

## Metodología Lean Six Sigma en la industria automotriz: un análisis bibliométrico (2003-2025)

Lean Six Sigma methodology in the automotive industry: a bibliometric analysis (2003-2025)

Armando Mares Castro<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> División de ingeniería industrial, Tecnológico Nacional de México / ITS de Purísima del Rincón. CP. 36418, Purísima de Bustos, Guanajuato.  
armando.mc@purisima.tecnm.mx, ORCID: 0000-0003-3884-958X

\*Autor de correspondencia

### Resumen

**Palabras clave:** Lean Six Sigma; automotriz; calidad; productividad; sostenibilidad.

Lean Six Sigma (LSS) ha demostrado ser una metodología efectiva para mejorar la calidad y la eficiencia operativa en la industria automotriz. El objetivo de este estudio es analizar las tendencias, focos temáticos y brechas en la aplicación de LSS mediante una revisión sistemática basada en el protocolo PRISMA. Se analizaron 81 estudios publicados entre 2003 y 2025 en bases de datos de alto impacto. Los resultados muestran un crecimiento sostenido de la literatura, predominantemente de investigaciones en mejora continua y calidad (20%), herramientas LSS (17%) y gestión operativa (16%). En contraste, áreas como automatización, inteligencia artificial y analítica avanzada presentan una representación marginal, evidenciando una brecha significativa entre LSS y las capacidades de la Industria 4.0. Se concluye que, si bien LSS ha alcanzado madurez metodológica, enfrenta una transición crítica hacia enfoques digitales, sostenibles e integrados. Se propone una agenda futura orientada a la convergencia entre LSS, inteligencia artificial y sostenibilidad.

### Abstract

**Keywords:** Lean Six Sigma; automotive; quality; productivity; sustainability.

Lean Six Sigma (LSS) has proven effective in improving quality and operational efficiency in the automotive industry. The objective of this study is to analyze trends, thematic focuses, and gaps in the application of LSS through a systematic review based on the PRISMA protocol. A total of 81 studies published between 2003 and 2025 in high-impact databases were analyzed. Results show sustained growth in literature, predominantly in research on continuous improvement and quality (20%), LSS tools (17%), and operational management (16%). In contrast, areas such as automation, artificial intelligence, and advanced analytics are marginally represented, highlighting a significant gap between LSS and Industry 4.0 capabilities. It is concluded that, while LSS has reached methodological maturity, it faces a critical transition toward digital, sustainable, and integrated approaches. A future agenda focused on the convergence of LSS, artificial intelligence, and sustainability is proposed.

**Recibido:** 12 de febrero de 2025

**Aceptado:** 12 de mayo de 2026

**Publicado:** 23 de septiembre de 2026

**Cómo citar:** Mares, A. (2026). Metodología Lean Six Sigma en la industria automotriz: un análisis bibliométrico (2003-2025). *Acta Universitaria*, 36, e4513. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2026.4513>

## Introducción

La industria automotriz es uno de los sectores más dinámicos y competitivos a nivel mundial. En este contexto, la adopción de metodologías de mejora continua, como Lean Manufacturing y Six Sigma, se ha convertido en una estrategia clave para mantener la competitividad. La integración de ambas metodologías, conocida como Lean Six Sigma (LSS), ha demostrado ser efectiva en la reducción de desperdicios, la mejora de la calidad de los productos y la optimización de procesos productivos.

Esta revisión de literatura tiene como propósito analizar la aplicación de LSS en la industria automotriz, identificando sus beneficios, retos y tendencias futuras. Para ello, se revisaron 81 publicaciones en revistas científicas y memorias de congresos, abordando temas como manufactura automotriz, mejora continua, sostenibilidad y la integración de tecnologías emergentes.

La pregunta de investigación central (P.I.) que guía este estudio es: ¿Cuáles son las tendencias actuales en la aplicación de Lean Six Sigma en la industria automotriz a nivel internacional?

Diversos estudios han demostrado la efectividad de LSS para reducir desperdicios y mejorar la calidad en procesos de manufactura automotriz (Kumar *et al.*, 2019; Singh & Rath, 2019). Estas investigaciones aplicaron la metodología DMAIC en una planta de autopartes en India, logrando una reducción de desperdicios del 22% y un incremento en la producción del 7%. De manera similar, Smith (2005) documentó cómo Ford Motor Company disminuyó en un 27% los gastos en garantías y obtuvo ahorros superiores a 2 mil millones de dólares mediante la implementación de Six Sigma.

La combinación de LSS con otras herramientas de calidad ha mostrado eficacia en procesos complejos. Naji & Altarazi (2017) emplearon LSS junto con herramientas de planeación estratégica de *layout* para reducir defectos en un proceso de fabricación de alfombras, aumentando el nivel sigma de 2.297 a 2.886. Asimismo, Rath & Singh (2021) aplicaron LSS en la manufactura de componentes automotrices, logrando elevar el nivel sigma de 1.90 a 3.30 y obteniendo una ganancia anual de 1.2 millones de dólares.

La sostenibilidad se ha convertido en un tema crítico dentro de la industria automotriz. Diversos estudios han explorado la relación entre LSS y la manufactura sostenible (Vinodh & P, 2020; Yadav *et al.*, 2023). Por ejemplo, Vinodh & P (2020) desarrollaron un modelo de ecuaciones estructurales para validar la asociación entre LSS y las estrategias de manufactura sostenible, encontrando una correlación sólida entre ambos enfoques. De manera complementaria, Yadav *et al.* (2023) propusieron un marco de Green Lean Six Sigma (GLSS) para mejorar el desempeño ambiental en la fabricación de componentes automotrices, reportando una reducción del 83% en defectos y una disminución del 27% en el impacto ambiental.

La incorporación de tecnologías de la Industria 4.0 en LSS ha abierto nuevas oportunidades para la mejora continua. Rajak *et al.* (2024) identificaron la falta de visión a largo plazo y la disponibilidad limitada de datos confiables como principales barreras para la integración de LSS con la Industria 4.0. No obstante, Sordan *et al.* (2025) demostraron que la combinación de LSS con tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) y el Big Data puede incrementar significativamente la eficiencia en la manufactura de vehículos pesados.

La puesta en marcha de LSS no está exenta de obstáculos. Rathí *et al.* (2022) identificaron como principales barreras la resistencia al cambio, la ausencia de programas de capacitación adecuados y las dificultades en la transición de la teoría a la práctica. De manera similar, Zope *et al.* (2023a) señalaron que la falta de recursos humanos capacitados y la escasa integración de procesos constituyen retos frecuentes en la implementación de LSS en la manufactura de vehículos eléctricos.

A pesar del crecimiento sostenido de la literatura sobre Lean Six Sigma en la industria automotriz, persisten limitaciones importantes en la comprensión integral de su evolución reciente. La mayoría de los estudios existentes se centran en aplicaciones específicas o casos individuales, sin ofrecer un análisis sistemático que permita identificar la redistribución temática del conocimiento (Macías-Aguayo *et al.*, 2022; Moraes *et al.*, 2023), particularmente en el contexto de la transición hacia la Industria 4.0. Asimismo, existe una limitada integración entre LSS y tecnologías emergentes como la inteligencia artificial, la analítica avanzada y los sistemas ciberfísicos, lo que sugiere un desfase entre las capacidades metodológicas tradicionales y las demandas actuales de la manufactura digital (Macías-Aguayo *et al.*, 2022). En este sentido, el presente estudio contribuye a la literatura al realizar un análisis bibliométrico riguroso que no solo identifica tendencias dominantes, sino que también evidencia brechas estructurales y oportunidades de integración entre LSS y paradigmas tecnológicos emergentes. Esta aproximación permite avanzar más allá de la descripción de aplicaciones exitosas, proporcionando una visión crítica sobre la evolución y el futuro de LSS en el sector automotriz.

