




4.0 Technologies in Lean Manufacturing Management and their results in Waste Reduction and Resource Optimization in the Manufacturing Sector: a systematic review

Oscar David Carreño Flores¹; José Daniel Alcarraz Morón²; Marcelo Genaro Enriquez Aguirre³
Master in Business Administration¹, Undergraduate student², Undergraduate student³

¹Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú, C28416@utp.edu.pe,




²Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú, U20226758@utp.edu.pe

³Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú, U20227089@utp.edu.pe

Abstract— This study analyzes how the combination of Lean Manufacturing (LM) and Industry 4.0 (I4.0) technologies can transform the manufacturing sector by reducing waste and optimizing resources. To this end, a Systematic Literature Review (SLR) was conducted following the PICO framework, which allowed structuring key questions on problems, interventions, context and outcomes. A total of 179 papers were collected from databases such as SCOPUS and Web of Science, and after applying specific criteria, 23 relevant studies were selected. These papers highlighted how Lean tools, such as JIT, Kaizen and 5S, are enhanced with technologies such as IoT, Big Data and cyber-physical systems, achieving significant improvements in efficiency, quality and time reduction. The results show that this integration not only makes production more sustainable and leaner, but is applicable in sectors such as automotive, food and electronics. However, challenges such as resistance to change and the need for digital skills still persist. In summary, combining LM and I4.0 represents a unique opportunity for companies seeking greater competitiveness in a dynamic market.

Keywords—Lean Manufacturing, manufacturing companies, I4.0.

4.0 Technologies in Lean Manufacturing Management and their results in Waste Reduction and Resource Optimization in the Manufacturing Sector: a systematic review

Oscar David Carreño Flores¹; José Daniel Alcarraz Morón²; Marcelo Genaro Enriquez Aguirre³
Master in Business Administration¹, Undergraduate student², Undergraduate student³

¹Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú, C28416@utp.edu.pe.

²Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú, U20226758@utp.edu.pe

³Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú, U20227089@utp.edu.pe

Resumen– Este estudio analiza cómo la combinación de Lean Manufacturing y las tecnologías de la Industria 4.0 puede transformar el sector manufacturero al reducir desperdicios y optimizar recursos. Para ello, se realizó una Revisión Sistemática de Literatura (RSL) siguiendo el marco PICO, que permitió estructurar preguntas clave sobre los problemas, las intervenciones, el contexto y los resultados. Se recopilaron 179 documentos en bases de datos como SCOPUS y Web of Science, y tras aplicar criterios específicos, se seleccionaron 23 estudios relevantes. Estos trabajos destacaron cómo herramientas Lean, como JIT, Kaizen y 5S, se potencian con tecnologías como IoT, Big Data y sistemas ciberfísicos, logrando mejoras significativas en eficiencia, calidad y reducción de tiempos. Los resultados muestran que esta integración no solo hace más sostenible y ajustada la producción, sino que es aplicable en sectores como el automotriz, alimentario y electrónico. Sin embargo, todavía se enfrentan desafíos como la resistencia al cambio y la necesidad de adquirir habilidades digitales. En resumen, combinar LM e I4.0 representa una oportunidad única para las empresas que buscan mayor competitividad en un mercado dinámico.

Palabras clave-- Lean Manufacturing, industrias manufactureras, Industria 4.0.

I. INTRODUCCIÓN

La optimización de los procesos industriales es crucial para mantener la competitividad en un entorno empresarial que exige continuamente mayor eficiencia y flexibilidad. Esta optimización permite a las empresas reducir costos, mejorar la calidad de los productos y servicios, y aumentar la productividad. Además, proporciona una mejor adaptabilidad a lo requerido por el mercado y a nuevas tecnologías, lo que es esencial en un contexto de competencia global y rápida evolución tecnológica [1][2]. Para abordar este desafío, una estrategia emergente es la integración de las metodologías Lean Manufacturing (LM) con las tecnologías avanzadas que ofrece la Industria 4.0 (I4.0). Mientras Lean se encarga de reducir o eliminar desperdicios y propiciar la mejora continua de la empresa, la I4.0 aporta herramientas tecnológicas que

permiten una mayor flexibilidad y capacidad de respuesta en los procesos industriales [1].

A pesar del potencial de esta combinación, existen desafíos importantes para su integración efectiva. Si bien se han observado algunos beneficios como la reducción de residuos y la digitalización de procesos, las empresas suelen percibir una falsa sensación de integración en lugar de realizar cambios profundos en sus sistemas de gestión y modelos de negocio [1]. Además, algunos estudios carecen de una evaluación completa de los resultados debido a limitaciones metodológicas, como la falta de verificación en campo [2]. La investigación sobre esta integración es todavía dispersa y reciente, con muchos estudios centrados en aplicaciones específicas sin proporcionar una visión global de cómo combinar estas herramientas de manera efectiva [3].

La integración de herramientas Lean con las tecnologías de la Industria 4.0 representa una tendencia clave para la optimización de procesos en la actualidad, permitiendo a las empresas alcanzar niveles superiores de sostenibilidad económica [4]. Sin embargo, la implementación efectiva enfrenta barreras significativas, como la resistencia cultural y la falta de habilidades adecuadas en la fuerza laboral [3]. Estas barreras pueden ser mitigadas mediante la aplicación de prácticas Lean, que facilitan la transformación digital al estandarizar y robustecer los procesos [2][3]. Por lo tanto, es crucial realizar una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) para consolidar los conocimientos actuales y proporcionar una base sólida para futuras investigaciones. Esta RSL permitirá identificar las mejores prácticas, los beneficios y los desafíos de la sinergia entre Lean Manufacturing y las tecnologías presentes en la Industria 4.0, guiando así a las empresas hacia una implementación más efectiva y estratégica [5][4]. Además, los resultados de esta revisión pueden servir como referencia para académicos y profesionales interesados en optimizar procesos industriales mediante la combinación de estas dos poderosas metodologías [5].

El objetivo de esta RSL es investigar cómo han trabajado en conjunto las herramientas Lean Manufacturing y las tecnologías de la Industria 4.0, evaluando su efectividad en la reducción de desperdicios y la optimización de recursos en el sector manufacturero.

