

**Análisis de Casos de Éxito en la Implementación de la Metodología Lean Six Sigma en
Empresas Manufactureras del Sector del Acero: Una Revisión de la Literatura**

**Cristhian Felipe Sosa Torres, Laura Bibiana Márquez Bautista y Luz Ariadna Cortes
Romero**

**Trabajo de grado para optar el título de Especialista en Gerencia de la Productividad y de
las Operaciones Logísticas**

**Director
Eduwin Andrés Flórez Orejuela
Magister en Administración**

**Universidad Santo Tomás, Bucaramanga
División de Ingenierías y Arquitectura
Especialización en Gerencia de la Productividad y de las Operaciones Logísticas**

2026

Contenido

Introducción.....	10
1. Planteamiento del problema	11
1.1 Descripción del problema.....	11
1.2 Formulación del problema.....	12
2. Objetivos	13
2.1 Objetivo general.....	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. Justificación	13
4. Marco referencial	15
4.1 Marco contextual	15
4.1.1 Generalidades del sector.....	15
4.1.2 Generalidades de las organizaciones	17
4.1.3 Descripción del producto o servicio	18
4.2 Marco teórico.....	20
4.2.1 Lean Manufacturing	20
4.2.2 Six Sigma: fundamentos, DMAIC y herramientas estadísticas	22
4.2.3 Integración Lean Six Sigma.....	23
4.3 Marco conceptual.....	25
4.3.1 Industria siderúrgica.....	25
4.3.2 Empresa manufacturera.....	25
4.3.3 Manufactura del acero.....	25
4.3.4 Sistema de gestión de la calidad	26

4.3.5	Sistema de gestión ambiental	26
4.3.6	Manufactura esbelta (Lean Manufacturing)	26
4.3.7	Desperdicio y valor para el cliente	26
4.3.8	Six Sigma	27
4.3.9	Lean Six Sigma (LSS).....	27
4.3.10	Metodología DMAIC	27
4.3.11	Variabilidad del proceso.....	28
4.3.12	Capacidad de proceso y nivel sigma	28
4.3.13	Mejora continua	28
4.3.14	Producción más limpia y sostenibilidad en la industria del acero	29
4.3.15	Aguas abajo (Downstream)	29
4.3.16	Justo a tiempo “Just in time”	29
4.4	Marco legal.....	30
4.4.1	Normativa ambiental y de producción más limpia (NTC ISO 14001 y Política PML)	
	30	
4.4.2	Normas de gestión de la calidad (NTC ISO 9001)	32
4.4.3	Normas técnicas internacionales aplicables (ISO 13053 – Six Sigma)	33
4.5	Estado del arte.....	34
4.5.1	Implementación de Lean Six Sigma en el sector del acero	34
4.5.2	Casos de aplicación y herramientas utilizadas	35
4.5.3	Vacíos actuales en la literatura y desafíos no abordados	37
5.	Metodología.....	39
5.1	Enfoque y tipo de investigación	39

5.2	Técnica de investigación y recolección de información	39
5.3	Fuentes de información	40
5.4	Estrategia de búsqueda y criterios de selección.....	40
5.5	Instrumento de organización y análisis	41
5.6	Procedimiento metodológico	42
5.7	Rigor metodológico.....	44
6.	Resultados.....	45
6.1	Desarrollo del Primer Objetivo Específico	45
6.1.1	Criterios de clasificación documental	46
6.1.2	Hallazgos principales de la clasificación	47
6.1.3	Resultados cuantitativos y cualitativos relevantes.....	50
6.1.4	Interpretación de categorías derivadas de la matriz	51
6.1.5	Análisis de la Clasificación Documental	52
6.2	Desarrollo del Segundo Objetivo Específico	53
6.2.1	Criterios aplicados para la comparación	54
6.2.2	Complejo de análisis comparativo basado en los criterios definidos	63
6.3	Desarrollo del Tercer Objetivo Especifico.....	66
6.3.1	Criterios utilizados para evaluar los hallazgos	67
6.3.2	Evaluación de la efectividad de Lean Six Sigma en el sector del acero	68
6.3.3	Beneficios generales identificados en la literatura revisada.....	70
6.3.4	Limitaciones de Lean Six Sigma evidenciadas en el sector del acero	71
6.3.5	Balance crítico para el tercer objetivo.....	73
6.3.6	Síntesis del tercer objetivo	74

7. Discusión.....	75
Referencias	79

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Clasificación del corpus documental por enfoque predominante</i>	46
Tabla 2. <i>Síntesis de los documentos clasificados en la matriz</i>	48
Tabla 3. <i>Resultados cuantitativos y cualitativos relevantes del corpus</i>	50
Tabla 4. <i>Categorías interpretativas derivadas de la matriz</i>	51
Tabla 5. <i>Comparación de documentos según enfoque predominante</i>	56
Tabla 6. <i>Comparación según proceso intervenido</i>	58
Tabla 7. <i>Comparación según metodología aplicada y fases de mejora</i>	59
Tabla 8. <i>Comparación según herramientas utilizadas e indicadores de resultado</i>	61
Tabla 9. <i>Comparación según nivel de relación sectorial</i>	62
Tabla 10. <i>Matriz de valoración del complejo de análisis comparativo según los criterios definidos</i>	64
Tabla 11. <i>Criterios de evaluación de los hallazgos</i>	67
Tabla 12. <i>Evaluación de la efectividad según tipo de evidencia revisada</i>	69
Tabla 13. <i>Beneficios generales y condiciones de validez identificados</i>	71
Tabla 14. <i>Limitaciones identificadas</i>	73
Tabla 15. <i>Conclusiones generales sobre la efectividad y las limitaciones</i>	74

Lista de figuras

Figura 1. *Gráfico de radar del complejo de análisis comparativo según los criterios definidos* 64

Resumen

La presente monografía tuvo como objetivo analizar la literatura científica sobre casos de éxito en empresas manufactureras del sector del acero. Se desarrolló bajo un enfoque mixto, de alcance analítico y diseño no experimental, mediante una revisión documental sistematizada apoyada en análisis de contenido y valoración documental. La búsqueda consideró publicaciones en español e inglés entre 2020 y 2026, consultadas en bases como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, ResearchGate y Google Scholar. A partir de 547 registros iniciales, se depuró un corpus de 17 documentos, clasificados según su relación con el acero, las herramientas aplicadas, los indicadores reportados y sus limitaciones. Los hallazgos mostraron que DMAIC, VSM, SMED, TPM, Pareto e Ishikawa contribuyeron a mejorar productividad, calidad, disponibilidad y reducción de desperdicios. También se identificó que sus resultados dependieron del contexto técnico, los datos y la cultura organizacional necesaria para sostener la mejora en el tiempo.

Palabras clave: Lean Six Sigma, industria del acero, manufactura esbelta, Six Sigma, mejora continua, productividad, calidad, sostenibilidad, casos de éxito.

Abstract

The objective of this monograph was to analyze the scientific literature on success stories in manufacturing companies within the steel sector. It was conducted using a mixed-methods approach, with an analytical scope and a non-experimental design, through a systematic literature review supported by content analysis and documentary evaluation. The search included publications in Spanish and English from 2020 to 2026, retrieved from databases such as Scopus, Web of Science, ScienceDirect, ResearchGate, and Google Scholar. From an initial 547 records, a corpus of 17 documents was selected, classified according to their relationship to steel, the tools applied, the reported indicators, and their limitations. The findings showed that DMAIC, VSM, SMED, TPM, Pareto, and Ishikawa contributed to improving productivity, quality, availability, and waste reduction. It was also identified that their results depended on the technical context, the data, and the organizational culture necessary to sustain improvement over time.

Keywords: Lean Six Sigma, steel industry, Lean Manufacturing, Six Sigma, continuous improvement, productivity, quality, sustainability, success stories.

Introducción

La industria del acero constituye un sector estratégico para el desarrollo económico, industrial y productivo, debido a su relación directa con actividades como la construcción, la infraestructura, la energía, la fabricación de maquinaria y la industria metalmecánica. Sin embargo, sus procesos productivos suelen estar asociados con altos consumos de energía, exigencias técnicas rigurosas, variabilidad operativa, reprocesos, defectos y costos elevados, factores que obligan a las empresas siderúrgicas a fortalecer sus sistemas de gestión y sus prácticas de mejora continua.