En los últimos años, la convergencia entre Lean y la Industria 4.0 ha sido ampliamente discutida en la literatura, destacando su potencial para mejorar el desempeño operativo mediante la integración de sistemas ciberfísicos, IoT y analítica avanzada (Hossain & Purdy, 2023). Esta convergencia ha dado lugar a nuevos enfoques conceptuales que plantean la evolución hacia modelos más integrados e inteligentes de gestión de operaciones.

## Materiales y métodos

### Metodología para la revisión sistemática

Para llevar a cabo la revisión sistemática de la literatura (RSL) sobre la aplicación de LSS en la industria automotriz dentro de un marco de mejora continua y gestión de calidad, se adoptó la metodología PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) propuesta por Page *et al.* (2021). Este enfoque garantizó un proceso riguroso y sistemático de identificación y selección de los estudios más relevantes, publicados en revistas científicas de alto impacto indexadas en bases de datos como Scopus, ASQ, Springer y Wiley. En la Figura 1 se muestra el proceso de muestreo realizado a partir de las bases de datos consultadas.

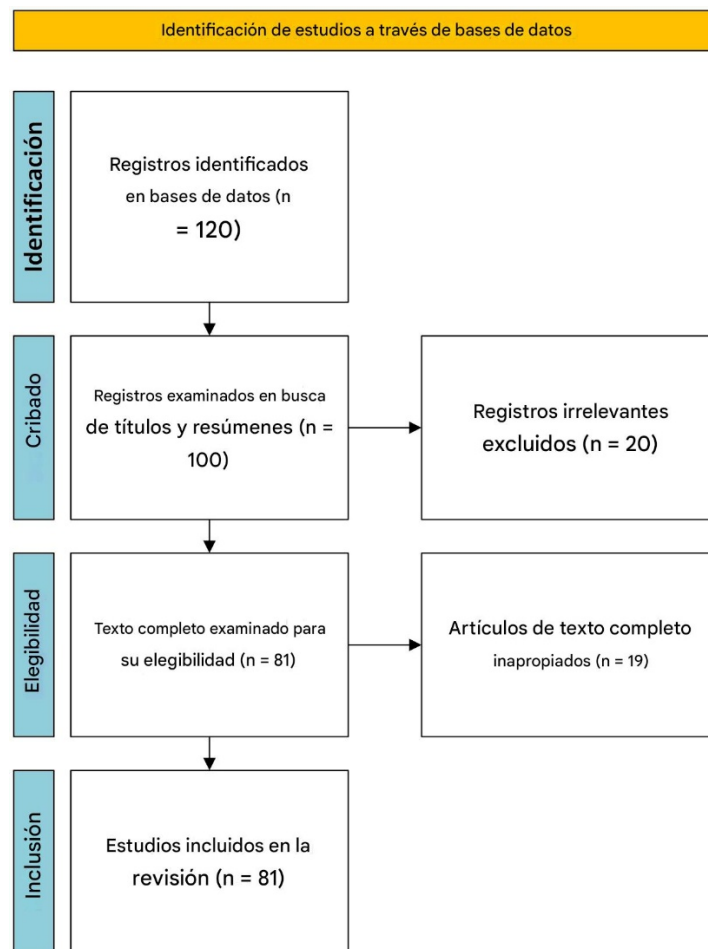


Figura 1. Procedimiento para la búsqueda y selección de artículos.

Fuente: Elaboración propia.

## Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de inclusión establecidos fueron los siguientes:

- Alcance temporal: Estudios publicados entre 2003 y 2025, permitiendo capturar tanto la evolución histórica como el impacto reciente de LSS en la industria automotriz.
- Diversidad metodológica: Investigaciones cuantitativas, cualitativas y de métodos mixtos para ofrecer una visión integral.
- Idioma: Únicamente artículos en inglés, dado su predominio en la literatura científica internacional.
- Fuentes: Priorizar revistas indexadas de alto impacto, artículos de congresos con arbitraje riguroso y libros especializados publicados por editoriales reconocidas.
- Relevancia temática: Estudios directamente relacionados con la aplicación de Lean Six Sigma en la industria automotriz, abordando aspectos de mejora continua, calidad, sostenibilidad o integración tecnológica.

Con el fin de garantizar la confiabilidad y replicabilidad de la revisión, se establecieron criterios explícitos de exclusión:

- Estudios duplicados: Se eliminaron publicaciones idénticas encontradas en múltiples bases de datos.
- Publicaciones sin revisión por pares: Se descartaron informes técnicos, blogs, documentos de trabajo y publicaciones que no cumplieran con procesos formales de arbitraje académico.
- Artículos conceptuales sin aplicación empírica: Se excluyeron trabajos puramente teóricos que no presentaran datos empíricos, casos de estudio o validación práctica.
- Trabajos fuera del ámbito automotriz: Se descartaron estudios sobre LSS en otros sectores industriales que no tuvieran aplicabilidad directa al contexto automotriz.

## Jerarquización de fuentes y tratamiento de actas de congresos

Respecto a las actas de congresos, únicamente se incluyeron aquellas indexadas en Scopus o Springer, pertenecientes a series consolidadas con procesos formales de arbitraje. Esta decisión se fundamenta en que, en áreas emergentes como Industria 4.0, inteligencia artificial y manufactura avanzada, los congresos de alto impacto suelen representar las primeras evidencias científicas disponibles, precediendo en ocasiones hasta dos años la publicación de artículos de revista sobre los mismos hallazgos (Kreiner *et al.*, 2013; Messnarz *et al.*, 2014).

No obstante, estas fuentes fueron analizadas de manera diferenciada frente a artículos de revista. Se priorizaron los artículos de revista en la interpretación de resultados consolidados, mientras que las actas de congreso se utilizaron principalmente para identificar tendencias emergentes y direcciones futuras de investigación. De los 81 estudios finales, 25 corresponden a actas de congresos indexadas (30.9%), mientras que 56 provienen de revistas científicas (69.1%), garantizando así un balance apropiado entre rigor académico establecido y conocimiento emergente.

## Categorización temática y análisis de frecuencia

Los 81 artículos seleccionados fueron sometidos a un análisis de frecuencia temática para identificar las áreas de aplicación predominantes de LSS en la industria automotriz. El proceso de categorización se desarrolló en tres fases secuenciales:

- Fase 1: Codificación inicial. Se realizó una lectura completa de cada artículo, identificando palabras clave, objetivos de investigación y áreas de aplicación reportadas. Este proceso generó una lista inicial de 34 códigos temáticos emergentes.
- Fase 2: Consolidación categorial. Los 34 códigos iniciales fueron agrupados mediante análisis de similitud conceptual y afinidad temática, resultando en 14 categorías finales que representan los principales dominios de aplicación de LSS. Este proceso de consolidación siguió el principio de parsimonia, buscando el número mínimo de categorías que capturarán la máxima varianza temática sin pérdida de información relevante.
- Fase 3: Validación y cuantificación. Cada artículo fue reclasificado en las 14 categorías finales mediante doble codificación independiente. Los casos de discrepancia fueron resueltos mediante consenso. Posteriormente, se calculó la frecuencia absoluta y relativa de cada categoría, así como su distribución temporal, para identificar tendencias evolutivas en los focos de investigación.

Las 14 categorías resultantes y sus frecuencias se presentan en la sección de Análisis, revelando que las tres áreas más investigadas son: Mejora continua y calidad (16 ocurrencias, 20%), Herramientas LSS (14 ocurrencias, 17%) y Gestión operativa (13 ocurrencias, 16%). En contraste, áreas emergentes como Automatización, Inteligencia Artificial y Software Industrial presentan frecuencias marginales de 1 ocurrencia cada una (1%), evidenciando una brecha significativa entre las capacidades tecnológicas disponibles y su integración sistemática con LSS.