Este estudio de Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) se organiza de la siguiente manera: La Metodología (Sección 2): Detalla el enfoque de la RSL, las preguntas de investigación estructuradas bajo el framework PICO y los criterios de selección de los estudios revisados. Los Resultados (Sección 3): Presenta el análisis de la integración de Lean Manufacturing y tecnologías de la Industria 4.0, destacando su efectividad en la reducción de desperdicios y optimización de recursos. La Discusión (Sección 4): Interpreta los hallazgos, ofrece una visión general de la tendencia actual y proporciona recomendaciones para la práctica industrial. Las Conclusiones y Futuras Líneas de Investigación (Sección 5): Sintetiza los principales hallazgos, limitaciones del estudio y direcciones para futuras investigaciones en este campo.

II. METODOLOGÍA

A continuación, se describe el proceso de búsqueda utilizado en la Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) a través del marco PICO. Esta metodología permitió estructurar la pregunta de investigación considerando los siguientes componentes: el Problema (P) como la gestión de la integración de Lean Manufacturing, la Intervención (I) como las tecnologías de la Industria 4.0 (I4.0), el Contexto (C) en el sector manufacturero, y los Resultados (O) enfocados en la reducción de desperdicios y la optimización de recursos. Para esto, se utilizó información de repositorios académicos como Web of Science y SCOPUS.

La pregunta de investigación formulada fue: “¿Cómo la integración de tecnologías 4.0 en la gestión de Lean Manufacturing afecta la reducción de desperdicios y la optimización de recursos en el sector manufacturero?”

Una vez formulada la pregunta principal, se desarrollaron una serie de preguntas específicas para cada componente del marco PICO, con el objetivo de analizar en profundidad los artículos seleccionados. A continuación, se presentan las preguntas específicas derivadas de la pregunta PICO, asociadas a cada uno de sus componentes:

- RQ1: ¿Qué tipo de herramientas Lean tienen implementadas las empresas?
- RQ2: ¿Cuáles son las tecnologías de la Industria 4.0 que han sido implementadas en la gestión en conjunto con Lean Manufacturing?
- RQ3: ¿Cuáles son los resultados de la implementación de tecnologías 4.0 en la reducción de desperdicios y la optimización de recursos?
- RQ4: ¿En qué sectores industriales se ha estudiado la implementación de tecnologías 4.0 en combinación con Lean Manufacturing?

Luego de identificar las preguntas de investigación, se establecieron las palabras clave que reflejan la información de

los diferentes componentes PICO. Estos términos clave guiarán la investigación, proporcionando los parámetros necesarios para evaluar cada artículo revisado [6]. Las palabras clave deben estar en inglés e incluir sinónimos y variantes del vocabulario recopilados en diferentes tesauros. En la Tabla 1 se muestran los componentes de la pregunta PICO y las palabras clave en inglés correspondientes a cada uno.

TABLA I. COMPONENTES PICO Y SUS PALABRAS CLAVE

P	Problema	Gestión de la integración de LM	Lean Manufacturing, lean production, lean tools, lean principles
I	Intervención	Tecnologías de la I4.0	Industry 4.0, I4.0, automatization, digital automation
C	Contexto	Industrias Manufactureras	Manufacturing, Manufacturing sector, Manufacturing industries
O	Resultados	Reducción de desperdicios y optimización de recursos	Reduction, Optimization, Optimization of results, Productivity, Waste Reduction, Waste

Estas palabras clave fueron utilizadas para realizar búsquedas exhaustivas en los repositorios seleccionados, asegurando una cobertura amplia y relevante de la literatura existente sobre la integración de Lean Manufacturing y las tecnologías de la Industria 4.0 en el sector manufacturero.

Una vez registradas las palabras clave en inglés para cada componente PICO, se utilizaron operadores booleanos para construir la fórmula de búsqueda que fue ingresada en SCOPUS y Web of Science. El operador "OR" se emplea para encontrar registros que incluyan uno o más términos, conectando así cada palabra clave de los componentes PICO. Por otro lado, el operador "AND" se utiliza para unir diferentes campos de búsqueda. Es importante que cada palabra clave esté entre comillas y que los conjuntos de palabras clave de cada componente PICO estén entre paréntesis para optimizar los resultados de búsqueda. A continuación, se presenta la ecuación de búsqueda:

[("Lean Manufacturing" OR "Lean Production" OR "Lean Tools" OR "Lean Principles") AND ("Industry 4.0" OR "I4.0" OR "Automation" OR "Digital Automation") AND ("Manufacturing" OR "Manufacturing Sector" OR "Manufacturing Industries") AND ("Reduction" OR "Optimization" OR "Optimization of Results" OR "Productivity" OR "Waste Reduction" OR "Waste")]

Esta fórmula está lista para ser ingresada tanto en SCOPUS como en Web of Science para iniciar la búsqueda de documentos relacionados con nuestra investigación. Sin embargo, antes de proceder con ese paso, es necesario definir los parámetros de elegibilidad para los artículos científicos o investigaciones previstas, también conocidos como criterios de inclusión y exclusión.

- CI1: Estudios que analicen la implementación de la Industria 4.0 en empresas que ya aplican Lean Manufacturing.
- CI2: Artículos científicos que examinen la sinergia entre Lean Manufacturing e Industria 4.0.
- CI3: Estudios que se enfoquen en el sector manufacturero.
- CI4: Investigaciones que midan los efectos de la implementación en términos de eficiencia, reducción de desperdicios, productividad o rentabilidad.

Criterios de exclusión en base a características no deseadas en los artículos revisados:

- CE1: Artículos de opinión o editoriales sin soporte empírico.
- CE2: Investigaciones que analicen de manera aislada Lean Manufacturing o Industria 4.0, sin explorar la interacción entre ambos.
- CE3: Investigaciones enfocadas exclusivamente en contextos muy específicos.

De este modo, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión en la revisión de artículos, asegurando la selección de estudios pertinentes para el análisis en esta revisión sistemática de literatura.

El presente trabajo se llevó a cabo utilizando dos bases de datos, SCOPUS y Web of Science, como se describió anteriormente. Al introducir la fórmula resultante de la estrategia de búsqueda PICO, se obtuvieron 179 documentos relacionados con el tema de estudio. A partir de esta cantidad, se realizó la clasificación y depuración de los documentos que serían relevantes para la Revisión Sistemática de Literatura.

