 39.73 % del tiempo total, el 11.40 % permanece en espera, el 48.85 % permanece en operación, es decir en la remanufactura del motor, y resulta un bloqueo de 0.02%.
2. El escenario 2 muestra que el 44.17 % del tiempo total se refiere a tiempo de movimiento lógico del motor, el 1.80 % en espera y un 54.03 % en operación, sin presentar bloqueos.
3. El escenario 3 presenta el 37.73 % del tiempo en movimiento lógico, 11.40 % en espera, el 48.85 % en operación y un bloqueo de 0.02 %.
4. El escenario 4 distribuye el 43.39 % en movimiento lógico, el 1.65 % en espera, el 52.56 % en operación y 2.40 % de bloqueo.
5. El escenario 5 muestra el 43.56 % en lógica de movimientos, 1.51 % en esperas, 52.69 % en operación, con bloqueo del 2.25%.

El resumen de resultados de los porcentajes de tiempo por escenario se muestra en la Tabla 6 y los porcentajes de tiempo de los materiales, se muestran en la Tabla 7

Tabla 6. Porcentaje de tiempos por escenario.

Escenario	% En Lógica de Movimiento	% Esperando	% En Operación	% Bloqueado
1	39.73	11.40	48.85	0.02
2	44.17	1.80	54.03	0.00
3	39.73	11.40	48.85	0.02
4	43.39	1.65	52.56	2.40
5	43.56	1.51	52.69	2.24

Elaboración propia.

Tabla 7. Resumen de resultados de porcentaje de tiempos de los materiales

Escenario	% En Lógica de Movimiento	% Esperando	% Bloqueado
1	0.02	8.33	91.65
2	0.02	8.33	91.65
3	0.00	6.57	93.43
4	0.00	6.57	93.43
5	0.00	61.78	38.22

Del análisis que se realizó en cada escenario, al incluir las diferentes estrategias integradas, se obtuvieron estadísticas como el inventario en el sistema, que se midió en unidades de motores, los tiempos de valor agregado y no agregado (desperdicio), medidos en horas, y los indicadores que representan a las variables dependientes. En el caso de estudio las variables dependientes representan la productividad y el tiempo total de producción, es decir el tiempo ciclo del proceso. Ver tabla 8.

Se puede resumir que es el escenario 5 el que integra las estrategias de mejora, así como el uso de las tecnologías digitales, y que representa el diseño más cercano para alcanzar el objetivo de remanufacturar 40 motores en un año. Este escenario logra alcanzar una productividad de 40 motores con un tiempo ciclo de 210.99 horas en promedio. En la Tabla 6 se describen las estrategias y los resultados de los 5 escenarios con sus respectivos indicadores

Las operaciones que se representan en el modelo de simulación son las que resultaron óptimas en el modelo del escenario 5, donde el operador debe seguir las instrucciones del trabajo, que se tendrá disponible en la hoja de proceso (Ver Anexo 1) aprobada previamente por el departamento de manufactur

Tabla 8. Análisis de los modelos de simulación estudiados.

Modelos de simulación	Descripción	Estrategias de LM e I4.0	Inventario en el sistema (motor)	Tiempo de valor agregado (hr)	Tiempo de valor no agregado (hr)	Indicadores
Escenario 1	Condiciones iniciales del proceso de remanufactura del componente.	Ninguna	1	122.27	127.92	Productividad: 28 motores Tiempo ciclo: 250.09 horas
Escenario 2	Nueva distribución del layout inicial, reduciendo recorridos del personal.	Manufactura esbelta: rediseño de layout.	1	122.27	103.93	Productividad: 28 motores Tiempo ciclo: 226.09 horas
Escenario 3	Escenario escalado con surtimiento de materiales supermercado.	2 Manufactura esbelta: Reducción tiempos muertos de operario Supply Chain: Nueva disposición de materiales	1	122.27	91.01	Productividad: 31 motores Tiempo ciclo: 213.18 horas
Escenario 4	Escenario 3 con materiales en punto de uso (POU).	Manufactura esbelta: Instalación de kits de materiales en POU.	1	111.67	100.79	Productividad: 38 motores Tiempo ciclo: 212.45 horas
Escenario 5	Escenario herramientas digitales de información.	4 Industria Herramientas digitales de comunicación, información en la nube	0	111.17	99.82	Productividad: 40 motores Tiempo ciclo: 210.99 horas

Elaboración propia

5.2 Discusión de resultados.

La pregunta de investigación planteada en el caso de estudio ¿Se pueden integrar estrategias de manufactura esbelta e Industria 4.0, para justificar e instalar una nueva línea para el componente, que sea competente con los tiempos del sitio, y cumplir la demanda esperada? Los resultados muestran que la capacidad de la línea en equipo y recursos humanos cumplen con los requisitos y condiciones para que esta línea se pueda instalar, con la integración de los elementos en estudio. El modelo del escenario 5 cumple con las características para cumplir con la demanda esperada, de remanufacturar 40 motores en un año.