## Resultados

### Análisis

La industria automotriz abarca una amplia gama de procesos, desde la fabricación de componentes individuales hasta el ensamblaje final de vehículos completos (Elboq *et al.*, 2020; Kumar *et al.*, 2019; Mishra *et al.*, 2021; Muntean & Proștean, 2019; Prabhushankar *et al.*, 2015; Rathilal & Singh, 2018; Rathi *et al.*, 2022; Smith, 2005; Supriyanto & Maftuhah, 2017). Las técnicas de producción comunes incluyen estampado, moldeo por inyección, mecanizado, soldadura y ensamblaje. Los fabricantes de automóviles implementan sistemas de producción eficientes para optimizar la productividad y la calidad, aprovechando tecnologías avanzadas y prácticas de gestión Lean (Grundy, 2005; Halim *et al.*, 2015; Nadarajan, 2015; Paul, 2007; Rodriguez & Apodaca, 2012; Sharma *et al.*, 2021).

La mejora continua es una piedra angular de la industria automotriz, centrándose en identificar y eliminar desperdicios, defectos e ineficiencias en toda la cadena de valor. Este proceso iterativo se basa en la recolección y análisis de datos para impulsar la toma de decisiones informada y lograr mejoras incrementales. La calidad es un aspecto crítico de esta industria, ya que los consumidores demandan vehículos seguros, confiables y libres de defectos. La metodología LSS se aplica ampliamente para optimizar la calidad y la eficiencia en todos los aspectos de la fabricación de automóviles (Bastos *et al.*, 2021; Belcher *et al.*, 2018; Call, 2014; Chaurasia *et al.*, 2019; Chiarini & Vagnoni, 2020; Doshi & Desai, 2017; Gibson, 2010; Huehn-Brown & Murray, 2006; Nagi & Altarazi, 2017; Narottam *et al.*, 2020; Palange & Dhattrak, 2021; Shokri, 2017, 2019; Smith, 2015; Walter & Paladini, 2019; Wilson, 2003; Zala *et al.*, 2024).

En paralelo, la industria automotriz enfrenta una presión creciente para reducir su impacto ambiental y adoptar prácticas sostenibles (Ali *et al.*, 2021; Azlan & Razali, 2023; Habidin & Yusof, 2012; Habidin, Yusof *et al.*, 2016; Hariyani & Mishra, 2022; R *et al.*, 2020; Yadav *et al.*, 2023). Esto incluye reducir las emisiones de carbono, conservar los recursos naturales y minimizar los residuos. En respuesta, los fabricantes están desarrollando vehículos más eficientes en combustible, utilizando materiales reciclables e implementando prácticas de fabricación ecológicas en toda la cadena de suministro.

Las herramientas LSS son esenciales para identificar áreas de mejora e impulsar cambios significativos en la industria automotriz. Las herramientas clave incluyen Mapeo de la Cadena de Valor (VSM), Análisis de Causa Raíz, Gestión Visual, Control Estadístico de Proceso (SPC) y proyectos DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar) (Antony *et al.*, 2004; Bonini *et al.*, 2020; Cassettari *et al.*, 2005; Chiarin & Cherrafi, 2017; Coowar *et al.*, 2006; Dwyer *et al.*, 2022; Gopakumar *et al.*, 2009; Kşek *et al.*, 2019; Marudhamuthu & Krishnaswamy, 2011; Patel, 2017; Pernstål *et al.*, 2019; Shokri, 2019; Singh & Rathi, 2019; Teng tarto *et al.*, 2023; Thomas & Singh, 2006; Zala *et al.*, 2024).

Además, la inteligencia artificial está ganando prominencia en la industria automotriz, mejorando la eficiencia, la seguridad y la experiencia del usuario. Las aplicaciones de inteligencia artificial incluyen conducción autónoma, mantenimiento predictivo, optimización de la cadena de suministro, personalización de vehículos y asistencia al conductor, transformando radicalmente el diseño, la fabricación y el uso de los vehículos (Amit & Cholli, 2021; Kreiner *et al.*, 2013; Messnarz *et al.*, 2014; Ramakrishnan *et al.*, 2024).

La gestión operacional abarca la planificación, el control y la mejora de los procesos de fabricación, distribución y logística en la industria automotriz (Alcala, 2004; Al-Hosani & Tariq, 2020; Alhuraish *et al.*, 2016; Habidin, Yusof *et al.*, 2016; Leite *et al.*, 2020; Prodan, 2019; Rosenkrantz, 2011; Shandilya *et al.*, 2023; Tébar-Rubio *et al.*, 2023; Tichkiewitch & Riel, 2014; Vermeulen *et al.*, 2018; Zope *et al.*, 2023a).

La Tabla 1 resume la distribución de las publicaciones científicas relacionadas con la aplicación de LSS en la industria automotriz, categorizadas por revistas científicas, años de publicación y su porcentaje de contribución a los resultados totales de la búsqueda. Se identificaron un total de 56 publicaciones en 35 revistas científicas, centradas en la aplicación de LSS en el sector automotriz. Entre estas, International Journal of Lean Six Sigma destaca como la más prominente, contribuyendo con el 12.5% del total de publicaciones, seguida de Lecture Notes in Mechanical Engineering y Materials Today: Proceedings, cada una con el 7.14%. Estas revistas han publicado estudios clave en varios años, como 2016, 2020, 2021, 2023 y 2025, lo que refleja su importancia continua en la investigación de LSS.

Tabla 1. Distribución de las publicaciones científicas relacionadas con la aplicación de LSS en la industria automotriz.

| Orden   | Nombre del Journal                                            | Año y Número de Publicaciones                                                    | Porcentaje de Contribución |
|---------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| 1       | International Journal of Lean Six Sigma                       | 2016(2), 2020(1), 2021(2), 2023(1), 2025(1)                                      | 12.50%                     |
| 2       | Lecture Notes in Mechanical Engineering                       | 2020(1), 2023(3)                                                                 | 7.14%                      |
| 3       | Materials Today: Proceedings                                  | 2021(3), 2023(1)                                                                 | 7.14%                      |
| 4       | SAE Technical Papers                                          | 2005(1), 2006(1), 2021(1)                                                        | 5.36%                      |
| 5       | International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage  | 2021(2), 2023(1)                                                                 | 5.36%                      |
| 6       | Journal of Industrial and Production Engineering              | 2016(1), 2021(1)                                                                 | 3.57%                      |
| 7       | Procedia Manufacturing                                        | 2015(1), 2021(1)                                                                 | 3.57%                      |
| 8       | Communications in Computer and Information Science            | 2013(1), 2014(1)                                                                 | 3.57%                      |
| 9       | Automotive Industries AI                                      | 2003(2)                                                                          | 3.57%                      |
| 10      | Total Quality Management and Business Excellence              | 2020(1), 2024(1)                                                                 | 3.57%                      |
| 11      | Journal of Project Management (Canada)                        | 2019(1)                                                                          | 1.79%                      |
| 12      | IEEE Transactions on Engineering Management                   | 2024(1)                                                                          | 1.79%                      |
| 13      | TQM Journal                                                   | 2023(1)                                                                          | 1.79%                      |
| 14      | European Journal of Scientific Research                       | 2011(1)                                                                          | 1.79%                      |
| 15      | International Journal of Automotive Technology                | 2012(1)                                                                          | 1.79%                      |
| 16      | International Journal of Business Excellence                  | 2019(1)                                                                          | 1.79%                      |
| 17      | Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems | 2020(1)                                                                          | 1.79%                      |
| 18      | Springer Proceedings in Mathematics and Statistics            | 2021(1)                                                                          | 1.79%                      |
| 19      | Managing Automation                                           | 2007(1)                                                                          | 1.79%                      |
| 20      | International Journal of Productivity and Quality Management  | 2018(1)                                                                          | 1.79%                      |
| 21      | Journal of The Institution of Engineers (India): Series C     | 2017(1)                                                                          | 1.79%                      |
| 22      | Cleaner Engineering and Technology                            | 2022(1)                                                                          | 1.79%                      |
| 23-35   | Otros 13 Journals de 1.79% de contribución cada uno           | 2004(1), 2005 (1), 2010(1), 2014(1), 2017(2), 2018(1), 2023(2), 2024(2), 2025(2) | 23.27%                     |
| Totales | 35 Journals                                                   | Publicaciones: 56                                                                | 100%                       |