Con el fin de mejorar la selección de los documentos obtenidos y promover la transparencia, claridad, precisión y uniformidad en la información metodológica y en los resultados presentados en esta revisión, se aplicó la metodología PRISMA. Esta herramienta se utiliza para elevar la calidad de los informes en este tipo de investigaciones. Desde su creación en 2009, la declaración PRISMA ha sido ampliamente adoptada por autores e investigadores de todo el mundo para guiar la planificación, preparación y publicación de sus revisiones sistemáticas [7].

El diagrama PRISMA consta de tres fases: Identificación, Cribado e Inclusión. En la primera fase (Identificación), se

registra el total de documentos que ofrecen información sobre un tema específico. Estos documentos pueden incluir revistas, artículos, tesis, informes de estudios clínicos, resúmenes de conferencias, manuscritos no publicados, informes gubernamentales y otros documentos relevantes. En esta fase se determina la cantidad total de documentos identificados mediante una búsqueda sistemática en una o más bases de datos utilizando la fórmula establecida en el PICO. También se registra la cantidad de documentos eliminados antes del cribado, ya sea por duplicados (si se realizó la búsqueda en más de una base de datos), por haber sido marcados como no elegibles mediante herramientas automatizadas o por otros motivos.

En la segunda fase (Cribado), se seleccionan los documentos revisados a partir del análisis del título o resumen, evaluando así si contribuyen al estudio. Además, se deben identificar las razones por las que se excluyeron los demás documentos, que pueden variar desde el idioma, el año de publicación o la relación con el tema, entre otros. A continuación, se clasifican y seleccionan los documentos que están disponibles para abrir o leer en su totalidad (PDF, HTML). En esta fase también se realiza una evaluación en texto completo de los documentos seleccionados para determinar su elegibilidad, teniendo en cuenta los criterios de inclusión y exclusión. Es importante indicar las razones por las cuales se excluyeron los documentos no seleccionados en relación con el tema.

Finalmente, en la tercera fase (Inclusión), se concretan los documentos que se han seleccionado y que formarán parte del estudio [8].

El método PRISMA nos sirvió de apoyo en el proceso de recopilación de información y su clasificación, considerando los criterios de inclusión y exclusión establecidos para esta revisión. Se inició la búsqueda en el repositorio de SCOPUS, ingresando la fórmula previamente determinada a través del PICO. Como resultado, se obtuvieron 55 documentos, que se consideraron la base para realizar el análisis. Luego, se procedió a utilizar la base de datos de Web of Science, obteniendo 124 resultados a analizar. Al utilizar dos bases de datos para la búsqueda de documentos se eliminaron 28 duplicados.

Como resultado de esta evaluación, se identificaron 151 publicaciones que fueron recuperadas para evaluación. Se verificó el acceso a estos documentos en formato PDF o HTML. De este modo, se mantuvieron los 151 documentos, lo que indica que se pudieron recuperar en su totalidad (texto completo).

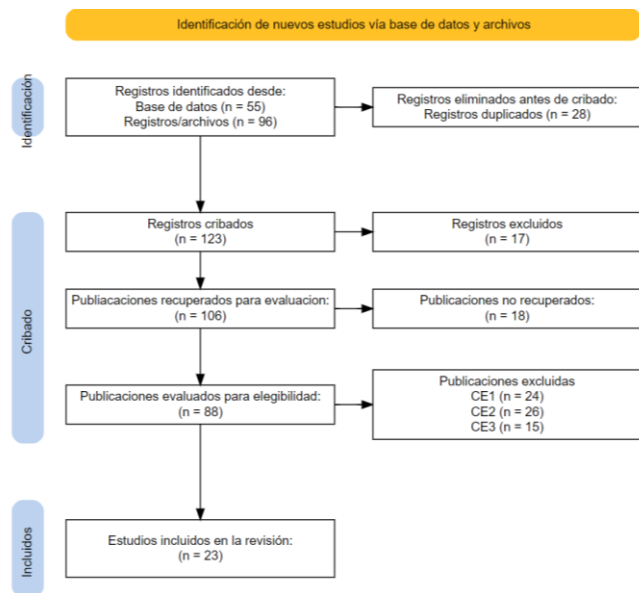
Previo a aplicar los criterios excluyentes e incluyentes, se hizo un análisis de los títulos de los textos pudiendo descartar 35 documentos.

Se implementaron criterios de inclusión y exclusión para identificar los documentos relevantes, lo que llevó a la exclusión de 24 documentos que no cumplían con el CE1, 26 que no se ajustaban al CE2 y 15 que fueron descalificados según el CE3. Como resultado de este proceso de depuración de información a partir de los artículos revisados, se

identificaron 23 documentos que forman parte del estudio y han aportado a esta revisión sistemática de literatura.

En la Figura 1 se presenta el diagrama PRISMA, elaborado en base a nuestra investigación.