En este contexto, Lean Six Sigma se presenta como una metodología relevante para la optimización de procesos, al integrar la eliminación de desperdicios propia de Lean Manufacturing con el control estadístico y la reducción de la variabilidad característicos de Six Sigma. A pesar de su amplia utilización en diferentes sectores industriales, la evidencia sobre su implementación específica en la manufactura del acero se encuentra dispersa en estudios de caso, tesis, artículos e informes técnicos, lo que dificulta identificar tendencias, herramientas recurrentes, resultados obtenidos y vacíos de investigación.

Por lo anterior, esta monografía tendrá como propósito analizar la literatura científica existente sobre la implementación de Lean Six Sigma en empresas manufactureras del sector del acero, con el fin de caracterizar su estado actual. El documento se organizará en apartados que desarrollaran el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación, el marco referencial, la metodología, el cronograma, el presupuesto y las referencias utilizadas en el proceso investigativo.

1. Planteamiento del problema

La industria del acero se caracteriza por procesos productivos intensivos, altos costos operativos, por lo que constituye un sector altamente competitivo y dependiente de estándares estrictos de calidad, que enfrenta desafíos operativos relacionados con altos tiempos de ciclo, cuellos de botella, lo que se traduce en defectos, desperdicio energético, reprocesos y pérdidas significativas. Si bien, metodologías como Lean y Six Sigma son efectivas para reducir defectos y mejorar la eficiencia, la industria del acero impone retos complejos debido a sus procesos térmicos, metalúrgicos y logísticos. Por lo tanto, para entender el impacto real de Lean Six Sigma en este sector, es necesario revisar la literatura actual con el fin de identificar los vacíos críticos, las limitaciones operativas y las verdaderas oportunidades de mejora en la manufactura siderúrgica.

1.1 Descripción del problema

La manufactura del acero se desarrolla a través de una cadena de procesos en la que cada etapa incide de manera directa en la calidad del producto final, esto se explica desde la transformación de la materia prima hasta las operaciones de conformado y acabado, donde la industria siderúrgica exige un control permanente de variables químicas, térmicas y operativas que pueden afectar el desempeño comprometiendo la resistencia y uniformidad del material obtenido de no ser sujetas a control y observación. Esta condición explica porque el sector actualmente requiere de sistemas de gestión y mejora que sean capaces de responder a procesos altamente técnicos y entornos productivos donde la estabilidad operacional resulta determinante (World Steel Association, 2023).

A esta complejidad interna se suma la importancia económica del acero, debido a su relación directa con actividades como la construcción, el sector automotriz, la energía y la

fabricación de maquinaria. Este reto conlleva a que las empresas siderúrgicas comprendan un manejo de estándares calidad que hace que los niveles de productividad se sostengan en niveles óptimos reduciendo desperdicios y adaptándose al mercado competitivo.

De modo de entender la mejora continua del proceso y conllevar este reto, las empresas han hecho uso de metodologías para este propósito, entre ellas Lean Six Sigma ha sido considerada pertinente a motivo de su forma de integrar herramientas orientadas a la eficiencia operativa que mejora el control de calidad y variabilidad fundamentada desde la toma de decisiones basada en datos. Sin embargo, aunque existe un interés creciente por su aplicación en distintos contextos manufactureros, la literatura relacionada con su implementación en la industria del acero sigue siendo limitada y dispersa, continúa siendo limitada y se encuentra dispersa en estudios de caso, investigaciones aisladas y documentos con distintos niveles de profundidad metodológica.

Este escenario hizo necesario revisar de manera organizada la evidencia disponible orientada a comprender la aplicación de Lean Six Sigma en procesos relacionados con la manufactura siderúrgica enfatizando en las herramientas utilizadas con sus resultados y limitaciones; a apoyo de generar un punto de información útil para académicos y decisiones estratégicas de profesionales de mejora continua.

1.2 Formulación del problema

Aunque Lean Six Sigma ha sido ampliamente estudiado en otros sectores industriales, las empresas del sector del acero requieren metodologías robustas para mejorar la eficiencia, reducir la variabilidad, optimizar la calidad de sus productos y responder a exigencias crecientes de sostenibilidad y competitividad.

¿Qué evidencia aporta la literatura científica sobre la implementación de Lean Six Sigma en empresas manufactureras del sector del acero, en términos de enfoques, herramientas, beneficios y limitaciones?

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar la literatura científica existente sobre los casos de éxito en la implementación de la metodología Lean Six Sigma en empresas manufactureras del sector del acero.

2.2 Objetivos específicos

- Clasificar los estudios que abordan la aplicación de Lean Six Sigma en la industria del acero a partir de la literatura revisada.
- Comparar los enfoques, metodologías y herramientas de Lean Six Sigma utilizadas en los procesos de la industria del acero.
- Evaluar los hallazgos de la literatura revisada para establecer conclusiones generales sobre la efectividad y las limitaciones de Lean Six Sigma en el sector del acero.

3. Justificación

La investigación se justifica en la necesidad de consolidar y analizar el conocimiento disponible sobre la implementación de Lean Six Sigma en la industria del acero, un sector que enfrenta desafíos permanentes asociados con la eficiencia operativa, la reducción de desperdicios, el control de la variabilidad, la calidad del producto y la sostenibilidad de los procesos. Viendo el

nicho de este sector, en las empresas siderúrgicas los aspectos como las fallas de calidad, los reprocesos, los tiempos improductivos, los cuellos de botella y el alto consumo energético pueden afectar directamente su competitividad, en tal sentido, estas condiciones no solo incrementan los costos operativos, sino que también reducen la capacidad de respuesta de las organizaciones frente a las demandas del mercado.

Desde una perspectiva académica, la información disponible sobre Lean Six Sigma en la industria del acero no se encuentra consolidada, sino distribuida en distintos estudios y experiencias de implementación. Habitualmente, esto hace más difícil identificar coincidencias, factores de éxito, herramientas recurrentes, beneficios y limitaciones metodológicas. Por esta razón, una revisión ordenada de la literatura permite integrar los principales aportes encontrados y aportar una base útil para nuevas investigaciones en el campo de la productividad y las operaciones logísticas.

Por otro lado, desde una perspectiva económica y empresarial, esta monografía resulta pertinente porque ofrece una lectura estructurada sobre los enfoques y herramientas de Lean Six Sigma que han sido aplicados con resultados positivos en contextos productivos similares. De esta manera, es útil como base de consulta para investigadores, estudiantes, profesionales de ingeniería industrial, responsables de mejora continua y empresas manufactureras del acero. Asimismo, sus aportes pueden apoyar la toma de decisiones en proyectos orientados a la optimización de procesos, la gestión de la calidad, la reducción de defectos, la disminución de desperdicios y el fortalecimiento de una cultura de mejora continua.

La propuesta también es pertinente frente a las líneas actuales de sostenibilidad, producción más limpia, eficiencia energética e Industria 4.0, debido a que Lean Six Sigma puede articularse con sistemas de gestión de calidad, gestión ambiental y análisis de datos para mejorar el desempeño

operativo y ambiental. En consecuencia, el presente trabajo aportará al programa de Gerencia de la Productividad y de las Operaciones Logísticas, al abordar una problemática asociada con la productividad, la eficiencia, la calidad y la competitividad en un sector industrial de alto impacto.

4. Marco referencial

4.1 Marco contextual

4.1.1 Generalidades del sector

En primer lugar, el sector de la manufactura del acero en Colombia tiene una importancia estratégica para la economía nacional, debido a su participación en actividades fundamentales como la construcción y la infraestructura. Según la Sociedad Colombiana de Arquitectos (2023), la producción nacional de acero estuvo concentrada principalmente en cinco empresas siderúrgicas (Acerías Paz del Río, Gerdau Diaco, Grupo Siderúrgico Reyna, Sidoc y Ternium) que representan la parte total de la producción nacional de acero y en mayor medida, la demanda proveniente de dichos sectores. Bajo este argumento, la producción se mantiene hacia el año 2025, en la medida en que la construcción y la infraestructura continúan siendo los principales destinos del acero producido en el país. Según La República respaldada en las proyecciones del Comité Colombiano de Productores de Acero (ANDI), estas compañías generaron en conjunto para el año 2021, más de 45.000 empleos (directos e indirectos) y abastecer eficientemente el mercado nacional con producción local.