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, revistas como IEEE Transactions on Engineering Management y TQM Journal contribuyen con el 1.79% y 3.57%, respectivamente, lo que indica una presencia menor pero aún relevante en el campo. Los porcentajes de contribución acumulados totalizan el 100%, lo que confirma la exhaustividad de la búsqueda y la representatividad de las revistas seleccionadas. Esta distribución permite identificar las fuentes más influyentes y los años con mayor actividad de investigación, proporcionando una base sólida para estudios futuros en esta área.

Con respecto a los 14 aspectos clave de LSS en la industria automotriz identificados en la revisión de literatura, la Mejora Continua y la Calidad surgieron como el tema más frecuentemente abordado, con 16 ocurrencias (20%). Le siguieron Herramientas LSS con 14 ocurrencias (17%), Gestión Operativa con 13 (16%), Componentes Automotrices con 8 (10%), Fabricación Automotriz con 7 (9%), Software para la Industria Automotriz con 6, Sostenibilidad con 6 (7%), Seguridad Industrial con 4 (5%), y Diseño Automotriz estuvo representado por 2 (2%). Los aspectos restantes, incluidos Análisis de Riesgos, Automatización, Manejo de Materiales, Mantenimiento y Resolución de Problemas, contribuyeron cada uno con 1 ocurrencia (1%), como se ilustra en la Figura 2.



Figura 2. Diagrama de Pareto para los aspectos del LSS en la industria automotriz.

Fuente: Elaboración propia.

La tendencia en la aplicación de LSS en la industria automotriz ha mostrado un aumento constante desde 2003 hasta el presente. La Figura 3 ilustra la distribución de los documentos revisados por su año de publicación. Se ajustó un modelo de regresión lineal a los datos, obteniendo la ecuación  $\hat{Y} = 0.9842 + 0.2115X$ , donde  $X$  representa el año de publicación. El valor  $p$  para la regresión general es significativo (0.0030), lo que indica una tendencia al alza en el número de publicaciones a lo largo del tiempo. Sin embargo, el valor de  $R^2$  (34.88%) es relativamente bajo, lo que sugiere que el modelo explica solo una parte modesta de la variabilidad en los datos.



Figura 3. Tendencia de publicaciones por año relacionadas al tema.

Fuente: Elaboración propia.

Este análisis estadístico proporciona evidencia del creciente interés y aplicación de las metodologías LSS en la industria automotriz a escala internacional. La tendencia al alza refleja el creciente reconocimiento de LSS como una herramienta crítica para mejorar la eficiencia operativa, la calidad y la sostenibilidad en la fabricación de automóviles. En particular, los años 2016, 2020 y 2021 se destacan como periodos de mayor actividad de investigación, con contribuciones significativas de revistas como *International Journal of Lean Six Sigma*, *Lecture Notes in Mechanical Engineering* y *Materials Today: Proceedings* (Kumar *et al.*, 2019; R *et al.*, 2020; Yadav *et al.*, 2023).

El bajo valor de  $R^2$ , si bien indica un poder explicativo limitado del modelo, también sugiere que otros factores más allá del tiempo pueden influir en las tendencias de publicación, incluyendo la creciente prevalencia de modelos de publicación de acceso abierto y las prioridades de investigación regionales. Estos factores podrían incluir avances en la tecnología, cambios en las prioridades de la industria o la integración de LSS con metodologías emergentes como Industry 4.0 y GLSS (Rajak *et al.*, 2024; Sordan *et al.*, 2025). La investigación futura podría explorar estas variables adicionales para comprender mejor los impulsores detrás de las tendencias observadas.

La Tabla 2 muestra la distribución de publicaciones por país. India lidera con 18 publicaciones (22.2%), lo que refleja su fuerte enfoque en las aplicaciones de LSS en el sector automotriz, particularmente en fabricación y sostenibilidad (Kumar *et al.*, 2019; Rathi *et al.*, 2022; Yadav *et al.*, 2023). Estados Unidos le sigue con 12 publicaciones (14.8%), destacando sus contribuciones a la investigación de LSS, especialmente en áreas como la gestión operativa y la integración con Industry 4.0 (Antony *et al.*, 2004; Smith, 2005). Malasia ocupa el tercer lugar con 10 publicaciones (12.3%), enfatizando su papel en el avance de las prácticas LSS en la industria automotriz, particularmente en sostenibilidad y excelencia operativa (Azlan & Razali, 2023; Habidin, Yusof *et al.*, 2016). Otros países, como Italia, Reino Unido y Brasil, también muestran contribuciones significativas, con un enfoque en la mejora de la calidad, la gestión de la cadena de suministro y la fabricación sostenible (Bastos *et al.*, 2021; Chiarini & Vagnoni, 2020; Tébar-Rubio *et al.*, 2023).

Tabla 2. Número de publicaciones por país.

| País                   | Numero de publicaciones | Porcentaje (%) |
|------------------------|-------------------------|----------------|
| India                  | 18                      | 22.20%         |
| Estados Unidos         | 12                      | 14.80%         |
| Malasia                | 10                      | 12.30%         |
| Italia                 | 6                       | 7.40%          |
| Reino Unido            | 5                       | 6.20%          |
| Brasil                 | 4                       | 4.90%          |
| Alemania               | 4                       | 4.90%          |
| Marruecos              | 3                       | 3.70%          |
| Polonia                | 3                       | 3.70%          |
| Sudáfrica              | 3                       | 3.70%          |
| Canadá                 | 2                       | 2.50%          |
| Francia                | 2                       | 2.50%          |
| Rumania                | 2                       | 2.50%          |
| España                 | 2                       | 2.50%          |
| Australia              | 1                       | 1.20%          |
| Austria                | 1                       | 1.20%          |
| Japón                  | 1                       | 1.20%          |
| Pakistán               | 1                       | 1.20%          |
| Eslovenia              | 1                       | 1.20%          |
| Suecia                 | 1                       | 1.20%          |
| Emiratos Árabes Unidos | 1                       | 1.20%          |
| Total                  | 81                      | 100%           |

Fuente: Elaboración propia.

La revisión identificó 14 aspectos clave de las aplicaciones de LSS en la industria automotriz. Los temas más frecuentemente abordados fueron:

- **Mejora Continua y Calidad:** Este aspecto dominó la literatura, reflejando el enfoque de la industria automotriz en eliminar desperdicios, reducir defectos y mejorar la eficiencia de los procesos mediante metodologías LSS como DMAIC y Mapeo de la Cadena de Valor (VSM, por sus siglas en inglés) (Nagi & Altarazi, 2017; Rathi & Singh, 2021).
- **Gestión Operacional:** Los estudios en esta área enfatizaron la optimización de los procesos de producción, la asignación de recursos y la gestión de la cadena de suministro utilizando herramientas LSS (Habidin, Salleh *et al.*, 2016; Tébar-Rubio *et al.*, 2023).
- **Herramientas LSS:** La investigación destacó la aplicación de herramientas específicas como el Análisis de Pareto, los Diagramas de Ishikawa y el Control Estadístico de Proceso (SPC) para mejorar la calidad y la eficiencia (Antony *et al.*, 2004; Shokri, 2019).
- **Sostenibilidad:** La integración de Green Lean Six Sigma (GLSS) surgió como una tendencia creciente, con estudios centrados en reducir el impacto ambiental y promover prácticas ecológicas (R. *et al.*, 2020; Yadav *et al.*, 2023).