Mediante la aplicación de herramientas Lean, en asociación con las tecnologías de la Industria 4.0 y la personalización a partir de un caso de estudio en un proceso de remanufactura, los resultados fueron favorables para la empresa, ya que cuenta con información de las mejoras representadas en indicadores de tal manera que podrá seleccionar el diseño adecuado para sus procesos y, por ende, aumentar su desempeño.

Se encontró que la existencia de LM es una función de apoyo para la implementación de la I4.0, siendo en ocasiones una condición esencial para la fabricación inteligente a través de la Industria 4.0.

El análisis realizado y los modelos gráficos configurados proporcionan un marco para la integración de sistemas eficientes de Lean en el entorno de la Industria 4.0.

Al mapear todo el proceso de remanufactura, se identificaron las posibles fuentes de desperdicio, para garantizar el flujo continuo y optimizar la producción.

El modelado y optimización de simulación con eventos discretos de la línea de remanufactura permitió probar el comportamiento del sistema, su reconfiguración y la reducción de los asincronismos presentados. La solución Industria 4.0, para introducir las mejoras en la línea de fabricación, resultó del diseño de un modelo del sistema real mediante el uso de un software específico.

El resultado de la introducción de herramientas de mejora, así como de tecnologías tuvo un efecto positivo al aumentar la productividad. Esta investigación proporciona una

descripción general de las características de las herramientas Lean y las tecnologías I4.0 y una visión de su integración para desarrollar sistemas de producción avanzados.

6. CONCLUSIONES

El objetivo central que se propuso con esta investigación fue "Simular mediante modelos o prototipos las estrategias de la manufactura esbelta en los procesos de fabricación en el contexto de la industria 4.0 ". En este sentido, se cumplió cabalmente con lo planeado, al estudiar un caso real en una empresa, donde se pudieron caracterizar los modelos de simulación, representando 5 escenarios con estrategias de manufactura esbelta e Industria 4.0, logrando con esto hacer comparaciones con los resultados obtenidos.

Los resultados muestran, con base en las estadísticas obtenidas de los modelos de simulación, cómo las herramientas I4.0 se pueden integrar con LM, lo que permite mejorar tanto la flexibilidad como la productividad en los procesos de manufactura.

Asimismo, varios autores sostienen que el factor humano puede ser considerado un aspecto clave para dicha integración. Las tecnologías de IoT, CPS y Big Data tienen un impacto poderoso para la implementación de LM dentro de un entorno I4.0, siendo las llamadas herramientas básicas capaces de ayudar en la toma de decisiones industriales. La aplicación en el caso de estudio arroja datos de rendimiento simulados, contrastados con información real, lo que permite comprender los beneficios potenciales de una solución integrada de LM e I4.0.

Por otro lado, se puede afirmar que la coexistencia entre las tecnologías I4.0 y las prácticas de LM no es conflictiva, que al integrarlas se puede obtener un mejor cumplimiento con las demandas futuras del mercado.

Una de las limitaciones observadas en este estudio es la aplicación de un caso particular en el sector de la remanufactura, para el propósito de este trabajo no es suficiente para llegar a conclusiones más amplias.

Finalmente, como lo afirma [76] los resultados del estudio sugieren que la Industria 4.0 se puede implementar de forma incremental mientras las empresas aumentan sus capacidades digitales y su madurez.

Las futuras investigaciones se pueden orientar hacia estudios adicionales destinadas a investigar si la implementación de una colección específica de diferentes tecnologías de I4.0 y herramientas de LM puede generar ventajas en comparación con una selección limitada de ambas. Otras futuras líneas de investigación apuntan a investigar las mejores prácticas de esta combinación de elementos, en otras áreas de aplicación.