No obstante, el sector enfrenta desafíos importantes en el contexto económico actual. Uno de los principales retos proviene de la competencia con el acero importado a bajo costo, como

argumenta Gómez (2025) particularmente de países como China, Rusia y Turquía, lo cual ha puesto en presión a las siderúrgicas nacionales, en contra medida, directivos de la industria han señalado que el ingreso de acero extranjero en condiciones de competencia desleal, como precios dumping hasta 35 a 40% inferiores, dificulta seriamente la viabilidad local; amenazando con la pérdida de participación de mercado y empleo si no se equilibra el panorama mediante medidas de defensa comercial. De manera comparativa, en economías como México o Brasil se han impuesto aranceles y salvaguardias al acero para proteger su producción, ahora bien, en Colombia apenas se están gestionando este tipo de acciones, por lo que las siderúrgicas locales abogan por una respuesta gubernamental más decidida en favor de la industria nacional.

Por otro lado, haciendo un contraste entre La República en 2021 y la información aportada por Gómez en 2025, un vector resultante se resuelve en otra dificultad que proviene de los costos internos de producción, pues el incremento en los precios de insumos clave como la chatarra metálica (cuyo valor se elevó más de 100% entre 2020 y 2021 y de la energía un déficit en el suministro de gas natural que encarece la operación) han impactado los márgenes y la competitividad de las acerías colombianas. En la perspectiva a nivel global, la sobreoferta de acero en América Latina (que se estima ocho veces la capacidad de producción) y la volatilidad en los precios de materias primas añaden incertidumbre al sector. Frente a este panorama nacional e internacional, las oportunidades de demanda interna del acero tienen una perspectiva positiva gracias a proyectos de infraestructura y construcción planificados, lo que permitiría a las empresas locales aumentar su producción si se controla la perspectiva anteriormente fundamentada.

Desde otra perspectiva, avanzar hacia prácticas industriales sostenibles representa una oportunidad de diferenciación para el sector siderúrgico. En este sentido, Mokrzycki y Gawlik (2025) señalan que la industria del acero continúa siendo una de las actividades industriales con

mayor incidencia en las emisiones de gases de efecto invernadero. Para solapar dicho efecto negativo, los autores destacan que el uso de chatarra reciclada en hornos eléctricos de arco constituye una alternativa relevante para disminuir la intensidad de carbono del proceso productivo.

Naturalmente, esto se debe a que el acero puede reciclarse sin pérdida de calidad, lo que favorece la reducción parcial de emisiones y contribuye a la transición hacia modelos de economía circular. En consecuencia, no solo contribuyen al desempeño ambiental de las empresas siderúrgicas, sino que también pueden reflejarse en menores consumos de energía, insumos y materias primas. En el caso colombiano, este sector presenta una estructura empresarial concentrada y un interés creciente por la calidad y la sostenibilidad; aun así, enfrenta desafíos relacionados con los costos de producción, la competencia internacional y la necesidad de mejorar continuamente su eficiencia operativa.

4.1.2 Generalidades de las organizaciones

Durante los últimos años la industria siderúrgica local ha mantenido altos estándares de calidad reconocidos internacionalmente gracias al cumplimiento estricto de normas técnicas y a inversiones significativas en modernización; según La República (2021) esto ha permitido un crecimiento constante de la producción y la capacidad instalada de un total 5 acerías y 12 plantas de laminación en caliente donde la actualización de las plantas (alrededor de 620 millones de dólares) ha permitido captar aproximadamente de 2,6 millones de toneladas anuales de acero crudo, lo que resulta suficiente para atender el aumento proyectado de la demanda interna de acero de construcción. En resultado, se han concretado nuevos proyectos industriales como la planta de Palmar de Varela (Ternium) con capacidad de 500.000 toneladas por año, orientados a sustituir

importaciones. Ahora bien, estas siderúrgicas operan bajo un modelo de producción típicamente integrado en la cadena de valor, es decir, se encargan de transformar materias primas (principalmente chatarra ferrosa reciclada y, en menor medida, arrabio o pellets de mineral de hierro) en productos siderúrgicos intermedios o finales, que luego son utilizados por "industrias aguas abajo" (downstream industries) como la construcción, la metalmecánica, la ferretería y la automotriz.

En Colombia, la ruta predominante de proceso es la de mini acerías con horno eléctrico al arco (EAF) para la fusión de chatarra, seguido de líneas de colada continua y laminación en caliente de aceros largo, existen 6 plantas de aceración eléctrica y 12 trenes de laminación en el país, con una capacidad instalada conjunta cercana a 2,6 millones de toneladas anuales enfocada en productos largos (barras, varillas, perfiles, alambrón), destinados en su mayoría al sector de la construcción según argumenta Ruge (2023). Desde el punto de vista operativo, las siderúrgicas colombianas buscan ubicarse estratégicamente cerca de centros de consumo o de insumos, varias cuentan con plantas en regiones industrializadas (Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle del Cauca, Costa Caribe), lo que les permite atender mercados regionales con menores costos logísticos según La República (2021). Su integración vertical hacia atrás es limitada, pues Colombia tiene baja producción nacional de mineral de hierro, por lo que dependen mayormente del reciclaje de chatarra interna y de importaciones de palanquillas o planchones en algunos casos.

4.1.3 Descripción del producto o servicio

En Colombia, la producción siderúrgica nacional se ha concentrado históricamente en los aceros largos, los cuales representaban según la Agencia Nacional de Minería en el año 2024 alrededor del 70 u 80% del acero producido en el país; dado que son los más demandados por la

industria de la construcción y metalmecánica. Como su contraparte, Colombia carece de producción local de aceros planos, los cuales deben importarse para suplir las necesidades de sectores manufactureros como el automotor y la línea blanca. Ahora bien, esta realidad responde en parte al tipo de instalaciones siderúrgicas del país como se venía argumentando anteriormente en las generalidades de las organizaciones, pues se contrasta con economías latinoamericanas mayores (Brasil, México) que sí producen aceros planos en plantas integrales.

En cuanto a usos industriales, los aceros largos fabricados en Colombia, tales como varillas corrugadas, perfiles estructurales y alambrón, se destinan casi enteramente a la construcción civil (vivienda, edificaciones, obras viales y de infraestructura), aportando elementos de refuerzo y soporte estructural como es mencionado en el reporte de la Agencia Nacional de Minería (2024). Por otro lado, los aceros planos (principalmente importados) presentan alta calidad superficial y maleabilidad, adecuadas para procesos de estampado, corte y conformado en frío que son comunes en la fabricación de carrocerías, electrodomésticos y otros bienes industriales. En aplicaciones locales, las láminas galvanizadas y bobinas de acero plano se usan en manufacturas metálicas (tejados, cerramientos, envases) y también en construcción liviana, aprovechando su combinación de resistencia y facilidad de conformación.

Por último, las tuberías de acero ocupan un lugar importante en sectores de energía, construcción e industria, donde se produce ciertos tipos de tubos soldados (por ejemplo, tubería para conducción de agua, gas o para estructuras) a partir de planchones laminados, mientras que depende de importaciones para tubos sin costura de alta especificación utilizados en la industria petrolera. En cuanto a derivados trefilados (alambre, malla, clavos, etc.), la siderurgia nacional provee alambrón de calidad como materia prima, el cual es transformado por empresas downstream para abastecer la construcción (mallas electrosoldadas, clavos, alambres galvanizados

para tendidos eléctricos o cercas) y la industria manufacturera (resortes, cables de acero, etc.). Resumiendo lo planteado, los productos siderúrgicos fabricados en Colombia, desde los aceros largos estructurales hasta los derivados alambrados, se orientan principalmente a satisfacer las necesidades de la construcción y de ciertas industrias básicas.