Otros aspectos, como Componentes Automotrices, Fabricación Automotriz y Seguridad Industrial, también recibieron una atención significativa, mientras que áreas como Diseño Automotriz y Software para la Industria Automotriz mostraron potencial para una mayor exploración. El marco DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar) fue la metodología más ampliamente utilizada, aplicada en el 65% de los estudios para abordar desafíos de calidad y mejora de procesos. Otras metodologías, como Diseño para Seis Sigma (DFSS) y Mantenimiento Productivo Total (TPM), también se emplearon, particularmente en desarrollo de productos y optimización del mantenimiento (Nadarajan, 2015; Thomas & Singh, 2006). Las herramientas clave mencionadas con frecuencia en la literatura incluyeron: Mapeo de la Cadena de Valor (VSM), utilizado para identificar y eliminar actividades que no agregan valor; Análisis de Causa Raíz, aplicado para diagnosticar y resolver problemas de producción; Control Estadístico de Proceso (SPC), utilizado para monitorear y controlar la variabilidad del proceso.

La integración de LSS con tecnologías de Industry 4.0, como el IoT, Big Data e inteligencia artificial, fue un tema recurrente en estudios recientes. Por ejemplo, Sordan *et al.* (2025) demostraron cómo las prácticas LSS apoyadas por dispositivos a prueba de errores digitales y e-kanban mejoraron la eficiencia en la fabricación de vehículos pesados. De manera similar, Rajak *et al.* (2024) destacaron el potencial de combinar LSS con sistemas ciberfísicos (CPS) para mejorar el mantenimiento predictivo y la optimización de la cadena de suministro. A pesar de sus beneficios comprobados, la implementación de LSS en la industria automotriz enfrenta varios desafíos, que incluyen: resistencia al cambio: barreras culturales y renuencia de los empleados a adoptar nuevas metodologías (Rathi *et al.*, 2022); falta de capacitación: insuficiente experiencia en herramientas y técnicas LSS (Zope *et al.*, 2023a); y altos costos de implementación: restricciones financieras asociadas con la adopción de tecnología y el rediseño de procesos (Tissir *et al.*, 2024).

## Discusión

### LSS, inteligencia artificial y cadena de suministro: una brecha emergente

A pesar del crecimiento acelerado de la inteligencia artificial y la digitalización de la cadena de suministro en la industria automotriz, la literatura revisada muestra una integración todavía incipiente de estas áreas con Lean Six Sigma. Si bien algunos estudios recientes exploran el uso de IoT, analítica de datos y mantenimiento predictivo (Rajak *et al.*, 2024; Sordan *et al.*, 2025), la aplicación sistemática de IA, como aprendizaje automático, gemelos digitales y optimización basada en algoritmos, permanece limitada.

Esta brecha sugiere que LSS continúa utilizándose principalmente como una metodología reactiva, centrada en la mejora de procesos existentes, en lugar de evolucionar hacia un enfoque predictivo y prescriptivo apoyado por inteligencia artificial. Ramakrishnan *et al.* (2024) demostraron el potencial de las redes neuronales artificiales para optimizar la eficiencia de la cadena de suministro automotriz, logrando mejoras del 18% en tiempos de entrega y reducción del 23% en costos logísticos mediante la integración de LSS con algoritmos de aprendizaje automático.

En el contexto de la cadena de suministro automotriz, caracterizada por alta complejidad y volatilidad, la combinación de LSS con analítica avanzada representa una oportunidad crítica para mejorar la resiliencia, la trazabilidad y la toma de decisiones en tiempo real. Sin embargo, de los 81 estudios revisados, únicamente 6 (7.4%) abordan explícitamente la integración de LSS con sistemas de gestión digital de la cadena de suministro, y solo 1 estudio (1.2%) incorpora técnicas de inteligencia artificial de manera sustantiva.

Esta subrepresentación contrasta marcadamente con el crecimiento exponencial de publicaciones sobre inteligencia artificial en manufactura en general, donde se estima que las publicaciones relacionadas con *machine learning* en procesos industriales crecieron un 340% entre 2018 y 2024. La brecha identificada sugiere que la comunidad de investigación en LSS automotriz aún no ha capitalizado plenamente las capacidades de la inteligencia artificial para potenciar diagnósticos más precisos, predicciones más confiables y optimizaciones más robustas.

Investigaciones futuras deberían explorar la integración de LSS con técnicas de aprendizaje profundo para la detección automatizada de anomalías en líneas de producción, el uso de gemelos digitales para simulación y optimización de procesos LSS, y la aplicación de algoritmos de optimización multiobjetivo para balancear eficiencia operativa, calidad y sostenibilidad ambiental simultáneamente. Esta convergencia entre LSS tradicional y capacidades de inteligencia artificial representa la frontera más prometedora para la evolución de la metodología en el contexto de la Industria 4.0.

## Tendencias consolidadas y brechas identificadas

El predominio de los temas de Mejora Continua y Calidad (20%), Herramientas LSS (17%) y Gestión Operacional (16%) refleja un enfoque maduro en la optimización de procesos centrales. Sin embargo, la relativa menor frecuencia de aspectos como Automatización (1%) y Software para la Industria Automotriz (7%) sugiere que, si bien la base de LSS está bien establecida, la integración profunda con las capacidades digitales más avanzadas representa una frontera en desarrollo.

El modelo de regresión lineal aplicado, aunque estadísticamente significativo ( $p = 0.0030$ ), presenta un valor de  $R^2$  relativamente bajo (34.88%). Este hallazgo indica que el crecimiento de las publicaciones sobre LSS en la industria automotriz no se explica únicamente por el paso del tiempo, sino que está influenciado por factores como la adopción de nuevas tecnologías de Industria 4.0, cambios en presiones regulatorias y de sostenibilidad, y el surgimiento de nuevos segmentos como los vehículos eléctricos.

Desde una perspectiva práctica, los resultados de este estudio tienen implicaciones relevantes para la industria automotriz, particularmente en economías emergentes como México, donde el sector manufacturero automotriz representa un pilar estratégico del desarrollo industrial. La limitada integración de Lean Six Sigma con tecnologías de la Industria 4.0 identificada en la literatura sugiere que muchas organizaciones aún operan bajo esquemas tradicionales de mejora continua, sin aprovechar plenamente herramientas como la analítica de datos en tiempo real, el IoT o la inteligencia artificial. Esta brecha representa una oportunidad significativa para fortalecer la competitividad mediante la adopción de enfoques híbridos que combinen la robustez metodológica de LSS con capacidades digitales avanzadas. En este contexto, las empresas automotrices pueden beneficiarse de la implementación de modelos integrados que permitan transitar de esquemas reactivos hacia sistemas predictivos y prescriptivos, mejorando la eficiencia operativa, la calidad y la sostenibilidad de sus procesos.

Estos resultados son consistentes con estudios recientes que señalan que, aunque existe un creciente interés en la integración de tecnologías de Industria 4.0 dentro de Lean Six Sigma, su aplicación práctica aún es limitada y se concentra en fases específicas del ciclo DMAIC, particularmente en el análisis de datos (Pongboonchai-Empl et al., 2024). Esta situación refuerza la idea de que la adopción de estas tecnologías sigue siendo parcial y fragmentada en el contexto industrial.