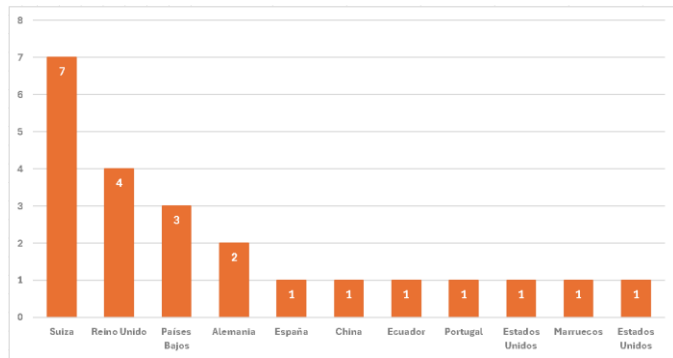
FIGURA I. DIAGRAMA DE FLUJO PRISMA



III. RESULTADOS

A. Organización de la información a. Artículos según región

FIGURA II. CANTIDAD DE ARTICULOS SEGÚN REGIÓN

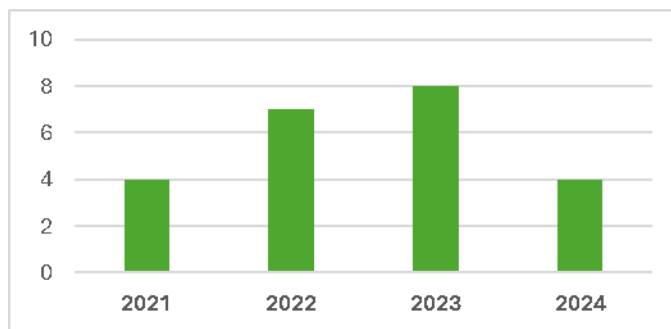


Como se puede apreciar la mayoría de los artículos provienen de Suiza, con un total de 7, seguido por Reino Unido con 4 y Países Bajos con 3. Estados Unidos y Alemania contribuyen con 2 artículos cada uno, mientras que España, Ecuador, China, Portugal y Marruecos tienen 1 artículo cada uno. En total, hay 23 artículos provenientes de 10 países diferentes, lo que refleja una amplia colaboración internacional en la investigación sobre Lean Manufacturing y tecnologías de la

Industria 4.0. La concentración de artículos en Suiza sugiere una fuerte inversión en este campo por parte del país.

b. Publicaciones por año

FIGURA III. CANTIDAD DE PUBLICACIONES POR AÑO



c. Síntesis de la información

i. Herramientas Lean en las empresas

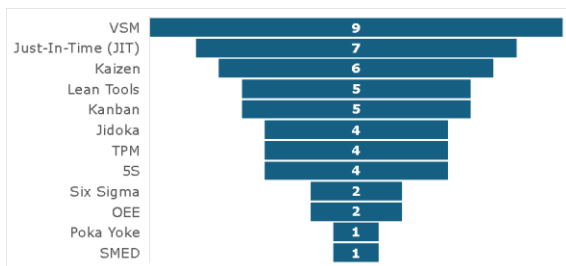
Las empresas en la actualidad implementan diversas herramientas Lean para poder alcanzar diferentes mejoras como aumentar su eficiencia, minimizar desperdicios y por consecuencia aumentar la productividad, independientemente del tamaño de estas. Entre las herramientas más utilizadas se encuentran Just-In-Time (JIT), aplicado principalmente en empresas grandes y medianas para reducir inventarios y mejorar el flujo de producción, aunque también es adaptado por empresas pequeñas para manejar volúmenes reducidos de producción. Kanban por otro lado, es ampliamente requerido en empresas de diferentes tamaños con el objetivo de gestionar el flujo de trabajo y mejorar la eficiencia operativa. La metodología 5S por su lado, es implementada por pequeñas, medianas y grandes empresas para mejorar tanto la organización del lugar de trabajo como la eficiencia. Un ejemplo de esto es el estudio de [9], que analiza la implementación efectiva de las herramientas Lean en PYMEs, destacando la importancia de la adaptación de dicha metodología a diferentes contextos empresariales. Además, la combinación de metodologías como Kaizen y Lean Six Sigma, según [10], puede tener un impacto significativo en el desempeño organizacional, lo que nos indica que las empresas no solo llegan a utilizar una sola herramienta Lean. Value Stream Mapping (VSM) es utilizado por empresas medianas y grandes para identificar y eliminar desperdicios en los procesos de producción. Total Productive Maintenance (TPM) es común en empresas grandes para mejorar la eficiencia de los equipos y reducir el tiempo de inactividad. Kaizen, que fomenta la mejora continua a través de pequeños cambios incrementales, es adoptado por empresas de todos los tamaños. El OEE (Overall Equipment Efficiency) evalúa la eficiencia de los equipos y facilita la identificación de pérdidas en los procesos de producción, siendo una herramienta clave para incrementar la productividad en empresas medianas y grandes. Por su parte, SMED (Single-Minute Exchange of

Die) es una metodología que ayuda a minimizar el tiempo de cambio de las máquinas, lo que resulta fundamental para mejorar la flexibilidad en la producción, especialmente en compañías que gestionan una amplia gama de productos. Estos hallazgos sustentan la idea de que el LM se puede aplicar en diferentes empresas de distintos tamaños.

TABLA II. HERRAMIENTAS LEAN SEGÚN TAMAÑO DE LA EMPRESA.

Herramienta Lean	Tamaño de la Empresa	Propósito
Just-In-Time (JIT)	Grandes y medianas	Reducir inventarios y mejorar el flujo de producción
Kanban	Todos los tamaños	Gestionar el flujo de trabajo y mejorar la eficiencia operativa
5S	Todos los tamaños	Mejorar la organización del lugar de trabajo y la eficiencia
Value Stream Mapping (VSM)	Medianas y grandes	Reconocer y minimizar los residuos generados en los procesos productivos
Total Productive Maintenance (TPM)	Grandes	Mejorar la eficiencia de los equipos y reducir el tiempo de inactividad
Kaizen	Todos los tamaños	Fomentar la mejora continua a través de pequeños cambios incrementales

FIGURA IV. HERRAMIENTAS LEAN ANALIZADAS

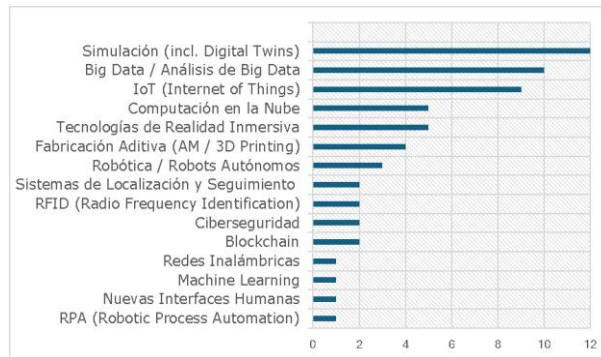


ii. Tecnologías de la I4.0

Las tecnologías I4.0 aplicadas en la gestión con LM vienen acompañadas de muchas herramientas nuevas que mejoran la eficiencia y agilidad de los procesos industriales. Referencias como [11],[12],[13] se pueden atribuir a herramientas avanzadas que apoyan una mayor efectividad y dinamismo en la realización de actividades industriales. Particularmente destacable es el papel del Internet de las Cosas en la conexión de máquinas y sistemas para fines de