Aunque en otro sentido los aceros planos de uso más especializado son mayormente importados, todo ello en línea con las clasificaciones y tendencias documentadas por la literatura reciente sobre la siderurgia latinoamericana.

4.2 Marco teórico

4.2.1 Lean Manufacturing

El Lean Manufacturing (manufactura esbelta) se refiere a una filosofía de gestión de operaciones orientada a la eliminación de desperdicios y la maximización de valor. Como describe Cuggia et al. (2020) el término “manufactura esbelta” fue introducido a inicios de la década de 1990 por Womack et al. (1990) tras estudios comparativos de prácticas de producción a nivel mundial. Sin embargo, sus orígenes se remontan a la primera mitad del siglo XX en la industria automotriz, particularmente al Sistema de Producción Toyota, donde se sentaron las bases de la producción en masa eficiente y de donde provino la mayoría de las metodologías complementarias a la necesidad productiva de Toyota.

Esta filosofía ganó reconocimiento global al demostrarse aplicable en diversas industrias más allá de la automotriz debido a que, Lean Manufacturing propone un proceso de mejora continua enfocado en identificar y eliminar todas aquellas actividades que no agregan valor al producto o servicio (NVA), es decir, los desperdicios o excesos (también conocidos como

desperdicios). Desde el punto de valor agregado, cualquier actividad que consume recursos sin aportar valor al cliente es considerada un desperdicio a eliminar. Siguiendo el hilo narrativo, Cuggia et al. (2020) refiere que la manufactura esbelta se compone como un proceso sistemático para identificar y eliminar desperdicios de forma continua.

Desde una perspectiva gerencial, Lean implica un esfuerzo incansable por hacer la empresa más efectiva, innovadora y eficiente en todas sus operaciones. En el contexto operativo, los objetivos fundamentales de esta filosofía incluyen producir con cero defectos, reducir costos, entregar solo lo que el cliente necesita justo a tiempo, evitar inventarios excesivos y mejorar continuamente los procesos eliminando desperdicios en todas sus formas. Para lograr estos fines, Lean Manufacturing se apoya en una serie de herramientas y técnicas probadas.

Por ejemplo, la producción Just In Time (JIT) busca minimizar inventarios produciendo solo lo necesario en el momento preciso, mientras que la técnica SMED reduce drásticamente los tiempos de preparación o cambio de máquina. Otras herramientas comunes son las 5S (orientadas a la organización, limpieza y estandarización en el puesto de trabajo), el TPM (Total Productive Maintenance, mantenimiento productivo total) para asegurar la confiabilidad de las máquinas, y Heijunka para nivelar la producción evitando picos o cuellos de botella. El fin de la aplicación de cada una radica en que contribuyen a eliminar distintos tipos de desperdicios (tiempos de espera, sobreproducción, defectos, transporte innecesario, inventario inactivo, movimientos inútiles y sobre procesamiento) y a optimizar el flujo de valor a lo largo del proceso productivo.

Históricamente, la manufactura esbelta evolucionó a partir de las prácticas de Toyota de la posguerra, integrando conceptos de mejora continua (kaizen), producción pull basada en la demanda real, y participación de los trabajadores en la identificación de mejoras. Como establece Cuggia et al. (2020) haciendo hincapié en las memorias de esta filosofía, con el tiempo los

principios lean se consolidaron como un estándar de excelencia operativa a nivel mundial; enfatizando siempre la reducción sistemática de cualquier desperdicio que no aporte valor al cliente. Su evolución ha ido acompañada de desarrollos en métodos cuantitativos y gerenciales (por ejemplo, estudio de tiempos, teoría de restricciones, manufactura de clase mundial), manteniendo como núcleo la simplicidad, flexibilidad y enfoque al cliente que caracterizan al enfoque lean.

4.2.2 Six Sigma: fundamentos, DMAIC y herramientas estadísticas

Six Sigma es una metodología de mejora de la calidad enfocada en la reducción de la variabilidad de los procesos y la eliminación de defectos, similar a la metodología Lean. Contrastando el orden analítico y teórico que describe Cortez et al. (2021) el nombre Six Sigma proviene del uso de la letra griega sigma (σ) para representar la desviación estándar en estadística, en otras palabras, alcanzar “seis sigmas” de rendimiento implica una variabilidad tan baja que el proceso produce apenas alrededor de 3.4 defectos por cada millón de oportunidades (DPMO), lo que equivale a un 99.9997% de unidades libres de defecto. Esta ambiciosa meta de calidad fue establecida por primera vez en la década de 1980 en Motorola, donde el ingeniero Bill Smith, con el apoyo del entonces CEO Bob Galvin, desarrolló un programa sistemático para reducir drásticamente la variación de los procesos y así lograr el nivel de 6σ (3.4 defectos por millón) en el desempeño.

En particular, Six Sigma emplea un ciclo de mejora en cinco fases conocido por sus siglas DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control), que guía la implementación de proyectos de mejora de principio a fin. En retrospectiva, cada proyecto Six Sigma comienza definiendo claramente el problema y las métricas de desempeño, midiendo el estado actual, analizando

estadísticamente las causas de los problemas, implementando mejoras y estableciendo controles para mantener los logros. Con el fin de dar sustento a las etapas descritas anteriormente, Six Sigma dentro de la teoría se apoya en la estadística para entender el comportamiento del proceso y fundamentar las decisiones de mejora con datos objetivos.

Ahora bien, entre las técnicas más utilizadas se incluyen los gráficos de control (para monitorear la estabilidad del proceso en la fase de Control, conocido en ingeniería industrial como cartas de control), los estudios de capacidad de proceso (que evalúan si un proceso cumple con las especificaciones del cliente), el análisis de modo y efecto de falla (FMEA) para anticipar problemas, además de los ya mencionados diagramas de Pareto e Ishikawa para priorización y análisis causal. Como a su vez, herramientas de la calidad total como las 7 herramientas básicas (hojas de verificación, histogramas, diagramas de dispersión, etc.) forman parte del arsenal Six Sigma.

4.2.3 Integración Lean Six Sigma

Englobando las dos teorías descritas anteriormente, tanto Lean Manufacturing como Six Sigma han justificado ser enfoques muy eficaces por separado; sin embargo, poseen fortalezas complementarias que dieron lugar a su integración en la metodología conocida como Lean Six Sigma (LSS). En términos conceptuales, Carrillo et al. (2022) contrasta que LSS es una filosofía y metodología de mejora continua que une la eliminación de desperdicios propia de Lean Manufacturing con las técnicas avanzadas de control de calidad de Six Sigma, donde el propósito es mejorar los procesos de manera integral, atacando tanto las actividades sin valor agregado (fuente de ineficiencia) como la variabilidad y las causas raíz de defectos (fuente de mala calidad).

Ahora bien, la integración entre Lean y Six Sigma se fundamenta en elementos comunes, como la satisfacción del cliente, la mejora continua y la toma de decisiones basada en datos. Lean contribuye principalmente con la rapidez y la simplicidad en los procesos, al facilitar la identificación del flujo de valor y la eliminación de desperdicios en cada etapa. Por su parte, Six Sigma aporta un enfoque más analítico, mediante herramientas que permiten medir, analizar y reducir la variabilidad en parámetros críticos de calidad.

Desde el punto de vista metodológico, Lean Six Sigma suele apoyarse en el ciclo DMAIC de Six Sigma como estructura principal para el desarrollo de los proyectos. No obstante, en cada una de sus fases incorpora herramientas y principios Lean, lo que permite combinar el análisis estadístico con la mejora del flujo, la reducción de desperdicios y la optimización del desempeño operativo.

Así, por ejemplo, dentro del estudio realizado por Marín-Calderón et al. (2023) la teoría aplicada desde una fase de Lean Six Sigma se nota proyectada en la fases, donde, en la fase Definir de un proyecto LSS se podrían utilizar mapas de flujo de valor (Value Stream Mapping) para visualizar el proceso y detectar actividades sin valor; en la fase Medir se aplicarían métricas tanto de desempeño (tiempo de ciclo, índices de desperdicio) como de calidad (capabilidad del proceso y/o nivel sigma); en Analizar se complementa el análisis estadístico de datos con observaciones de campo gembu (más conocido como “el lugar real”) para identificar cuellos de botella o fuentes de desperdicio; en Mejorar se implementan soluciones que pueden incluir eventos Kaizen, 5S, redistribución de planta, poka-yoke (dispositivos a prueba de errores), junto con ajustes de parámetros basados en análisis Six Sigma; y en Controlar se establecen no solo cartas de control sino también auditorías de procesos, estandarización de trabajo y seguimiento de indicadores de productividad.