7. FUENTES BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Florescu and S. Barabas, "Development Trends of Production Systems through the Integration of Lean Management and Industry 4.0," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 10, p. 4885, May 2022, doi: 10.3390/app12104885.
- [2] M. P. Sarria, G. A. Fonseca, and C. C. Bocanegra, "Methodological model in the implementation of lean manufacturing," *Revista EAN*, no. 83, pp. 51–71, 2017.
- [3] G. Lampropoulos, K. Siakas, and T. Anastasiadis, "Internet of Things in the Context of Industry 4.0: An Overview," *International Journal of Entrepreneurial Knowledge*, vol. 7, no. 1, Walter de Gruyter GmbH, pp. 4–19, Jul. 10, 2019.
- [4] J. A. Yui-yip Lau, Adolf K.Y. Ng, *Principles of Global Supply Chain Management*, First. London, UK and New York, USA: Anthem Press, 2019.
- [5] A. Mofolasayo, S. Young, P. Martinez, and R. Ahmad, "How to adapt lean practices in SMEs to support Industry 4.0 in manufacturing," in *Procedia Computer Science*, Jan. 2022, vol. 200, pp. 934–943, doi: 10.1016/j.procs.2022.01.291.
- [6] C. Cagnetti, T. Gallo, C. Silvestri, and A. Ruggieri, "Lean production and Industry 4.0: Strategy/management or technique/implementation? A systematic literature review," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 180, pp. 404–413, 2021, doi: 10.1016/J.PROCS.2021.01.256.
- [7] J. P. Womack, D. T. Jones, and D. Roos, "The machine that changed the world," *Bus. Horiz.*, vol. 35, no. 3, pp. 81–82, 1992, doi: 10.1016/0007-6813(92)90074-J.
- [8] T. Gallo, C. Cagnetti, C. Silvestri, and A. Ruggieri, "Industry 4.0 tools in lean production: A systematic literature review," in *Procedia Computer Science*, 2021, vol. 180, pp. 394–403, doi: 10.1016/j.procs.2021.01.255.
- [9] V. M. Ibarra Balderas and L. L. Ballesteros Medina, "Manufactura Esbelta," *Concienc. Tecnológica*, no. 53, pp. 1–7, 2017, Accessed: Dec. 11, 2020. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/944/94453640004/html/index.html>.
- [10] C. Pereira and H. K. Sachidananda, "Impact of industry 4.0 technologies on lean manufacturing and organizational performance in an organization," *Int. J. Interact. Des. Manuf.*, vol. 16, no. 1, pp. 25–36, Mar. 2022, doi: 10.1007/s12008-021-00797-7.
- [11] F. Rosin, P. Forget, S. Lamouri, and R. Pellerin, "Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 6, pp. 1644–1661, Mar. 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1672902.
- [12] S. M. Zahraee, A. Toloioe, S. J. Abrishami, N. Shiwakoti, and P. Stasinopoulos, "Lean manufacturing analysis of a Heater industry based on value stream mapping and computer simulation," *Procedia Manuf.*, vol. 51, pp. 1379–1386, 2020, doi: 10.1016/J.PROMFG.2020.10.192.

- [13] M. Zoubek, P. Poor, T. Broum, J. Basl, and M. Simon, "Industry 4.0 maturity model assessing environmental attributes of manufacturing company," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 11, 2021, doi: 10.3390/app11115151.
- [14] L. Rivera Cadavid, J. A. Dinas, and P. Franco Caicedo, "Applying Systems Thinking to Lean Manufacturing Learning," *Sist. y Telemática*, vol. 7, no. 14, p. 109, 2010, doi: 10.18046/syt.v7i14.1016.
- [15] O. Aguilar, N. Peña, and A. Navarrete, "Lean manufacturing and its effect on the continuity of micro and small businesses | La manufactura esbelta y su efecto en la continuidad de la micro y pequeña empresa," *Espacios*, vol. 39, no. 44, pp. 2–11, 2018, Accessed: Dec. 10, 2020. [Online]. Available: <http://www.revistaespacios.com/a18v39n44/a18v39n44p11.pdf>.
- [16] J. P. Womack, D. T. Jones, and D. Roos, "The Machine That Changed the World: The Story of Lean Production-- Toyota's Secret Weapon in the Global Car Wars That Is Now Revolutionizing World Industry." p. 352, 2007, Accessed: Dec. 11, 2021. [Online]. Available: <https://www.amazon.com.mx/Machine-That-Changed-World-Revolutionizing/dp/0743299795?asin=B001D1SRRS&revisionId=&format=2&depth=1>.
- [17] J. P. Womack and D. T. Jones, *Lean Thinking, Banish waste and create wealth in your corporation*, Second edi. New York, N.Y., 2003.
- [18] S. Vaidya, P. Ambad, and S. Bhosle, "Industry 4.0 - A Glimpse," *Procedia Manuf.*, vol. 20, pp. 233–238, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.034.
- [19] Y. Yin, K. E. Stecke, and D. Li, "The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 1–2, pp. 848–861, 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1403664.
- [20] A. Mahmood, A. Arshad, M. Nazam, and M. Nazim, "Developing an interplay among the psychological barriers for the adoption of industry 4.0 phenomenon," *PLoS ONE*, vol. 16, no. 8 August. Public Library of Science, Aug. 01, 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0255115.
- [21] E. Oztemel and S. Gursev, "Literature review of Industry 4.0 and related technologies," *J. Intell. Manuf.*, vol. 31, no. 1, pp. 127–182, 2020, doi: 10.1007/s10845-018-1433-8.
- [22] V. Taghavi and Y. Beauregard, "The relationship between lean and industry 4.0: Literature review," *Proc. Int. Conf. Ind. Eng. Oper. Manag.*, no. August, pp. 808–820, 2020.
- [23] V. Alcácer and V. Cruz-Machado, "Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 22, no. 3, pp. 899–919, 2019, doi: 10.1016/j.jestch.2019.01.006.
- [24] G. Büchi, M. Cugno, and R. Castagnoli, "Smart factory performance and Industry 4.0," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 150, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.techfore.2019.119790.