recolección y procesamiento de datos para apoyar la toma de decisiones rápidas y la eficiencia en las operaciones, articulado por [14]. Esto es apoyado por [14] y [15], que explican cómo la combinación de IoT con Big Data puede elevar la fabricación inteligente. Big Data y Data Analytics permiten interpretar grandes volúmenes de datos en términos de descubrir patrones que optimicen el proceso de producción, así como reducir el desperdicio. Los Sistemas Ciberfísicos (CPS) integran el mundo físico con el digital, permitiendo una mayor automatización y control de los procesos de manufactura. La eficacia de estos sistemas se ve amplificada por la adopción de tecnologías de la Industria 4.0, como se analiza en [16], destacando la importancia de la robótica avanzada y automatización en la manufactura inteligente. La Robótica Avanzada y Automatización, incluyendo robots colaborativos (cobots), trabajan junto a los humanos para mejorar la eficiencia y reducir errores. Finalmente, los Gemelos Digitales, que son modelos virtuales de procesos físicos, permiten la simulación y optimización de operaciones antes de implementarlas en el mundo real, un concepto profundizado en [17], que explora el desarrollo de gemelos digitales para la manufactura inteligente. La Realidad Aumentada (AR) y Realidad Virtual (VR) se utilizan para la capacitación de empleados y la visualización de procesos complejos, mejorando la precisión y reduciendo el tiempo de inactividad, tal como se describe en [18], que destaca las aplicaciones de realidad aumentada en la Industria 4.0.

FIGURA V. TECNOLOGÍAS 4.0 ANALIZADAS



iii. Que resultados se obtuvieron

La implementación de tecnologías de la Industria 4.0 en combinación con Lean Manufacturing ha mostrado resultados significativos en la reducción de desperdicios y la optimización de recursos [19]. La integración de tecnologías como IoT y Big Data ha permitido una monitorización continua y en tiempo real de los procesos, lo que ha llevado a una mejora en la eficiencia operativa y una reducción en los tiempos de ciclo. Se ha logrado una reducción significativa en desperdicios como el exceso de inventario, tiempos de espera, defectos en productos y sobreproducción, como se demuestra en [20], que muestra cómo la implementación de lean y tecnologías de la I4.0 puede mejorar la eficiencia de

producción. Las métricas comunes para medir la efectividad de estas implementaciones incluyen el período del ciclo, índice de fallos, cantidad de existencias y productividad de las máquinas y la productividad general, aspectos evaluados en [21], que analiza el impacto de lean y la Industria 4.0 en el desempeño manufacturero. Además, se utilizan indicadores clave de rendimiento (KPI) específicos para evaluar la reducción de desperdicios y la optimización de recursos, un tema profundizado en [22], que identifica KPIs clave para el éxito de estas implementaciones, y respaldado por [23], que destaca la importancia de la integración de lean y tecnologías de la Industria 4.0 para el control de calidad.

TABLA III. METRICAS DE MEDICION APLICADAS

Métrica	Cantidad reducida/aumentada
Reducción del tiempo de ciclo	Se logró reducir en un 30%, 25% y 20% [9][19][30]
Reducción de la tasa de defectos	Reducción de defectos del 40%, 35% y 30% [10][16][22]
Reducción del nivel de inventario	Niveles de inventario 25%, 22% Y 22% más bajos [9][12][21]
Mejora de la eficiencia de la maquinaria	Se pudo mejorar la eficiencia en 15%, 18% y 20% [16][15][11]

iv. Sectores manufactureros

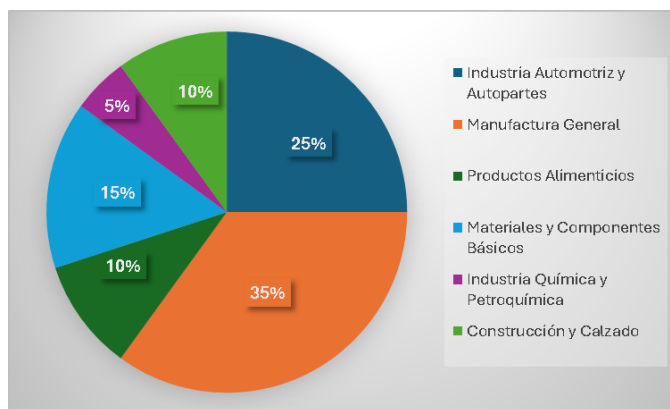
La implementación de tecnologías de la Industria 4.0 en combinación con Lean Manufacturing ha sido estudiada en diversos sectores industriales. En el sector automotriz, este sector ha sido pionero en la adopción de tecnologías avanzadas para mejorar la eficiencia y reducir desperdicios, un ejemplo detallado en [24], que analiza los desafíos y oportunidades de la Industria 4.0 en el sector automotriz. Empresas como Toyota han integrado IoT, robótica avanzada y gemelos digitales para optimizar sus procesos de producción. En la industria de manufactura general, muchas empresas han adoptado tecnologías de la Industria 4.0 para mejorar la flexibilidad y la eficiencia de sus operaciones, como se demuestra en [25], que destaca lecciones aprendidas y mejores prácticas en la implementación de lean y la Industria 4.0 en este sector. Incluyendo la implementación de sistemas ciberfísicos y análisis de datos para la optimización de procesos. En el sector de electrónica, la producción de dispositivos electrónicos ha visto mejoras significativas mediante el uso de automatización avanzada y análisis de datos para reducir defectos y mejorar la calidad del producto, un impacto evaluado en [26], que muestra el efecto de la Industria 4.0 en la manufactura de electrónica. Finalmente, en la industria alimentaria, la integración de tecnologías como IoT y Big Data ha permitido una mejor trazabilidad y control

de calidad en la producción de alimentos, reduciendo desperdicios y mejorando la eficiencia, aspectos abordados en [27], que explora la sostenibilidad y eficiencia en la industria alimentaria a través de la adopción de la Industria 4.0 y lean. Es importante considerar que, al avanzar hacia la adopción de estas tecnologías, los sectores manufactureros emergentes enfrentan desafíos únicos, como se describe en [28], pero también pueden aprovechar estrategias exitosas para la implementación de la Industria 4.0 y lean, como se detalla en [29]. Además, un estudio comparativo como el presentado en [30] puede ofrecer valiosas perspectivas para la toma de decisiones en diferentes industrias manufactureras.