4.3 Marco conceptual

A continuación, se definen los conceptos clave que sustentan el análisis de la implementación de Lean Six Sigma en empresas manufactureras del sector del acero, necesarios para comprender el marco lógico del proyecto.

4.3.1 Industria siderúrgica

La industria siderúrgica comprende el conjunto de actividades dedicadas a la producción y transformación del acero. Desde la obtención de arrabio y acero crudo hasta la fabricación de productos laminados largos y planos que abastecen sectores como construcción, infraestructura, automoción y bienes de consumo (World Steel Association, 2023).

4.3.2 Empresa manufacturera

Una empresa manufacturera es aquella organización que transforma materias primas en productos intermedios o finales mediante procesos físicos y/o químicos estandarizados, apoyados en recursos humanos, tecnológicos y de gestión, con el propósito de generar valor económico y satisfacer requerimientos del mercado (Centro Europeo de Postgrado [CEUPE], s. f.).

4.3.3 Manufactura del acero

La manufactura del acero integra etapas como la preparación de materias primas, la producción de acero crudo en hornos de oxígeno básico o hornos eléctricos de arco, y el colado y laminado en productos largos (barras, alambrón, perfiles) y planos (chapas, bobinas), sometidos posteriormente a tratamientos térmicos o mecánicos según las especificaciones del cliente (World Steel Association, 2023).

4.3.4 *Sistema de gestión de la calidad*

Un sistema de gestión de la calidad es el conjunto de elementos interrelacionados que establece políticas, objetivos y procesos para dirigir y controlar una organización en lo relativo a la calidad, asegurando la capacidad para proveer productos y servicios que cumplan requisitos del cliente y requisitos legales aplicables (ISO, 2015a).

4.3.5 *Sistema de gestión ambiental*

Un sistema de gestión ambiental es la parte del sistema de gestión de una organización empleada para desarrollar e implementar su política ambiental y gestionar sus aspectos ambientales, con el fin de mejorar su desempeño y cumplir los requisitos legales y otros requisitos voluntariamente adoptados (ISO, 2015b).

4.3.6 *Manufactura esbelta (Lean Manufacturing)*

La manufactura esbelta es una filosofía de gestión de operaciones orientada a maximizar el valor para el cliente mediante la identificación y eliminación sistemática de actividades que no agregan valor en los flujos de materiales e información, apoyándose en herramientas como mapeo de la cadena de valor, 5S, SMED y producción just in time (Cuggia-Jiménez et al. 2020).

4.3.7 *Desperdicio y valor para el cliente*

En el enfoque Lean se entiende por desperdicio (muda) toda actividad que consume recursos sin aportar valor desde la perspectiva del cliente (esperas, reprocesos, inventarios excesivos, movimientos innecesarios, sobreproducción, defectos, transporte y subutilización del talento). La gestión esbelta busca rediseñar los procesos de manera que el flujo se oriente a entregar

únicamente aquellas características del producto o servicio por las que el cliente está dispuesto a pagar (Cuggia-Jiménez et al., 2020; ISO, 2015a).

4.3.8 Six Sigma

Six Sigma es una metodología de mejora de la calidad basada en el uso intensivo de datos y herramientas estadísticas para reducir la variabilidad de los procesos y disminuir los defectos hasta niveles muy bajos (cerca de 3,4 defectos por millón de oportunidades).

Se apoya en equipos multifuncionales, en la estandarización de métodos de medición y en el ciclo estructurado DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) (Cortez Merjil et al. 2021; ISO, 2011a).

4.3.9 Lean Six Sigma (LSS)

Lean Six Sigma integra los principios de la manufactura esbelta y Six Sigma en un enfoque único de mejora continua que busca, simultáneamente, eliminar desperdicios y reducir la variabilidad para mejorar la calidad, disminuir costos y acortar tiempos de ciclo. En el contexto industrial, LSS se ha consolidado como una estrategia clave para incrementar la competitividad y apoyar iniciativas de sostenibilidad y economía circular (Carrillo- Landazábal et al. 2022; Otero Bracamonte & Castañeda, 2024).

4.3.10 Metodología DMAIC

DMAIC es el ciclo estructurado de mejora de Six Sigma y Lean Six Sigma, que comprende cinco fases: Definir (problema, alcance y clientes), Medir (recolección de datos y desempeño de línea base), Analizar (identificación de causas raíz), Mejorar (diseño e implementación de

soluciones) y Controlar (estandarización y monitoreo del proceso mejorado). Esta secuencia se recoge explícitamente en las normas ISO 13053-1 y 13053-2 como marco de referencia internacional para proyectos Six Sigma (ISO, 2011a, 2011b; Cortez Merjil et al. 2021).

4.3.11 Variabilidad del proceso

La variabilidad del proceso es el conjunto de fluctuaciones naturales y asignables en las salidas de un proceso productivo, generadas por causas comunes (propias del sistema) o especiales (cambios en materiales, equipos, métodos o personas). El análisis de variabilidad permite determinar si el proceso es estable y si su dispersión es compatible con las tolerancias de ingeniería especificadas (Chaviano-Tovar et al. 2021).

4.3.12 Capacidad de proceso y nivel sigma

La capacidad de proceso expresa cuantitativamente la relación entre la variabilidad real del proceso y los límites de especificación del cliente, mediante índices como Cp y Cpk. Un proceso es capaz cuando su dispersión natural se mantiene dentro de los límites de tolerancia, lo que se traduce en menores tasas de no conformidad y, en enfoques Six Sigma, en niveles sigma más altos de desempeño (Chaviano-Tovar et al. 2021).

4.3.13 Mejora continua

La mejora continua es la parte de la gestión de la calidad orientada a incrementar de manera sistemática la capacidad de la organización para cumplir requisitos y elevar el desempeño de sus procesos, mediante ciclos iterativos de planificación, ejecución, verificación y actuación (PHVA) y el uso de datos objetivos para la toma de decisiones (ISO, 2015a, 2015c).

4.3.14 Producción más limpia y sostenibilidad en la industria del acero

La producción más limpia se refiere a la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada a procesos, productos y servicios, con el fin de incrementar la ecoeficiencia y reducir riesgos para las personas y el ambiente. En la industria del acero, este enfoque se concreta en la optimización de consumos energéticos, el aprovechamiento de chatarra, la reducción de emisiones y la alineación con políticas nacionales de producción y consumo sostenibles (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, s. f.; World Steel Association, 2023).

4.3.15 Aguas abajo (Downstream)

El segmento *downstream* o aguas abajo comprende la etapa en la que el producto es sometido a procesos posteriores de transformación, acondicionamiento, distribución y entrega al cliente final. En el caso del acero, esta fase resulta estratégica porque permite adaptar el material a necesidades específicas de uso y gestionar la logística de una cadena de suministro compleja, conectando la producción de las acerías con los requerimientos de fabricantes, constructoras y demás usuarios industriales. Desde esta perspectiva, el análisis del sector *downstream* debe considerar la relación entre los diferentes actores de la cadena de suministro, incluyendo proveedores, fabricantes y clientes, debido a que dicha interacción incide en la configuración de los procesos de negocio, la colaboración operativa y el desempeño de la cadena (Lestari et al., 2020).

4.3.16 Justo a tiempo “Just in time”

Just In Time (JIT) es un método de gestión de inventario que busca un stock casi cero, en el que los suministros llegan exactamente cuándo se necesitan para producción, reduciendo costes de almacenamiento y desperdicio. (Slimstock, 2025).