- [25] C. G. Machado, M. Winroth, D. Carlsson, P. Almström, V. Centerholt, and M. Hallin, "Industry 4.0 readiness in manufacturing companies: Challenges and enablers towards increased digitalization," in *Procedia CIRP*, 2019, vol. 81, pp. 1113–1118, doi: 10.1016/j.procir.2019.03.262.
- [26] D. Borah, K. Malik, and S. Massini, "Teaching-focused university–industry collaborations: Determinants and impact on graduates' employability competencies," *Res. Policy*, vol. 50, no. 3, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.RESPOL.2020.104172.
- [27] A. Turkyilmaz, D. Dikhanbayeva, Z. Suleiman, S. Shaikholla, and E. Shehab, "Industry 4.0: Challenges and opportunities for Kazakhstan SMEs," in *Procedia CIRP*, Jan. 2020, vol. 96, pp. 213–218, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.077.
- [28] J. Lee, H. A. Kao, and S. Yang, "Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment," in *Procedia CIRP*, 2014, vol. 16, pp. 3–8, doi: 10.1016/j.procir.2014.02.001.
- [29] A. Forcina and D. Falcone, "The role of Industry 4.0 enabling technologies for safety management: A systematic literature review," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 180, pp. 436–445, 2021, doi: 10.1016/J.PROCS.2021.01.260.
- [30] Alasdair Gilchrist, *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*. 2016.
- [31] V. Havard, B. Jeanne, M. Lacomblez, and D. Baudry, "Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations," *Prod. Manuf. Res.*, vol. 7, no. 1, pp. 472–489, 2019, doi: 10.1080/21693277.2019.1660283.
- [32] A. Florescu and S. A. Barabas, "Modeling and Simulation of a Flexible Manufacturing System-A Basic Component of Industry 4.0," doi: 10.3390/app10228300.
- [33] Y. Wang, J. Li, S. Hongbo, Y. Li, F. Akhtar, and A. Imran, "A survey on VV&A of large-scale simulations," *Int. J. Crowd Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 63–86, Jun. 2019, doi: 10.1108/IJCS-01-2019-0004/FULL/PDF.
- [34] N. Hurtado, M. Ruiz, E. Orta, and J. Torres, "Using simulation to aid decision making in managing the usability evaluation process," *Inf. Softw. Technol.*, vol. 57, no. 1, pp. 509–526, 2015, doi: 10.1016/j.infsof.2014.06.001.
- [35] J. Banks, J. Carson II, B. Nelson, and D. Nicol, "Discrete-Event System Simulatuon," in *Pearson Education*, 2014.
- [36] INCOSE, *Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*, no. August. 2007.
- [37] J. Liker, *The Toyota Way: Fourteen Management Principles From the World S Greatest Manufacturer*. 2004.
- [38] V. Agostinho and C. R. Baldo, "Assessment of the impact of Industry 4.0 on the skills