TABLA IV. SECTORES ANALIZADOS

GRUPO	SECTORES INCLUIDOS
Industria Automotriz y Autopartes	Industria Automotriz, Automóviles, Empresas de autopartes
Manufactura General	Manufactura en general, Fabricación de maquinaria, Metálico
Productos Alimenticios	Alimentos (Sector de alimentos), Productos alimenticios
Materiales y Componentes Básicos	Papel, Madera, Acero
Industria Química y Petroquímica	Petroquímica
Construcción y Calzado	Construcción, Calzado

FIGURA VI. TECNOLOGIAS IMPLEMENTADAS



IV. DISCUSIÓN

La integración de las metodologías Lean Manufacturing (LM) con las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 (I4.0) se perfila como una estrategia fundamental y transformadora para el sector manufacturero [4], [5]. Los hallazgos de esta Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) confirman que esta sinergia va más allá de una simple suma de

partes; actúa como un catalizador que potencia la eficiencia operativa, optimiza el uso de recursos y reduce significativamente los desperdicios [19], [25]. Este proceso impulsa a las empresas hacia modelos de producción más ágiles y adaptados a la demanda [18], fortaleciendo su posición competitiva en un mercado globalizado y en constante cambio [1], [20].

Las herramientas Lean tradicionales como Just-In-Time (JIT), Kanban, 5S, Value Stream Mapping (VSM), Total Productive Maintenance (TPM) y Kaizen establecen una base sólida para la eliminación de desperdicios y la mejora continua [9], [10]. Sin embargo, nuestra revisión subraya que el verdadero potencial se desbloquea al integrar tecnologías I4.0 como el Internet de las Cosas (IoT), Big Data Analytics, Sistemas Ciberfísicos (CPS), robótica avanzada, Realidad Aumentada/Virtual (AR/VR) y Gemelos Digitales [11], [12], [17]. Estas tecnologías no solo automatizan tareas, sino que proporcionan visibilidad en tiempo real [11], [14], capacidad predictiva y control granular sobre los procesos [16], [23]. Por ejemplo, el IoT permite monitorizar continuamente el flujo de materiales y el estado de las máquinas [14], [18], alimentando los sistemas Kanban o JIT con datos precisos, mientras que Big Data Analytics puede identificar patrones ocultos en los datos de producción para optimizar el VSM o predecir fallos de equipos (TPM) [12], [27]. Esta combinación permite abordar no solo los desperdicios tradicionales (sobrepducción, inventario, defectos, esperas) [16], sino también los relacionados con la infrautilización del talento o la falta de información.

Los resultados cuantitativos observados en los estudios analizados son consistentes y notables. Se reportan reducciones significativas del tiempo de ciclo (hasta un 30% [9], [19], [30]), disminuciones drásticas en las tasas de defectos (hasta un 40% [10], [16], [22]), optimización de los niveles de inventario (reducciones del 20-25% [9], [12], [21]) y mejoras en la eficiencia general de los equipos (OEE) y la productividad (incrementos del 15-20% [11], [15], [16]). Estos hallazgos se alinean con la literatura más amplia sobre transformación digital en manufactura [4], [5], [13], confirmando que la digitalización, cuando se ancla en principios Lean sólidos [2], [3], produce beneficios tangibles y medibles [21]. Si bien algunos estudios previos podían centrarse más aisladamente en LM o I4.0 [3], esta RSL refuerza la visión de que la convergencia es donde reside el mayor valor, tal como sugieren autores como Moraes et al. [1] y Frecassetti et al. [2]. No obstante, es preciso notar que la magnitud del impacto puede variar según el sector industrial [24], [26], [27] y el nivel de madurez tanto Lean como digital de la empresa [19].

Desde una perspectiva teórica, esta RSL contribuye a entender la evolución del paradigma Lean en la era digital, mostrando cómo sus principios fundamentales no solo perduran, sino que se ven amplificados por la tecnología [13], [25]. Sugiere que I4.0 puede ser vista como un habilitador

clave para llevar Lean a un nivel superior de efectividad [1], [4].

En la práctica, las implicaciones para los gerentes son claras: la adopción de I4.0 no debe verse como un reemplazo de Lean, sino como un complemento estratégico [2], [5]. Las empresas deberían:

- Priorizar la madurez Lean: Establecer procesos estandarizados y una cultura de mejora continua es fundamental antes o en paralelo a la implementación tecnológica [2], [28]. Intentar digitalizar procesos ineficientes o caóticos solo perpetuará los problemas.
- Adoptar un enfoque estratégico: La selección de tecnologías I4.0 debe estar alineada con los objetivos Lean específicos (ej., usar IoT para mejorar JIT [18], usar Big Data para VSM [30]).
- Gestionar el cambio cultural y las habilidades: La resistencia al cambio y la falta de habilidades digitales son barreras significativas [2], [3]. Se requiere inversión en capacitación y una gestión del cambio proactiva.
- Empezar con proyectos piloto: Dada la complejidad y la inversión requerida [19], iniciar con proyectos piloto enfocados en áreas de alto impacto puede ser una estrategia prudente [28].

Por otro lado, es importante reconocer las limitaciones inherentes a esta RSL. La búsqueda se restringió a las bases de datos SCOPUS y Web of Science, lo que podría excluir literatura relevante de otras fuentes (una limitación común en RSL [7]). La heterogeneidad en las métricas y metodologías de los estudios incluidos [6] dificulta a veces la comparación directa y la generalización de los resultados cuantitativos. Además, la mayoría de los estudios podrían centrarse en casos de éxito, introduciendo un posible sesgo de publicación.

Una perspectiva crítica también debe considerar los desafíos no triviales de esta integración. Los altos costos de inversión inicial en tecnologías I4.0 [19], la complejidad de la integración de sistemas (legacy vs. nuevos), las preocupaciones sobre la ciberseguridad y la privacidad de los datos, y el potencial impacto en el empleo son aspectos que requieren una cuidadosa consideración por parte de las empresas [1], [3]. La aplicabilidad universal de todas las combinaciones LM-I4.0 puede ser cuestionable, dependiendo fuertemente del contexto específico de la empresa (tamaño [9], [29], sector [24], [27], recursos, cultura [2]).