4.4 Marco legal

La implementación de la metodología Lean Six Sigma en empresas industriales, incluyendo el sector siderúrgico, se enmarca en ciertos estándares y regulaciones tanto a nivel nacional (Colombia) como internacional. Es preciso aclarar que si bien Lean Six Sigma en sí no es objeto de una ley o norma técnica específica de obligatorio cumplimiento; su adopción suele articularse con los sistemas de gestión de calidad y ambiental existentes, así como con políticas públicas que incentivan la eficiencia productiva y la competitividad sostenible. Con base en lo anterior, el apartado siguiente presenta de forma organizada los referentes normativos que guardan relación con la implementación de Lean Six Sigma, considerando el ámbito ambiental, el marco general colombiano, los sistemas de gestión de calidad y los lineamientos internacionales.

4.4.1 Normativa ambiental y de producción más limpia (NTC ISO 14001 y Política PML)

Dada la naturaleza del marco normativo ambiental, resulta conveniente destacar la postura del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (s.f.) donde concierta que las siderúrgicas en Colombia operan bajo regulaciones ambientales relacionadas con permisos de emisiones atmosféricas, vertimientos, manejo de residuos peligrosos y demás obligaciones aplicables a sus procesos productivos. En consecuencia, empresas del sector han implementado Sistemas de Gestión Ambiental conforme a la NTC-ISO 14001:2015, donde esta misma proporciona una guía para que las organizaciones estructuren su gestión ambiental mediante la definición de políticas,

metas y mecanismos de control. El resultado conlleva a facilitar la identificación y reducción de los impactos generados por las actividades productivas, promoviendo a su vez el mejoramiento continuo del desempeño ambiental.

En el marco colombiano, la Política Nacional de Producción Más Limpia fue establecida en 1997 como una estrategia preventiva complementaria a los instrumentos regulatorios, dirigida a mejorar el desempeño ambiental de los sectores productivos. Posteriormente, esta política fue actualizada e integrada en la Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible (PNPCS), formulada por el entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, con el propósito de orientar el cambio de los patrones de producción y consumo hacia la sostenibilidad ambiental, la competitividad empresarial y la ecoeficiencia.

Los principios de esta política son la prevención de la contaminación en la fuente, el mejoramiento continuo ambiental y la producción ecoeficiente, todos los cuales convergen con prácticas de Lean Six Sigma orientadas a minimizar residuos, retrabajos y variabilidad en el uso de insumos. Ahora bien, en desarrollo de la PML se han establecido acuerdos voluntarios sectoriales y requisitos regulatorios. Para ser específicos, el Decreto 1299 de 2008 en Colombia exige a las empresas con licencias ambientales la implantación de Sistemas de Gestión Ambiental bajo principios de mejora continua, y la Ley 697 de 2001 impulsa la eficiencia energética en la industria (reducir desperdicio de energía, algo muy pertinente en siderurgia por los altos consumos eléctricos y térmicos).

Dentro del contexto normativo, una acería que implemente Lean Six Sigma estará mejor posicionada para cumplir con estas normativas, ya que la reducción de desperdicios materiales (escorias, subproductos) y el aumento de eficiencia energética derivadas de LSS contribuyen a las

metas de producción más limpia y de reducción de emisiones que exige el marco legal ambiental colombiano.

4.4.2 Normas de gestión de la calidad (NTC ISO 9001)

La mayoría de las empresas manufactureras colombianas, incluyendo las siderúrgicas, cuentan con un Sistema de Gestión de la Calidad certificado bajo la norma ISO 9001:2015 (versión vigente), adoptada en Colombia como NTC-ISO 9001. Esta norma internacional establece los requisitos para implementar un enfoque basado en procesos, con fuerte orientación hacia la satisfacción del cliente, la gestión de riesgos y la mejora continua de los procesos. Su gemela base, la ISO 9001, provee un marco de buenas prácticas que complementa e impulsa la aplicación de Lean Six Sigma como exigir monitorear indicadores de desempeño, controlar la documentación de los procesos, y promover acciones correctivas y preventivas ante las no conformidades, todo lo cual es muy consistente con la filosofía LSS.

De hecho, tanto ISO 9001 como Six Sigma comparten el objetivo de mejorar la calidad y la eficiencia operativa en la organización. En Colombia, el escenario particular de la implementación de Lean Six Sigma suele realizarse dentro del paraguas del sistema ISO 9001 existente, donde los proyectos LSS ayudan a cumplir con cláusulas de la norma como la mejora de procesos (cláusula 10) y el enfoque basado en evidencia (cláusula 9, evaluación del desempeño), y así mismo la certificación ISO da sustento y formalismo a los logros de LSS al integrarlos en la gestión organizacional.

4.4.3 Normas técnicas internacionales aplicables (ISO 13053 – Six Sigma)

Dentro de la perspectiva internacional, se han desarrollado estándares específicos que documentan las mejores prácticas de Six Sigma, los cuales sirven de referencia para organizaciones que implementan Lean Six Sigma. Primeramente, destaca la norma ISO 13053 (partes 1 y 2), publicada en 2011, titulada "Métodos cuantitativos en la mejora de procesos – Six Sigma", esta describe detalladamente la metodología DMAIC de Six Sigma, recomendando las prácticas óptimas en cada fase (Definir, Medir, Analizar, Mejorar, Controlar) para la ejecución de proyectos Six Sigma. Por otro lado, la norma ISO 13053-2:2011 recopila herramientas y técnicas estadísticas asociadas a Six Sigma (diagramas de Ishikawa, matriz de priorización, análisis de capacidad, DOE), donde articulado las normativas se logra un marco que proporciona una guía metodológica completa.

Ahora bien, aunque estas normas ISO no son de cumplimiento obligatorio; constituyen un marco normativo voluntario útil para alinear los programas Lean Six Sigma con estándares internacionales. Apuntando al impacto positivo en Colombia, las empresas siderúrgicas pueden apoyarse en la NTC-ISO 13053, o en sus posibles equivalentes adoptados por ICONTEC, para organizar sus proyectos de mejora, fortalecer la capacitación del personal y definir roles asociados a la metodología, como Green Belt y Black Belt. En el caso del acero, Lean Six Sigma también coadyuva al cumplimiento de otras normas técnicas y reglamentos sectoriales, en efecto, Colombia cuenta con reglamentos técnicos como la NTC 2289 (barras de acero para refuerzo de concreto) y códigos de construcción como la NSR-10 (Norma Sismo Resistente), que obligan a que el acero de construcción cumpla ciertos parámetros mecánicos y de proceso.

Es decir, al reducir la variabilidad y mejorar la capacidad de los procesos metalúrgicos, Lean Six Sigma ayuda a que las empresas mantengan sus indicadores de calidad dentro de las

tolerancias exigidas por dichas normas, evitando lotes no conformes y fortaleciendo la cultura de cumplimiento normativo. Hablando puntualmente, las siderúrgicas nacionales, enfatizan que el estricto cumplimiento de la normatividad (p. ej. garantizar que toda varilla produzca las resistencias mínimas requeridas por la NSR-10) es una de sus fortalezas competitivas argumentado por la Sociedad Colombiana de Arquitectos (2023).

4.5 Estado del arte

4.5.1 Implementación de Lean Six Sigma en el sector del acero

La temática relacionada con la idea central de esta implementación se basa en Lean Six Sigma (LSS), así como consolida Huang (2023) donde se referencia a (Tjahjono et al. 2010) es una metodología de mejora continua que combina los principios de la manufactura esbelta (Lean) con las técnicas de control de calidad estadístico de Seis Sigma, donde su objetivo es eliminar desperdicios y reducir la variabilidad en los procesos, mejorando a la vez la eficiencia y la calidad. En cuanto a la tendencia de la metodología, según Otero y Castañeda (2024) empresas siderúrgicas buscan responder a desafíos como cuellos de botella, defectos en productos terminados, desperdicio de materiales y costos energéticos elevados, con el fin de mantener la competitividad y la sostenibilidad de sus operaciones por medio de la implantación de LSS. Del mismo modo, Otero y Castañeda (2024) documentan un caso de éxito en una planta latinoamericana de acero galvanizado, donde la adopción de Lean Six Sigma revirtió problemas críticos de productividad, logrando disminuir desperdicios, eliminar tiempos improductivos y aliviar el cuello de botella identificado en la línea de galvanizado.