- of Lean professionals," in *Procedia CIRP*, 2020, vol. 96, pp. 225–229, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.079.
- [39] D. Arey, C. H. Le, and J. Gao, "Lean industry 4.0: A digital value stream approach to process improvement," in *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 54, pp. 19–24, doi: 10.1016/j.promfg.2021.07.004.
- [40] N. Dahmani, K. Benhida, A. Belhadi, S. Kamble, S. Elfezazi, and S. K. Jauhar, "Smart circular product design strategies towards eco-effective production systems: A lean eco-design industry 4.0 framework," *J. Clean. Prod.*, vol. 320, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128847.
- [41] F. Dillinger, B. Tropschuh, M. Y. Dervis, and G. Reinhart, "A Systematic Approach to Identify the Interdependencies of Lean Production and Industry 4.0 Elements," *Procedia CIRP*, vol. 112, pp. 85–90, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.09.041.
- [42] P. E. Dossou, P. Torregrossa, and T. Martinez, "Industry 4.0 concepts and lean manufacturing implementation for optimizing a company logistics flows," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 200, pp. 358–367, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.01.234.
- [43] M. H. Eslami, H. Jafari, L. Achtenhagen, J. Carlbäck, and A. Wong, "Financial performance and supply chain dynamic capabilities: the Moderating Role of Industry 4.0 technologies," *Int. J. Prod. Res.*, pp. 1–18, Aug. 2021, doi: 10.1080/00207543.2021.1966850.
- [44] H. Fatorachian and H. Kazemi, "Impact of Industry 4.0 on supply chain performance," *Prod. Plan. Control*, vol. 32, no. 1, pp. 63–81, 2021, doi: 10.1080/09537287.2020.1712487.
- [45] C. L. Garay-Rondero, J. L. Martinez-Flores, N. R. Smith, S. O. Caballero Morales, and A. Aldrette-Malacara, "Digital supply chain model in Industry 4.0," *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 31, no. 5, pp. 887–933, Nov. 2020, doi: 10.1108/JMTM-08-2018-0280/FULL/PDF.
- [46] A. Korchagin, Y. Deniskin, I. Pocebneva, and O. Vasilyeva, "Lean Maintenance 4.0: Implementation for aviation industry," *Transp. Res. Procedia*, vol. 63, pp. 1521–1533, 2022, doi: 10.1016/j.trpro.2022.06.164.
- [47] P. Langlotz, C. Siedler, and J. C. Aurich, "Unification of lean production and Industry 4.0," *Procedia CIRP*, vol. 99, pp. 15–20, 2021, doi: 10.1016/J.PROCIR.2021.03.003.
- [48] M. Marinelli, A. Ali Deshmukh, M. Janardhanan, and I. Nielsen, "Lean manufacturing and industry 4.0 combinative application: Practices and perceived benefits," in *IFAC-PapersOnLine*, 2021, vol. 54, no. 1, pp. 288–293, doi: 10.1016/j.ifacol.2021.08.034.
- [49] L. Naciri, Z. Mouhib, M. Gallab, M. Nali, R. Abbou, and A. Kebe, "Lean and industry 4.0: A leading harmony," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 200, pp. 394–406, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.01.238.
- [50] S. Rajab, M. Afy-Shararah, and K. Salonitis, "Using Industry 4.0 Capabilities for

- Identifying and Eliminating Lean Wastes," *Procedia CIRP*, vol. 107, pp. 21–27, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.04.004.
- [51] R. D. Raut, V. S. Yadav, N. Cheikhrouhou, V. S. Narwane, and B. E. Narkhede, "Big data analytics: Implementation challenges in Indian manufacturing supply chains," *Comput. Ind.*, vol. 125, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.compind.2020.103368.
- [52] M. Raweewan and F. Kojima, "Digital lean manufacturing - Collaborative university-industry education in systems design for lean transformation," in *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 45, pp. 183–188, doi: 10.1016/j.promfg.2020.04.092.
- [53] F. Schulze and P. Dallasega, "Industry 4.0 concepts and lean methods mitigating traditional losses in engineer-to-order manufacturing with subsequent assembly on-site: A framework," in *Procedia Manufacturing*, 2020, vol. 51, pp. 1363–1370, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.190.
- [54] R. Titmarsh, F. Assad, and R. Harrison, "Contributions of lean six sigma to sustainable manufacturing requirements: An industry 4.0 perspective," *Procedia CIRP*, vol. 90, pp. 589–593, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.02.044.
- [55] P. Langlotz and J. C. Aurich, "Causal and temporal relationships within the combination of Lean Production Systems and Industry 4.0," in *Procedia CIRP*, 2020, vol. 96, pp. 236–241, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.080.
- [56] O. T. Adenuga, K. Mpofu, and R. I. Boitumelo, "Energy efficiency analysis modelling system for manufacturing in the context of industry 4.0," *Procedia CIRP*, vol. 80, pp. 735–740, 2019, doi: 10.1016/J.PROCIR.2019.01.002.
- [57] R. D. Raut, S. K. Mangla, V. S. Narwane, M. Dora, and M. Liu, "Big Data Analytics as a mediator in Lean, Agile, Resilient, and Green (LARG) practices effects on sustainable supply chains," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 145, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.TRE.2020.102170.
- [58] A. S. Chauhan *et al.*, "Predictive Big Data Analytics for Service Requests: A Framework," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 198, pp. 102–111, 2021, doi: 10.1016/J.PROCS.2021.12.216.
- [59] F. Muheidat, D. Patel, S. Tammisetty, L. A. Tawalbeh, and M. Tawalbeh, "Emerging Concepts Using Blockchain and Big Data," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 198, pp. 15–22, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.PROCS.2021.12.206.
- [60] M. Cugno, R. Castagnoli, and G. Büchi, "Openness to Industry 4.0 and performance: The impact of barriers and incentives," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 168, p. 120756, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.techfore.2021.120756.
- [61] G. Büchi, M. Cugno, and R. Castagnoli, "Economies of Scale and Network Economies in Industry 4.0," *Symphonya. Emerg. Issues Manag.*, no. 2, pp. 66–76, Dec. 2020, doi: 10.4468/2018.2.06buchicugno.castagnoli.
- [62] C. Cimini, R. Pinto, G. Pezzotta, and P. Gaiardelli, "The transition towards industry 4.0: business opportunities and expected impacts for suppliers and manufacturers,"

IFIP Adv. Inf. Commun. Technol., vol. 513, pp. 119–126, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-66923-6_14.