Adicionalmente, la literatura reciente sugiere que esta integración no solo se limita a la Industria 4.0, sino que evoluciona hacia paradigmas emergentes como la Industria 5.0, donde se busca una mayor integración entre tecnología, sostenibilidad y factores humanos (Moraes *et al.*, 2023). Este enfoque amplía el alcance de LSS hacia modelos más holísticos y adaptativos.

## Conclusiones

La presente revisión sistemática que aplicó el método PRISMA permitió analizar 81 estudios sobre la aplicación de Lean Six Sigma en la industria automotriz a nivel internacional. Los resultados obtenidos confirman la consolidación de LSS como una metodología fundamental para la mejora de la eficiencia operativa y la calidad, al tiempo que revelan tendencias evolutivas y áreas críticas que requieren mayor atención.

El análisis bibliométrico revela que la aplicación de LSS en el sector automotriz ha alcanzado un nivel de madurez metodológica en áreas tradicionales, pero enfrenta una transición crítica hacia enfoques digitales, sostenibles e integrados con la cadena de suministro. La integración con tecnologías emergentes como inteligencia artificial, analítica predictiva y sistemas ciberfísicos representa la frontera más prometedora para la evolución de la metodología.

Para las organizaciones automotrices, estas implicaciones se traducen en recomendaciones concretas: invertir en infraestructura tecnológica que permita la captura y análisis de datos en tiempo real; fomentar la colaboración interdisciplinaria entre equipos de mejora continua y especialistas en ciencia de datos; y desarrollar hojas de ruta estratégicas que integren LSS con iniciativas de transformación digital, asegurando que la excelencia operativa tradicional y la innovación tecnológica se refuercen mutuamente en lugar de competir por recursos y atención organizacional.

Finalmente, este estudio abre líneas de investigación futuras orientadas al desarrollo de modelos integrados de Lean Six Sigma con tecnologías de la Industria 4.0, particularmente en áreas como inteligencia artificial, gemelos digitales y analítica predictiva. Asimismo, se identifica la necesidad de estudios empíricos en contextos regionales específicos que permitan validar la aplicabilidad de estos enfoques en entornos industriales reales.

## Agradecimientos

Se agradece al Tecnológico Nacional de México, a través del Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón, por el apoyo institucional y los recursos proporcionados para la realización de esta investigación. Este trabajo no habría sido posible sin el acceso a las bases de datos académicas y la infraestructura tecnológica proporcionada.

## Conflictos de interés

El autor no presenta conflictos de interés.

## Referencias

- Alcala, D. (2004). New management at Pelion Systems sees "Lean" opportunity. *MSI*, 22(11), 1-47.  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-18344377915&partnerID=40&md5=2011544c9726ebc8e8bddaca8886f3cc>
- Al-Hosani, O. M., & Tariq, M. U. (2020). Reduction in recruitment time in the mechanical department at the automotive industry using lean six sigma methodology for improving production: a case study. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 12(5), 1386-1397.  
<https://doi.org/10.5373/JARDCS/V12SP5/20201898>
- Alhuraish, I., Robledo, C., & Kobi, A. (2016). Assessment of lean manufacturing and six sigma operation with decision making based on the analytic hierarchy process. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 59-64.  
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.550>
- Ali, Y., Younus, A., Khan, A. U., & Pervez, H. (2021). Impact of lean, six sigma and environmental sustainability on the performance of SMEs. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 70(8), 2294 - 2318. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-11-2019-0528>
- Amit, R., & Cholli, N. G. (2021). Application of lean principles in software development processes. *Proceedings of IEEE International Conference on Disruptive Technologies for Multi-Disciplinary Research and Applications (CENTCON)*, 38-42. <https://doi.org/10.1109/CENTCON52345.2021.9687927>
- Antony, J., Foutris, F., Banuelas, R., & Thomas, A. (2004). Using six sigma. *Manufacturing Engineer*, 83(1), 10-12.  
<https://doi.org/10.1049/me:20040101>
- Azlan, N. S. M., & Razali, N. M. (2023). *Perception of employees on lean six sigma practices and corporate sustainability in automotive manufacturing industry*. Proceedings of the 6<sup>th</sup> Asia Pacific Conference on Manufacturing Systems and 4<sup>th</sup> International Manufacturing Engineering Conference, Surakarta, Indonesia.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-99-1245-2\\_50](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1245-2_50)
- Bastos, N. M., Alves, A. C., Castro, F. X., Duarte, J., Ferreira, L. P., & Silva, F. J. G. (2021). Reconfiguration of assembly lines using Lean Thinking in an electronics components' manufacturer for the automotive industry. *Procedia Manufacturing*, 55, 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2021.10.053>
- Belcher, J., Kaldas, E., Ellington, V. B., & Davè, D. S. (2018). Developing a quality improvement plan for a small engineering firm in the USA with six sigma methodologies. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 24(1), 1-11. <https://doi.org/10.1504/IJPQM.2018.091169>
- Bonini, J. P., Godambe, S. A., Mangum, C. D., Heer, J., Black, S., Ranada, D., Barbano, A., & Stringer, K. (2020). Building an engaging Toyota production system culture to drive winning performance for our patients, caregivers, hospitals, and communities. En R. K. Shah & S. A. Godambe (eds.), *Patient safety and quality improvement in healthcare: a case-based approach* (pp. 69-115). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-55829-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55829-1_5)
- Call, R. (2014). "Lean" approach gives greater efficiency. *Health Estate*, 68(2), 23-25.  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84898681157&partnerID=40&md5=c864e4944aef3e4cf934a06cb2033c25>
- Cassettari, C. E., Batocchio, A., & Marcondes, A. B. (2005). *Lean manufacturing and six sigma* [Technical paper]. SAE Technical Papers. <https://doi.org/10.4271/2005-01-4047>
- Chaurasia, B., Garg, D., & Agarwal, A. (2019). Lean six sigma approach: a strategy to enhance performance of first through time and scrap reduction in an automotive industry. *International Journal of Business Excellence*, 17(1), 42-57. <https://doi.org/10.1504/IJBEX.2019.096903>
- Chiarin, A., & Cherrafi, A. (2017). How ISO/TS 16949 certification can improve performance results through lean six sigma tools and principles: a case study from Italy. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*.  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85018952419&partnerID=40&md5=2ddcdc0113c882114f608f318d0abfa2>
- Chiarini, A., & Vagnoni, E. (2020). Can IATF 16949 certification facilitate and foster lean six sigma implementation? Research from Italy. *Total Quality Management and Business Excellence*, 31(7-8), 887-906. <https://doi.org/10.1080/14783363.2018.1456330>