A pesar de los avances, la investigación futura debería enfocarse en desarrollar marcos de implementación más detallados y adaptados a diferentes contextos (ej., PYMES vs. grandes corporaciones) [29], explorar más a fondo el impacto de la sinergia LM-I4.0 en la sostenibilidad (ambiental y social) [11], [26], [27] y analizar el rol de las nuevas tecnologías emergentes (ej., IA generativa, Industria 5.0 [1]) en esta

integración. Estudios longitudinales que sigan la implementación a lo largo del tiempo [4] serían valiosos para comprender mejor los desafíos y beneficios a largo plazo.

V. CONCLUSIONES

La integración de Lean Manufacturing con las tecnologías de la Industria 4.0 representa una evolución significativa en la manera en que las empresas gestionan sus procesos de manufactura. Esta sinergia no solo permite una reducción considerable de desperdicios, sino que también optimiza los recursos y mejora la eficiencia operativa. La implementación de tecnologías avanzadas como IoT, Big Data, CPS, robótica avanzada, AR/VR y gemelos digitales complementa y potencia las herramientas Lean tradicionales, facilitando una producción más ajustada a la demanda real e incrementando la ventaja competitiva de las compañías en el ámbito global

Beneficios Clave:

a. Reducción de Desperdicios:

La combinación de tecnologías de la Industria 4.0 con Lean Manufacturing permite identificar y eliminar desperdicios tradicionales y ocultos. Esto incluye la reducción de exceso de inventario, tiempos de espera, defectos en productos y sobreproducción, así como la mejora en la comunicación y la toma de decisiones.

b. Optimización de Recursos:

Las tecnologías avanzadas proporcionan acceso inmediato y un análisis de datos que permiten un proceso de decisión más consciente. Esto resulta en una mejor utilización de los recursos y una mayor eficiencia operativa.

c. Mejora de la Competitividad:

Al ajustar la producción a la demanda real y mejorar la flexibilidad y precisión de los procesos, las empresas pueden responder más rápidamente a las necesidades del mercado, aumentando su competitividad. La capacidad de adaptarse rápidamente a las necesidades del mercado y de mantener altos niveles de calidad y eficiencia operativa es crucial para mantenerse competitivo en un mercado global dinámico.

d. Versatilidad y Aplicabilidad:

La investigación ha demostrado que esta integración es efectiva en una variedad de sectores industriales, incluyendo el automotriz, electrónica, alimentario y manufactura en general. Esto subraya la versatilidad y aplicabilidad de estas metodologías en una variedad de sectores, incluyendo el automotriz, electrónica, alimentario y manufactura en general. Cada uno de estos sectores ha experimentado mejoras significativas en eficiencia operativa y reducción de desperdicios, destacando la aplicabilidad generalizada de diferentes metodologías.

REFERENCIAS

- [1] A. Moraes, A. M. Carvalho, y P. Sampaio, «Lean and Industry 4.0: A Review of the Relationship, Its Limitations, and the Path Ahead with Industry 5.0», *Machines*, vol. 11, n.o 4, 2023, doi: 10.3390/machines11040443.
- [2] S. Frecassetti, M. Rossini, y A. Portioli-Staudacher, «Unleashing Industry 4.0: Leveraging Lean Practices to Overcome Implementation Barriers», *IEEE Trans Eng Manag.*, vol. 71, pp. 10797-10814, 2024, doi: 10.1109/TEM.2024.3396448.
- [3] J. Salvadorinho y L. Teixeira, «Stories told by publications about the relationship between industry 4.0 and lean: Systematic literature review and future research agenda», *Publications*, vol. 9, n.o 3, 2021, doi: 10.3390/publications9030029.
- [4] S. M. Saad, R. Bahadori, C. Bhowar, y H. Zhang, «Industry 4.0 and Lean Manufacturing – a systematic review of the state-of-the-art literature and key recommendations for future research», *International Journal of Lean Six Sigma*, 2023, doi: 10.1108/IJLSS-02-2022-0021.
- [5] T. Benslimane, R. Benabbou, S. Moutassim, y J. Benhra, «Understanding the relationship, trends, and integration challenges between lean manufacturing and industry 4.0. A literature review», *International Journal of Production Management and Engineering*, vol. 12, n.o 2, pp. 195-209, 2024, doi: 10.4995/ijpme.2024.21473.
- [6] C. Ramos-Galarza y P. García-Cruz, «Guía para realizar estudios de revisión sistemática cuantitativa», *CienciAmérica*, vol. 13, n.o 1, pp. 1-6, ene. 2024, doi: 10.33210/ca.v13i1.444.
- [7] C. Hutton, T. Wagener, J. Freer, D. Han, C. Duffy, y B. Arheimer, «Most computational hydrology is not reproducible, so is it really science?», *Water Resour Res.*, vol. 52, n.o 10, pp. 7548-7555, 2016, doi: 10.1002/2016WR019285.
- [8] U. Kumpf et al., «TDCS at home for depressive disorders: an updated systematic review and lessons learned from a prematurely terminated randomized controlled pilot study», *Eur Arch Psychiatry Clin Neurosci*, vol. 273, n.o 7, 2023, doi: 10.1007/s00406-023-01620-y.
- [9] J. Reyes, J. Mula, y M. Díaz-Madroñero, «Development of a conceptual model for lean supply chain planning in industry 4.0: multidimensional analysis for operations management», *Production Planning and Control*, vol. 34, n.o 12, pp. 1209-1224, 2023, doi: 10.1080/09537287.2021.1993373.
- [10] A. Sartal, J. Llach, y F. Leon-Mateos, «Do technologies really affect that much? exploring the potential of several industry 4.0 technologies in today's lean manufacturing shop floors», *OPERATIONAL RESEARCH*, vol. 22, n.o 5, pp. 6075-6106, nov. 2022, doi: 10.1007/s12351-022-00732-y.
- [11] V. Tripathi, S. Chattopadhyaya, A. K. Mukhopadhyay, S. Sharma, C. Li, y G. Di Bona, «A Sustainable Methodology Using Lean and Smart Manufacturing for the Cleaner Production of Shop Floor Management in Industry 4.0», *Mathematics*, vol. 10, n.o 3, 2022, doi: 10.3390/math10030347.
- [12] A. Florescu y S. Barabas, «Development Trends of Production Systems through the Integration of Lean Management and Industry 4.0», *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 12, n.o 10, 2022, doi: 10.3390/app12104885.
- [13] S. Palacios-Gazules, G. Gimenez, y R. De Castro, «Adopting Industry 4.0 technologies through lean tools: evidence from the European Manufacturing Survey», *INTERNATIONAL JOURNAL OF LEAN SIX SIGMA*, vol. 15, n.o 8, pp. 120-142, jul. 2024, doi: 10.1108/IJLSS-06-2023-0103.
- [14] H. Shan, X. Shan, L. Zhang, M. Qin, P. Peng, y Z. Meng, «A case study of whale optimization algorithm for scheduling in C2M model», *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 15, n.o 2, pp. 387-414, 2024, doi: 10.5267/j.ijiec.2024.2.002.
- [15] D. Medyński et al., «Digital Standardization of Lean Manufacturing Tools According to Industry 4.0 Concept», *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, n.o 10, 2023, doi: 10.3390/app13106259.
- [16] S. Rajab, M. Afy-Shararah, y K. Saloniitis, «Using Industry 4.0 Capabilities for Identifying and Eliminating Lean Wastes», en *Procedia CIRP*, 2022, pp. 21-27. doi: 10.1016/j.procir.2022.04.004.
- [17] A. Anosike, K. Alafropatis, J. A. Garza-Reyes, A. Kumar, S. Luthra, y L. Rocha-Lona, «Lean manufacturing and internet of things-A synergetic or antagonist relationship?», *Comput Ind.*, vol. 129, ago. 2021, doi: 10.1016/j.compind.2021.103464.
- [18] S. M. Ruggero, N. A. dos Santos, A. C. Estender, y M. T. da Silva, «Industry 4.0: Expectations, Impediments and Facilitators», en *ADVANCES IN PRODUCTION MANAGEMENT SYSTEMS: ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR SUSTAINABLE AND RESILIENT PRODUCTION SYSTEMS*, APMS 2021, PT IV, A. Dolgui, A. Bernard, D. Lemoine, G. VonCieminski, y D. Romero, Eds., en *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 633.