- [63] I. de la Peña Zarzuelo, M. J. Freire Soeane, and B. López Bermúdez, "Industry 4.0 in the port and maritime industry: A literature review," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 20, no. October, p. 100173, 2020, doi: 10.1016/j.jii.2020.100173.
- [64] J. M. Müller, J. W. Veile, and K. I. Voigt, "Prerequisites and incentives for digital information sharing in Industry 4.0 – An international comparison across data types," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 148, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106733.
- [65] Z. Kang, C. Catal, and B. Tekinerdogan, "Machine learning applications in production lines: A systematic literature review," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 149. Elsevier Ltd, Nov. 01, 2020, doi: 10.1016/j.cie.2020.106773.
- [66] L. Da Xu, E. L. Xu, and L. Li, "Industry 4.0: State of the art and future trends," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 8, pp. 2941–2962, 2018, doi: 10.1080/00207543.2018.1444806.
- [67] M. Panzer and B. Bender, "Deep reinforcement learning in production systems: a systematic literature review," *Int. J. Prod. Res.*, 2021, doi: 10.1080/00207543.2021.1973138.
- [68] P. K. Paritala, S. Manchikatla, and P. K. D. V. Yarlagadda, "Digital Manufacturing-Applications Past, Current, and Future Trends," *Procedia Eng.*, vol. 174, pp. 982–991, 2017.
- [69] C. G. Machado, M. P. Winroth, and E. H. D. Ribeiro da Silva, "Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 5, pp. 1462–1484, Mar. 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1652777.
- [70] M. Sony, "Pros and cons of implementing Industry 4.0 for the organizations: a review and synthesis of evidence," *Prod. Manuf. Res.*, vol. 8, no. 1, pp. 244–272, Jan. 2020, doi: 10.1080/21693277.2020.1781705.
- [71] W. S. Alaloul, M. S. Liew, N. A. W. A. Zawawi, and I. B. Kennedy, "Industrial Revolution 4.0 in the construction industry: Challenges and opportunities for stakeholders," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 11, no. 1, 2020, doi: 10.1016/j.asej.2019.08.010.
- [72] A. Moeuf, S. Lamouri, R. Pellerin, S. Tamayo-Giraldo, E. Tobon-Valencia, and R. Eburdy, "Identification of critical success factors, risks and opportunities of Industry 4.0 in SMEs," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 5, pp. 1384–1400, Mar. 2020, doi: 10.1080/00207543.2019.1636323.
- [73] M. Sony and S. Naik, "Critical factors for the successful implementation of Industry 4.0: a review and future research direction," *Prod. Plan. Control*, vol. 31, no. 10, pp. 799–815, Jul. 2020, doi: 10.1080/09537287.2019.1691278.
- [74] R. Kumar, R. K. Singh, and Y. K. Dwivedi, "Application of industry 4.0 technologies in SMEs for ethical and sustainable operations: Analysis of challenges," *J. Clean. Prod.*, vol. 275, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124063.

- [75] D. Dikhanbayeva, A. Tokbergenova, Y. Likhmanov, E. Shehab, Z. Pastuszak, and A. Turkyilmaz, "Critical factors of industry 4.0 implementation in an emerging country: Empirical study," *Futur. Internet*, vol. 13, no. 6, 2021, doi: 10.3390/fi13060137.
- [76] W. de Paula Ferreira, F. Armellini, L. A. de Santa-Eulalia, and V. Thomasset-Laperrière, "A framework for identifying and analysing industry 4.0 scenarios," *J. Manuf. Syst.*, vol. 65, pp. 192–207, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.jmsy.2022.09.002.

Anexo 1

Hoja de proceso

NOTA: Por cuestiones de privacidad de la empresa, no puede mostrarse el formato oficial empleado durante el desarrollo del proyecto.

"Nombre del proceso"	Página
Datos generales: Quien elaboró, quienes revisaron, fecha, proceso al que está relacionado.	

Secuencia	Descripción del Proceso	Ayuda Visual
Orden que llevan las operaciones durante el desarrollo del proceso, puede hacerse uso de nomenclaturas.	Análisis detallado de las operaciones que deben realizarse para llevar a cabo el proceso, mencionando herramientas necesarias, así como sus medidas y todo dato que pueda ser útil para nuevas personas que necesiten conocer en un futuro el proceso.	Imágenes y/o esquemas que puedan facilitar y/o ayudar al mejor entendimiento del proceso.