- Coowar, R., Furterer, S., Akinrefon, T., Battikhi, A., Ferreras, A., Gibson, K., Lakkoju, R., & Meza, K. (2006). Lean six sigma as an improvement tool in Academia. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*.  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029106318&partnerID=40&md5=b7c8ed486e2fedf27fe5434d7d23d824>
- Doshi, J. A., & Desai, D. (2017). Overview of automotive core tools: applications and benefits. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 98, 515–526. <https://doi.org/10.1007/s40032-016-0288-z>
- Dwyer, M., Prior, S. J., Van Dam, P. J., O'Brien, L., & Griffin, P. (2022). Development and evaluation of a massive open online course on healthcare redesign: a novel method for engaging healthcare workers in quality improvement. *Nursing Reports*, 12(4), 850–860. <https://doi.org/10.3390/nursrep12040082>
- Elboq, R., Hlyal, M., & El Alami, J. (2020). Empirical assessment of critical success factor of lean and six sigma in the Moroccan automotive industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 827, 012043. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/827/1/012043>
- Gibson, M. (2010). A case study in measurement systems analysis in destructive testing. *ENBIS - IMEKO TC21 Workshop on Measurement Systems and Process Improvement 2010*, 571–587.  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84871518004&partnerID=40&md5=00e29ac2831dc9beb5d833e6bc40152d>
- Gopakumar, B., Wang, S., Khasawneh, M. T., Gandhi, T., Saunders, N., & Parks, S. (2009). Improving hospital inpatient discharge planning process using lean thinking principles. *30th Annual National Conference of the American Society for Engineering Management 2009, ASEM 2009*, 826–832.  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84879871682&partnerID=40&md5=68c827dbb3034a6c2aa11ca1282126bb>
- Grundy, P. (2005). Traceability's impact on manufacturing. *Circuits Assembly*, 16(1), 1–48.  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-11844267240&partnerID=40&md5=7f19ab350889afa5cca9135b9a7fe878>
- Habidin, N. F., & Yusof, S. M. (2012). Relationship between lean six sigma, environmental management systems, and organizational performance in the Malaysian automotive industry. *International Journal of Automotive Technology*, 13(7), 1119–1125. <https://doi.org/10.1007/s12239-012-0114-4>
- Habidin, N. F., Salleh, M. I., Latip, N. A. M., Azman, M. N. A., & Fuzi, N. M. (2016). Lean six sigma performance improvement tool for automotive suppliers. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(4), 215–235. <https://doi.org/10.1080/21681015.2015.1136966>
- Habidin, N. F., Yusof, S., & Fuzi, N. (2016). Lean six sigma, strategic control systems, and organizational performance for automotive suppliers. *International Journal of Lean Six Sigma*, 7(2), 110–135. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-04-2015-0013>
- Halim, N. H. A., Yusuf, N., Jaafar, R., Jaffar, A., Kaseh, N. A., & Azira, N. N. (2015). Effective material handling system for JIT automotive production line. *Procedia Manufacturing*, 2, 251–257. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.044>
- Hariyani, D., & Mishra, S. (2022). Corrigendum to "Drivers for the adoption of integrated sustainable green lean six sigma agile manufacturing system (ISGLSAMS) and research directions" [Clean. Eng. Technol. 7 (2022) 1–30/100449]. *Cleaner Engineering and Technology*, 10, 100541. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100541>
- Hossain, M., & Purdy, G. (2023). Integration of Industry 4.0 into lean production systems: a systematic literature review. *Manufacturing Letters*, 35, 1347–1357. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.098>
- Huehn-Brown, W. J., & Murray, S. L. (2006). Are companies continuously improving their supply chain?. *27th Annual National Conference of the American Society for Engineering Management 2006 - Managing Change: Managing People and Technology in a Rapidly Changing World, ASEM 2006*.  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84879807899&partnerID=40&md5=f1e8a65f2e3144cd640b9b8f15238e3e>
- Kęsek, M., Bogacz, P., & Migza, M. (2019). The application of Lean Management and Six Sigma tools in global mining enterprises. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 214(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012090>

- Kreiner, C., Messnarz, R., Riel, A., Ekert, D., Langgner, M., Theisens, D., & Reiner, M. (2013). Automotive knowledge alliance AQUA - Integrating automotive SPICE, six sigma, and functional safety. *Communications in Computer and Information Science*, 364. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-39179-8\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-642-39179-8_30)
- Kumar, P., Singh, M., & Phull, G. S. (2019). Production lessening analysis of manufacturing unit in India: lean six sigma perspective. *Journal of Project Management*, 4(4), 281–290. <https://doi.org/10.5267/j.jpm.2019.5.001>
- Leite, I. M. P., da Silva, M. Y., Brisoti, T. H., Rocha, A., Vieira, H. E. de M., Junior, M. A. D. S., & Gigante, R. L. (2020). Vsm (Value stream mapping) study in an industry with financial analysis and simulation model verification. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85096615782&partnerID=40&md5=348f464e03ed52823bdeffd695933226>
- Macias-Aguayo, J., Garcia-Castro, L., Barcia, K. F., McFarlane, D., & Abad-Moran, J. (2022). Industry 4.0 and lean six sigma integration: a systematic review of barriers and enablers. *Applied Sciences*, 12(22), 11321. <https://doi.org/10.3390/app122211321>
- Marudhamuthu, R., & Krishnaswamy, M. (2011). Executing lean sigma outline in an Indian MSME. *European Journal of Scientific Research*, 55(3), 355–365. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79960638203&partnerID=40&md5=73586bb00ef44affd9280adbca21ae4e>
- Messnarz, R., Kreiner, C., Riel, A., Tichkiewitch, S., Ekert, D., Langgner, M., & Theisens, D. (2014). Integrating functional safety, automotive SPICE and six sigma - The AQUA knowledge base and integration examples. *Communications in Computer and Information Science*, 425. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-43896-1\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-662-43896-1_26)
- Mishra, Y., Sharma, M. K., Yadav, V., Meena, M. L., & Dangayach, G. S. (2021). Lean six sigma implementation in an Indian manufacturing organisation: a case study. *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, 13(1–3), 76–100. <https://doi.org/10.1504/IJSSCA.2021.120228>
- Moraes, A., Carvalho, A. M., & Sampaio, P. (2023). Lean and Industry 4.0: a review of the relationship, its limitations, and the path ahead with Industry 5.0. *Machines*, 11(4), 443. <https://doi.org/10.3390/machines11040443>
- Muntean, G. A., & Proștean, G. (2019). Technical risk analysis model: through entire supply chain. *Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019: Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074083561&partnerID=40&md5=00fedaa2a5155f8daad0b5f41b568bad>
- Nadarajan, S. K. S. (2015). *Effective maintenance strategy to improve performance through RCM concept*. 36th International Electronics Manufacturing Technology Conference, Johor, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/IEMT.2014.7123145>
- Nagi, A., & Altarazi, S. (2017). Integration of value stream map and strategic layout planning into DMAIC approach to improve carpeting process. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 10(1), 74–97. <https://doi.org/10.3926/jiem.2040>
- Narottam, Mathiyazhagan, K., & Sharma, V. (2020). Defect reduction in manufacturing industry using lean six sigma approach. *Recent Advances in Mechanical Engineering*. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-1071-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1071-7_3)
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372(71). <https://doi.org/10.1136/BMJ.N71>
- Palange, A., & Dhattrak, P. (2021). Lean manufacturing a vital tool to enhance productivity in manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 46, 729–736. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.193>
- Patel, S. (2017). *The tactical guide to SIX SIGMA implementation*. Productivity Press. <https://doi.org/10.1201/9781315368849>