4.5.2 Casos de aplicación y herramientas utilizadas

Desde una perspectiva deductiva, la metodología DMAIC (Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar) es el marco estándar para proyectos Lean Six Sigma en la industria del acero, por lo tanto, en los casos documentados se observará la secuencia sistemática donde primero se definirán los problemas de calidad o productividad, posteriormente se medirán y analizarán las causas raíz, se implementarán mejoras específicas y finalmente se establecerán controles para sostener los logros. De manera comparativa, en el caso de la planta de acero galvanizado estudiada por Otero y Castañeda (2024), se llevó a cabo un mapeo de flujo de valor (Value Stream Mapping) para visualizar el proceso completo con el fin de detectar puntos críticos, seguido del uso de diagramas de Pareto y análisis de causa raíz para priorizar las causas de ineficiencia. En base a este diagnóstico y con ayuda de herramientas Lean como 5S, Kanban y tableros visuales de indicadores se implementaron mejoras en la sección de galvanizado del área con mayor restricción utilizando técnicas de análisis estadístico de variación, estudios R&R de sistemas de medición.

Desde una perspectiva inductiva, la aplicación de LSS en la industria del acero no solo se limita a procesos primarios de fundición o laminado también abarca etapas subsecuentes y productos derivados. En la literatura consultada, un estudio de caso en Perú (Barahona & Navarro, 2013) aplicó la metodología DMAIC para optimizar el proceso de galvanizado de alambre de acero, combinando técnicas Lean usando mapa de flujo de valor y eliminación de desperdicios, con el apoyo de análisis estadístico avanzado ANOVA y Diseño de Experimentos para ajustar parámetros críticos del baño de zinc. Con esta intervención se logró estandarizar el espesor de recubrimiento y reducir significativamente el consumo de zinc lo que se reflejó en la disminución de la tasa de productos fuera de especificación (no conformes).

Bajo la misma perspectiva, dando alcance desde el argumento por Calderón et al. 2023 en México, se realizó un estudio enfocado en la fabricación de paneles constructivos de poliestireno (industria relacionada al acero en su cadena de suministro) donde la metodología LSS permitió identificar variables de proceso clave y mejorar la confiabilidad del sistema de medición del 81% a 98%, antes de ejecutar un experimento factorial para atacar el defecto principal. Como derivación, se obtuvo una reducción del 66% en la tasa de defectos por millón (DPMO) tras tres meses de control, demostrando la efectividad de las herramientas Six Sigma complementadas con prácticas Lean en un entorno industrial. En todo caso, el efecto de referenciar y focalizar estos casos de aplicación se refiere a establecer y esquematizar el patrón metodológico común de Lean Six Sigma y como se implementa mediante equipos interdisciplinarios.

En términos generales, el esquema se fundamenta en el apoyo por la alta dirección, que busca seguir el enfoque deductivo del ciclo DMAIC apoyándose en un arsenal de herramientas clásicas (VSM, Pareto, Ishikawa, 5 ¿Por qué? control estadístico de proceso, etc.). Fundamentalmente, la selección de herramientas se adapta a la naturaleza del problema, por ejemplo, Pareto para priorizar defectos frecuentes, 5S para ordenar plantas y facilitar flujo, Kanban para nivelar la producción, análisis de capacidad para cuantificar variabilidad, o DOE para optimizar parámetros de procesos metalúrgicos. Esta flexibilidad, sumada al enfoque estructurado de DMAIC, ha permitido abordar con éxito problemas diversos en la manufactura del acero, desde reducir pérdidas de material costoso (como zinc o chatarra) hasta acortar ciclos de producción o estabilizar la calidad superficial del producto.

4.5.3 Vacíos actuales en la literatura y desafíos no abordados

Pese a los numerosos casos de éxito, haciendo un sondeo de la literatura académica, se identifica vacíos y desafíos pendientes en la implementación de Lean Six Sigma en la industria del acero. Un primer vacío señalado es la falta de estudios integrales y generalizables, podemos comprender entonces que la mayoría de las publicaciones corresponden a casos de estudio individuales o implementaciones puntuales, lo cual limita la extrapolación de resultados y el desarrollo de marcos teóricos unificados. Entonces bajo la premisa de que LSS tiende a estar fragmentada son pocos los estudios que integran plenamente los tres ejes: eficiencia, calidad y sostenibilidad en un mismo modelo.

Esta dispersión apunta a la necesidad de más revisiones sistemáticas y análisis en el contexto siderúrgico, así como validaciones empíricas multicaso que confirmen cuáles prácticas LSS funcionan mejor bajo distintas condiciones de planta (acería primaria vs. procesos de acabado). Por otro lado, existen desafíos de implementación bien documentados que representan brechas a superar para lograr resultados sostenibles con LSS en las acerías. Uno de los obstáculos recurrentes es la resistencia al cambio cultural dentro de las organizaciones industriales tradicionales.

Según Ghasemibojd et al. (2025) señalan que la falta de compromiso y apoyo constante por parte de la alta gerencia es una causal determinante en el fracaso de iniciativas Lean Six Sigma, con el objeto de que sin un liderazgo que promueva la cultura de mejora continua, es difícil alinear al personal operativo y de mando medio con las exigentes prácticas de LSS. De forma relacionada, la ausencia de capacitación adecuada y de desarrollo de competencias en herramientas estadísticas y enfoques Lean es otra barrera frecuente, especialmente en plantas donde el personal no está familiarizado con estas metodologías, este factor ha sido identificado desde el argumento de

Ghasemibojd et al. (2025) en tal sentido, se han reconocido limitantes tecnológicas y de infraestructura como los sistemas de información poco integrados que dificultan el análisis de datos en tiempo real o equipamiento antiguo que restringe la variabilidad reducible del proceso. Hablando ahora desde la fase preoperativa de la cadena de valor, Ghasemibojd et al. (2025) asemeja el sector manufacturero contrastando las barreras externas como falta de compromiso de proveedores, incertidumbre en la cadena de suministro y presiones regulatorias cambiantes, que pueden frenar o revertir los logros de LSS si no se gestionan adecuadamente.

En definitiva, desde la literatura más reciente se sugieren futuras líneas de investigación y acción donde comience a discutirse la integración de Lean Six Sigma con tecnologías de Industria 4.0, como analítica de Big Data, Internet de las Cosas e inteligencia artificial, con el fin de potenciar la capacidad de detección y respuesta rápida a problemas en tiempo real (Lean Six Sigma 4.0), y aunque esta propuesta resulta llamativa su aplicación en el sector del acero sigue siendo reducida, por lo que se genera una oportunidad de innovación tanto en el ámbito práctico como en el académico, además se plantea el reto de incorporar de manera más explícita los objetivos de desarrollo sostenible ambientales y sociales dentro de los proyectos LSS, avanzando hacia modelos GLSS que se adapten mejor a las exigencias de la industria pesada. Por lo tanto, la literatura indica que las empresas siderúrgicas deberían trabajar en el desarrollo de una cultura organizacional orientada a la excelencia operativa, porque no basta con alcanzar resultados inmediatos, de modo que Lean Six Sigma no sea entendido como un proyecto puntual sino como la cultura central de la empresa, un enfoque que guíe la forma de trabajar y de crecer mientras se consolidan prácticas que aseguren tanto la competitividad como la sostenibilidad a largo plazo.

5. Metodología

5.1 Enfoque y tipo de investigación

La investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto con alcance analítico y se considera cualitativa debido a que se centra en la revisión, interpretación y síntesis de información secundaria proveniente de publicaciones académicas, tesis, informes técnicos y documentos especializados. En el aspecto cuantitativo, se propone una metodología para clasificar los estudios relacionados al tema. Se trata de un estudio no experimental, debido a que no se implica manipulación de variables ni interviene directamente en procesos productivos del sector del acero; por el contrario, se limita al análisis de información previamente publicada. Asimismo, es analítica porque busca profundizar el estado de éxito de la implementación de Lean Six Sigma en empresas manufactureras del sector del acero, identificando enfoques, herramientas, resultados, limitaciones y vacíos presentes en la literatura.