Equipo El EPP necesario para desarrollar las actividades de manera segura.	Autorizaciones Autorización por el departamento encargado.	Nomenclatura: Descripción de la nomenclatura empleada.
--	--	--

Figura 1.1 Hoja de proceso

"JSA"

Datos generales	Alcance del análisis	Capacitación requerida	Equipo de protección personal (EPP)	En caso de emergencia
-Quien analizó y autorizó. -Supervisores de línea. -Fecha. -Proceso al que pertenece.	En caso de pertenecer a un proceso mayor, solo especificar que parte del proceso se analizará.	Con que conocimientos debe contar el operador para trabajar de manera segura en este proceso.	Con que equipo mínimo de protección personal debe contar el trabajador para laborar dentro de esta línea.	A quien recurrir en caso de que ocurra un accidente y modo en que se pueda contactar con ellos.

Actividades Consideradas Peligrosas	Riesgos Potenciales	Procedimiento/Control Recomendado
Listado de las principales actividades del proceso en las que exista algún riesgo de accidente al momento de estar llevando a cabo la operación.	Analizando cada una de estas actividades, mencionar que riesgo es al que se enfrenta al no trabajar adecuadamente la actividad.	Habiendo identificado el riesgo, proceder a dar una solución para evitar ocurra un accidente, empleando EPP o realizando una operación de una manera específica.

Figura 1.2 JSA

NOTA: Por cuestiones de privacidad de la empresa, no puede mostrarse el formato oficial empleado durante el desarrollo del proyecto.

Plan de calidad

PLAN DE CALIDAD							Página
-Pieza a trabajar -procedencia -cantidad de piezas -Datos para localización futura de la pieza (número de serie, entre otros)							
Característica a controlar	CTQ	Especificación	Instrumento	Resultado	Operador	Fecha	Notas
Pruebas a las que van a ser sometidas las piezas para comprobar que cumplan con un estándar de calidad y estas sean útiles para su uso futuro.	Características críticas durante el análisis.	Estándares con los que se cuenta cada una de las pruebas para determinar el cumplimiento de la especificación.	Herramienta necesaria para llevar a cabo la prueba.	Cumplió o no con la prueba.	Quién elaboró las pruebas	Fecha	Alguna situación diferente a tomar en cuenta

Firma del supervisor: _____

NOTA: Por cuestiones de privacidad de la empresa, no puede mostrarse el formato oficial empleado durante el desarrollo del proyecto.

Figura 1.3 Plan de calidad

Anexo 2.

Elementos del modelo de simulación, escenario 5.

```
*****
*
*                               *
*           Listado del modelo formateado:           *
* c:\users\rhfj\onedrive\documentos\sabático 2022\reportes intermedio y final
*                               *
```

```
*****
Unidades de Tiempo:           Horas
Unidades de Distancia:       Metros
Lógica de Inicialización:    Animate 19
*****
```

```
*                               *
*           Locaciones           *
*****
```

Nombre	Cap	Unidades	Estadist	Reglas
Pallet	10	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Pallet2	10	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Qualification	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Torque	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Painting	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Disassembly	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Alm_recibo	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Alm_mat	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Almacén_de_PT	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Comp_rep	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Comp_cliente	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Desk	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Test_Cell	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Assembly	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Pallet3	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Loc2	INF	1	Series de tiempo	Más Tiempo,
Pallet4	1	1	Series de tiempo	Más Tiempo,

```
*****
*                               *
*           Entidades           *
*****
```

Nombre	Velocidad (mpm)	Estadist	Costos
Engine	50	Series de tiempo	
MP	50	Series de tiempo	

```
*****
*                               *
*           Redes de Ruta       *
*****
```

Nombre	Tipo	T/V	Desde	Hasta	BI	Distancia/Tiempo
Factor de Velocidad						

Red1_recibo	Sobrepasar	Tiempo	N1	N2	Bi	10 MIN	1
Red2_salida	Sobrepasar	Tiempo	N1	N2	Bi	10 MIN	1
Ruta_de_montacargas2	Sobrepasar	Tiempo	N1	N2	Bi	15 MIN	
Ruta_montacargas_1	Sobrepasar	Tiempo	N1	N2	Bi	10 MIN	1
			N2	N3	Bi	10 MIN	
Ruta_Worker	Sobrepasar	Tiempo	N1	N2	Bi	10 MIN	1
			N2	N3	Bi	10 MIN	1
			N3	N4	Bi	10 MIN	
			N4	N5	Bi	10 MIN	
			N5	N6	Bi	10 MIN	
			N1	N7	Bi	1 MIN	

* Interfaces *

Red	Nodo	Locación
Red1_recibo	N1	Pallet
	N2	Comp_para_reparación
Red2_salida	N1	Pallet2
	N2	Comp_para_cliente
Ruta_de_montacargas2	N2	Almacén_de_PT
	N1	Painting
Ruta_montacargas_1	N3	Pallet3
	N2	Almacen_de_recibo
	N1	Pallet
Ruta_Worker	N6	Disassembly
	N5	Qualification
	N4	Assembly
	N3	Test_Cell
	N2	Torque
	N1	Painting