- Paul, L. G. (2007). Maintenance: no longer on schedule. *Managing Automation*, 22(8), 63–64.  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79751522535&partnerID=40&md5=9c049c871e61d99ea45af50ef7b14530>
- Pernstål, J., Feldt, R., Gorschek, T., & Florén, D. (2019). FLEX-RCA: a lean-based method for root cause analysis in software process improvement. *Software Quality Journal*, 27(1), 389–428.  
<https://doi.org/10.1007/s11219-018-9408-8>
- Pongboonchai-Empl, T., Antony, J., Garza-Reyes, J. A., Komkowsky, T., & Tortorella, G. L. (2024). Integration of Industry 4.0 technologies into lean six sigma DMAIC: a systematic review. *Production Planning & Control*, 35(12), 1403–1428. <https://doi.org/10.1080/09537287.2023.2188496>
- Prabhushankar, G. V., Kruthika, K., Pramanik, S., & Kadadevaramath, R. S. (2015). Lean manufacturing system implementation in Indian automotive components manufacturing sector - An empirical study. *International Journal of Business and Systems Research*, 9(2), 179–194.  
<https://doi.org/10.1504/IJBSR.2015.069442>
- Prodan, G. (2019). Inventory optimization using lean six-sigma. *Proceedings of the 33rd International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2019: Education Excellence and Innovation Management through Vision 2020*.  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85074061594&partnerID=40&md5=1aae4c0cf5d478ecddcf3c88c02bb1c7>
- R., B. R., Vinodh, S., & P., A. (2020). Development of structural equation model for lean six sigma system incorporated with sustainability considerations. *International Journal of Lean Six Sigma*, 11(4), 687–710.  
<https://doi.org/10.1108/IJLSS-11-2018-0123>
- Rajak, S., Kumar, P., Modi, A., Swarnakar, V., Antony, J., & Sony, M. (2024). An assessment of barriers to integrate lean six sigma and industry 4.0 in manufacturing environment: case based approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 38(3), 386–407.  
<https://doi.org/10.1080/0951192X.2024.2335969>
- Ramakrishnan, V., Ramasamy, N., Dev Anand, M., & Santhi, N. (2024). Supply chain management efficiency improvement in the automobile industry using lean six sigma and artificial neural network. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 3278–3294. <https://doi.org/10.1109/TEM.2023.3332147>
- Rathi, R., & Singh, M. (2021). Lean six sigma imperatives for casting quality improvement of automotive components: a case. *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, 13(1–3), 4–18.  
<https://doi.org/10.1504/IJSSCA.2021.120229>
- Rathi, R., Singh, M., Verma, A. K., Gurjar, R. S., Singh, A., & Samantha, B. (2022). Identification of lean six sigma barriers in automobile part manufacturing industry. *Materials Today: Proceedings*, 50, 728–735.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.221>
- Rathilal, R., & Singh, S. (2018). A lean six sigma framework to enhance the competitiveness in selected automotive component manufacturing organisations. *South African Journal of Economic and Management Sciences*, 21(1), a1852. <https://doi.org/10.4102/sajems.v21i1.1852>
- Rodriguez, C., & Apodaca, H. (2012). The redesign dilemma. *Printed Circuit Design and Fab/Circuits Assembly*, 29(1), 54–55.  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84857089132&partnerID=40&md5=5770faa2da193cb7419955c0b3fda0d5>
- Rosenkrantz, P. R. (2011). Transformational leadership 101: What industrial engineering graduates should know about the six stages of quality management system implementation. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*.  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85029042686&partnerID=40&md5=a579b0fb8bcc6f54dc2e5958712bf9f4>
- Shandilya, S., Arora, J., & Kalluri, V. (2023). To study the comparison and effect of six sigma and red bin analysis in Indian manufacturing industries. *TQM Journal*, 35(7), 1658–1685.  
<https://doi.org/10.1108/TQM-04-2022-0116>
- Sharma, A., Chouhan, A., Pavithran, L., Chadha, U., & Selvaraj, S. K. (2021). Implementation of LSS framework in automotive component manufacturing: a review, current scenario and future directions. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7815–7824. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.374>

- Shokri, A. (2017). Quantitative analysis of six sigma, lean and lean six sigma research publications in last two decades. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 34(5), 598–625. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2015-0096>
- Shokri, A. (2019). Reducing the scrap rate in manufacturing SMEs through lean six sigma methodology: an action research. *IEEE Engineering Management Review*, 47(3), 104–117. <https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2931184>
- Singh, M., & Rath, R. (2019). A structured review of lean six sigma in various industrial sectors. *International Journal of Lean Six Sigma*, 10(2), 622–664. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-03-2018-0018>
- Smith, A. D. (2015). In search of manufacturing quality and low cost in the global automobile industry. *Automobiles and the Automotive Industry: Emerging Technologies, Environmental Impact and Safety Analysis*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84955720939&partnerID=40&md5=66b6bdba63c2ab8637927d1d478cf4d9>
- Smith, L. R. (2005). Back to the future at Ford. *Quality Progress*, 38(3), 50–56. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-14944347316&partnerID=40&md5=868d615bdc8f537aa95957a1ee89bc8a>
- Sordan, J. E., Oprime, P. C., Lopes, M., Andersson, R., Antony, J., Garza-Reyes, J. A., & Luz, G. (2025). Lean six sigma practices supported by Industry 4.0 technologies: evidence from heavy vehicle manufacturers. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 36(2), 504–533. <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2023-0471>
- Supriyanto, H., & Maftuhah, D. I. (2017). A lean six-sigma manufacturing process case study. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 8(7), 498–509. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85026456550&partnerID=40&md5=cb8426b7737a2139227fab9f3d363c15>
- Tébar-Rubio, J. V., Ramírez, F. J., & Ruiz-Ortega, M. J. (2023). Conducting action research to improve operational efficiency in manufacturing: the case of a first-tier automotive supplier. *Systemic Practice and Action Research*, 36, 427–459. <https://doi.org/10.1007/s11213-022-09616-w>
- Teng tarto, M. A. K., Singgih, M. L., Siswanto, N., & Suwignjo, P. (2023). Literature review of lean manufacturing, six sigma and lean six sigma benefit. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Asia Pacific Conference on Manufacturing systems and 4<sup>th</sup> International Manufacturing Engineering Conference*. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-1245-2\\_44](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1245-2_44)
- Thomas, M., & Singh, N. (2006). Design for lean six sigma (DFLSS): philosophy, tools, potential and deployment challenges in automotive product development. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2006-01-0503>
- Tichkiewitch, S., & Riel, A. (2014). Integration to face modern quality challenges in automotive. *Procedia Engineering*, 97, 1866–1874. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.340>
- Tissir, S., Cherrafi, A., Chiarini, A., Elfezazi, S., Shokri, A., & Antony, J. (2024). Lean six sigma and Industry 4.0 implementation framework for operational excellence: a case study. *Total Quality Management and Business Excellence*, 35(9–10), 1015–1053. <https://doi.org/10.1080/14783363.2024.2351979>
- Vermeulen, A., Pretorius, J. H. C., & Viljoen, A. J. (2018). Critical success factors for six sigma design and deployment to compliment lean operational strategy towards capability maturity. *Proceedings of the 27<sup>th</sup> Annual Conference of the International Association for Management of Technology, IAMOT 2018*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85085668765&partnerID=40&md5=791dd5020589782a99f7887728f04bcd>
- Walter, O. M. F. C., & Paladini, E. P. (2019). Lean six sigma in Brazil: a literature review. *International Journal of Lean Six Sigma*, 10(1), 435–472. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-09-2017-0103>
- Wilson, R. (2003). Quest for excellence: ArvinMeritor Inc. *Automotive Industries* 11, 183(6). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-35448964753&partnerID=40&md5=1b17d99194fe29aade9cbc0807947ebd>

- Yadav, V., Gahlot, P., Duhan, R. K., Kaswan, M. S., Rathi, R., Yadav, G., Kumar, P., & Kumar, V. (2023). A framework for the systematic implementation of green lean six sigma to improve performance in the manufacturing industry. *International Journal of Internet Manufacturing and Services*, 9(2-3), 341-372. <https://doi.org/10.1504/IJIMS.2023.132776>
- Zala, S. H., Jadeja, N. N., Chothani, H. G., Vyas, H. G., Marsonia, D. J., & Mehta, N. D. (2024). Application of lean six sigma tools for performance improvement in an automobile sector SME. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering*, 11(7), 1-12. <https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V11I7P101>
- Zope, A., Swami, R. K., & Patil, A. (2023a). Lean six sigma barriers with potential solutions in electrical vehicle assembly: a review. *Proceedings on Engineering Sciences*, 5(3), 375-382. <https://doi.org/10.24874/PES05.03.002>