- GEWERBESTRASSE 11, CHAM, CH-6330, SWITZERLAND: SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING AG, 2021, pp. 673-680. doi: 10.1007/978-3-030-85910-7_71.
- [19]Z. Huang, C. Jowers, D. Kent, A. Dehghan-Manshadi, y M. S. Dargusch, «The implementation of Industry 4.0 in manufacturing: from lean manufacturing to product design», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 121, n.o 5-6, pp. 3351-3367, 2022, doi: 10.1007/s00170-022-09511-7.
- [20]M. Ghouat, M. Benhadou, B. Benhadou, y A. Haddout, «Assessment of the Potential Impact of Industry 4.0 Technologies on the Levers of Lean Manufacturing in Manufacturing Industries in Morocco», *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 12, n.o 7, pp. 78-85, 2022, doi: 10.46338/ijetae0722_08.
- [21]P. Langlotz, C. Siedler, y J. C. Aurich, «Unification of lean production and Industry 4.0», en *Procedia CIRP*, 2021, pp. 15-20. doi: 10.1016/j.procir.2021.03.003.
- [22]M. Shahin, F. F. Chen, H. Bouzary, y A. Hosseinzadeh, «Deploying Convolutional Neural Network to Reduce Waste in Production System», *Manuf Lett*, vol. 35, n.o S, pp. 1187-1195, ago. 2023, doi: 10.1016/j.mfglet.2023.08.127.
- [23]T.-A. Tran, T. Ruppert, y J. Abonyi, «Indoor positioning systems can revolutionise digital lean», *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, n.o 11, 2021, doi: 10.3390/app11115291.
- [24]S. V. Iyer, K. S. Sangwan, y Dhiraj, «Digitalization: a tool for the successful long-term adoption of lean manufacturing», en *Procedia CIRP*, 2023, pp. 245-250. doi: 10.1016/j.procir.2023.02.042.
- [25]C. Koteswarapavan y L. N. Pattanaik, «A novel tool-input-process-output (TIPO) framework for upgrading to lean 4.0», *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION MANAGEMENT AND ENGINEERING*, vol. 12, n.o 1, pp. 65-77, 2024, doi: 10.4995/ijpme.2024.19723.
- [26]V. Tripathi et al., «A Novel Smart Production Management System for the Enhancement of Industrial Sustainability in Industry 4.0», *Math Probl Eng*, vol. 2022, abr. 2022, doi: 10.1155/2022/6424869.
- [27]M. Jimenez, M. del M. Espinosa, M. Dominguez, M. Romero, y T. Awad, «Adaptation of the Lean 6S Methodology in an Industrial Environment under Sustainability and Industry 4.0 Criteria», *Sustainability*, vol. 13, n.o 22, nov. 2021, doi: 10.3390/su132212449.
- [28]L. H. Morris et al., «Functional prototype for the improvement of the production process in manufacturing SMEs and their approach to the Industry 4.0», *ENTRE CIENCIA E INGENIERIA*, vol. 16, n.o 31, pp. 70-80, ene. 2022, doi: 10.31908/19098367.2750.
- [29]V. Tripathi et al., «An Agile System to Enhance Productivity through a Modified Value Stream Mapping Approach in Industry 4.0: A Novel Approach», *Sustainability*, vol. 13, n.o 21, nov. 2021, doi: 10.3390/su132111997.
- [30]H. Wang, Q. He, Z. Zhang, T. Peng, y R. Tang, «Framework of automated value stream mapping for lean production under the Industry 4.0 paradigm», *JOURNAL OF ZHEJIANG UNIVERSITY-SCIENCE A*, vol. 22, n.o 5, pp. 382-395, may 2021, doi: 10.1631/jzus.A2000480.