* Mapeo *

Red	Desde	Hasta	Dest
Ruta_Worker	N2	N1	
	N3	N2	
	N4	N3	
	N2	N3	
	N3	N4	
	N4	N5	

* Recursos *

Nombre	Rec	Ent	Buscar	Buscar	Ruta	Movimiento
	Unidades Estadíst	Buscar	Buscar	Ruta		

```

-----
Truck_recibo 1 Por Unidad Ninguna Más Tiempo Red1_recibo Vacío:
150 mpm
Home: N1 Lleno: 150 mpm

Truck_despacho 1 Por Unidad Ninguna Más Tiempo Red2_salida Vacío:
150 mpm
Home: N1 Lleno: 150 mpm

Forktruck 1 Por Unidad Más Cercano Más Tiempo Ruta_montacargas_1
Vacío: 50 mpm
Home: N3
(Regresar) Lleno: 50 mpm

Worker 3 Por Unidad Menos Utilizados Más Tiempo Ruta_Worker Vacío:
50 mpm
Home: N6
(Regresar) Lleno: 50 mpm

Forktruck2 1 Por Unidad Más Cercano Más Tiempo Ruta_de_montacargas2
Vacío: 150 mpm
Home: N1
(Regresar) Lleno: 150 mpm

```

```

*****
*
*
*
*****

```

```

Procesamiento
*****
Proceso Enrutamiento
Entidad Locación Operación Blk Salida Destino Regla Lógica
de Movimiento
-----
Engine Comp_para_reparación 1 Engine Pallet FIRST 1 Move
With Truck_recibo Then free
Engine Pallet 1 Engine Almacen_de_recibo FIRST 1 move
with Forktruck Then free
Engine Almacen_de_recibo Inc Comp_reparación
1 Engine Pallet3 FIRST 1 Move With Forktruck
Then free
MP Alamacén_de_materiales 1 MP Pallet4 FIRST 1
MP Pallet4 1 MP Assembly Join 1
Engine Pallet3 Dec Comp_reparación
1 Engine Disassembly FIRST 1
Engine Disassembly Hora_de_llegada = Clock ()
Get 2 Worker
Wait 1632 min.
Free All 1 Engine Qualification FIRST 1 Move With
Worker Then Free
Engine Qualification Get 2 Worker

```

```

Wait 2026 min.
Free All      1 Engine Assembly FIRST 1 Move with Worker
Then Free
Engine Assembly      Get 2 Worker
Join 1 MP
Wait 1442 min.
Free all
1 Engine Test_Cell FIRST 1 Move with Worker
Then Free
Engine Test_Cell      Get 3 Worker
Wait 700 min.
Free all      1 Engine Torque FIRST 1 Move With Worker
Then Free
Engine Torque      Get 2 Worker
Wait 230 min.
Free all      1 Engine Painting FIRST 1 Move with Worker
Then Free
Engine Painting      Get 2 Worker
Wait 640 min.
Free all      1 Engine Almacén_de_PT FIRST 1 move with
Forktruck2 Then free

Engine Almacén_de_PT      Inc Comp_terminados
1 Engine Pallet2 FIRST 1
Engine Pallet2      Dec Comp_terminados
Log "Tiempo ciclo", Hora_de_llegada

1 Engine Comp_para_cliente FIRST 1 Move with
Truck_despacho Then free

Engine Comp_para_cliente      Inc Comp_entregados
1 Engine EXIT FIRST 1

```

* Arribos *

Entidad	Locación	Cant.	por Arribo	Primera Vez	Ocurrencias	Frecuencia
Engine	Comp_para_reparación	1	0	40	14000	min
MP	Almacén_de_materiales	1	500	min	inf	2000 min

Engine	Comp_para_reparación	1	0	40	14000	min
MP	Almacén_de_materiales	1	500	min	inf	2000 min

* Asignaciones de Turno *

Locaciones... Recursos... Archivo de Calendario... Prioridades... Deshabilitar Lógica...

Almacén_de_materiales Forktruck Turno componentes. pmcal 99,99,99,99 No

Test_Cell Forktruck2
Truck_despacho
Truck_recibo
Worker

* Atributos *

ID, Tipo Clasificación

Hora_de_llegada Real Entidad

* Variables (global) *

ID, Tipo Valor Inicial Estadist

Comp_reparación Integer 0 Series de tiempo

Comp_terminados Integer 0 Series de tiempo

Comp_entregados Integer 0 Series de tiempo

* Ciclos de Arribo *

ID Cant. / % Acumulativa Tiempo (Horas) Valor

Cyc1 Cantidad No 0 1
172.8 1
345.6 1
691.2 1
1382.4 1

* Archivos Externos *

ID, Tipo Nombre del Archivo Mensaje

(null) Turno Turno componentes.pmc