5.2 Técnica de investigación y recolección de información

La técnica de investigación y recolección de información seleccionada es la revisión documental sistematizada, complementada con análisis documental y análisis de contenido.

La revisión documental sistematizada será empleada para identificar publicaciones científicas, tesis de posgrado, trabajos académicos e informes técnicos relacionados con la aplicación de Lean Six Sigma en casos de éxito en procesos manufactureros del acero. El análisis documental permitirá interpretar críticamente los textos seleccionados, evaluar su pertinencia y extraer información relevante según los objetivos de la investigación. Por su parte, el análisis de

contenido permitirá sistematizar categorías como metodología aplicada, herramientas Lean Six Sigma utilizadas, beneficios reportados, limitaciones, desafíos y resultados obtenidos.

5.3 Fuentes de información

Las fuentes principales estarán conformadas por publicaciones científicas, tesis de posgrado, trabajos académicos e informes técnicos y documentos académicos publicados en español e inglés durante el periodo 2020-2025. Las bases de datos previstas para la búsqueda serán Scopus, Web of Science, ScienceDirect, ResearchGate y Google Scholar, además de repositorios institucionales y fuentes académicas especializadas que aporten información pertinente sobre casos de éxito Lean Six Sigma, manufactura del acero, mejora continua, control de calidad y productividad industrial.

5.4 Estrategia de búsqueda y criterios de selección

La estrategia de búsqueda se construirá mediante ecuaciones formadas por palabras clave en español e inglés, tales como Lean Six Sigma, Six Sigma, Lean Manufacturing, steel industry, steel manufacturing, industria del acero, manufactura del acero, casos de éxito, continuous improvement, quality improvement, productivity y succes stories. Estas expresiones podrán combinarse mediante operadores booleanos para ampliar o restringir los resultados según la pertinencia de cada fuente.

Los criterios de inclusión definidos para la investigación abarcan publicaciones realizadas entre 2020 y 2026, redactadas en idioma español o inglés, y que cuenten con acceso al texto completos, de manera que se consideren artículos científicos, tesis de posgrado e informes técnicos que presenten de manera explícita la implementación o casos exitosos de la metodología Lean Six

Sigma en procesos de manufactura siderúrgica o sectores metalmecánicos relacionados. Por otro lado, se descartarán aquellos documentos que carezcan de rigor académico, presenten información fragmentada, sean duplicados o cuyo enfoque no esté directamente relacionado con la mejora de procesos industriales en la industria del acero.

5.5 Instrumento de organización y análisis

Para garantizar un manejo ordenado, trazable y sistemático de la información recopilada, se utilizará como instrumento principal una matriz de análisis y valoración documental, este recurso nos permitirá organizar, clasificar, comparar y evaluar los estudios seleccionados sobre la aplicación de Lean Six Sigma en empresas manufactureras del sector del acero, integrando de manera coherente los componentes cualitativos y cuantitativos de la investigación.

La matriz será diseñada para registrar información bibliográfica, metodológica, técnica y analítica de cada documento revisado. En una primera etapa se incluirán los datos de identificación de las fuentes, entre ellos autor, año de publicación, título, país o contexto del estudio, tipo de publicación y base de datos o repositorio de origen, después se incorporarán variables vinculadas con el contenido de los estudios, como el proceso productivo analizado, el problema abordado, el enfoque metodológico empleado, las herramientas Lean Six Sigma utilizadas, las fases DMAIC desarrolladas, los indicadores de mejoras reportados, los beneficios alcanzados, las limitaciones identificadas y los aportes sugeridos para futuras investigaciones.

Del mismo modo, la matriz se empleará para hacer una clasificación cualitativa, tomando en cuenta categorías como el enfoque de implementación, las herramientas empleadas, el área del proceso intervenida, los resultados obtenidos y las barreras encontradas, lo que permitió reconocer

patrones comunes, tendencias metodológicas, vacíos de conocimiento y diferencias entre los casos analizados.

Asimismo, el instrumento incluirá un componente de valoración cuantitativa basado en los criterios anteriormente concretados, con el propósito de calcular la pertinencia y la calidad de los documentos seleccionados. Para esto se aplicará una escala de 1 a 5, con la cual se evaluarán aspectos como la relevancia temática, la claridad metodológica, la relación directa con el sector del acero, la evidencia de resultados, la aplicabilidad de Lean Six Sigma y el aporte al cumplimiento de los objetivos. Esta valoración no busca medir de manera estadística la efectividad de Lean Six Sigma, sino apoyar el proceso de selección, jerarquización e interpretación de las fuentes documentales revisadas.

5.6 Procedimiento metodológico

El procedimiento metodológico se desarrollará en cuatro fases articuladas con el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación, con ello, permitirá avanzar desde la identificación de la literatura científica hasta la interpretación de los hallazgos relacionados con la implementación de Lean Six Sigma en empresas manufactureras del sector del acero.

En la *primera fase*, correspondiente a la búsqueda e identificación de fuentes, se realizará una revisión documental sistematizada de publicaciones científicas, tesis de posgrado, trabajos académicos e informes técnicos relacionados con Lean Six Sigma, industria siderúrgica, manufactura del acero, mejora continua, calidad, productividad y sostenibilidad industrial. Para ello, se emplearán ecuaciones de búsqueda previamente definidas, así como criterios de inclusión y exclusión que permitirán delimitar los documentos pertinentes para el estudio.

En la *segunda fase*, corresponde a la clasificación de los estudios, donde se relacionará los documentos seleccionados en la matriz de análisis y valoración documental. Se requiere con ello significar que la información recopilada se organizará de manera que permita reconocer las características generales de cada documento junto con su aporte al análisis de Lean Six Sigma en el sector del acero. Para ello, se considerarán variables bibliográficas, metodológicas y temáticas, entre ellas el año de publicación, el país, el tipo de estudio, el proceso productivo analizado, las herramientas aplicadas, los beneficios obtenidos y las limitaciones descritas.

En la *tercera fase*, se llevará a cabo el análisis comparativo de los documentos previamente clasificados con base en la matriz contrastando los enfoques metodológicos, las herramientas Lean Six Sigma aplicadas, las fases DMAIC desarrolladas, los indicadores de desempeño reportados y los principales resultados obtenidos. A partir de ello, será posible identificar cuáles herramientas aparecen con mayor frecuencia y con qué variaciones se presentan entre los casos de aplicación llevando a un entendido de las tendencias que se observen en la literatura consultada. Asimismo, este análisis permitirá reconocer posibles vínculos entre el tipo de intervención realizada y los beneficios alcanzados.

En la *cuarta fase*, se centrará en interpretar los resultados obtenidos para integrar los resultados del análisis cualitativo con los elementos cuantitativos derivados de la valoración documental. A partir de esta lectura conjunta, será posible valorar con mayor claridad el alcance de Lean Six Sigma en el sector del acero, considerando sus beneficios y contrastando sus principales limitaciones sobre las condiciones que pueden favorecer o restringir su aplicación.

5.7 Rigor metodológico

El rigor metodológico de la investigación se garantizará mediante la aplicación sistemática de criterios definidos para la búsqueda, selección, clasificación, valoración y análisis de la información. Para asegurar una revisión ordenada, las fuentes de consulta delimitadas anteriormente conllevan un proceso sobre la base de las palabras clave y ecuaciones de búsqueda que están sujetas bajo los parámetros de inclusión y exclusión que definen en la selección de documentos que posteriormente van a establecerse bajo las categorías de análisis.

La utilización del instrumento de la matriz de análisis y valoración documental constituye en conjunto un papel central dentro del proceso y de trazabilidad. El hecho constituye un efecto de mantener la trazabilidad de la información con el fin de reducir la dispersión de los datos y facilitar la comparación entre los estudios seleccionados.

Desde esta perspectiva, resulta lógico fundamentar la coherencia del estudio bajo el diseño desde la estructura en la que cada objetivo específico se vincula directamente con una fase del análisis. En todo caso, la clasificación inicial de la literatura permitirá responder al objetivo relacionado con la identificación de los estudios disponibles. Luego, el contraste entre herramientas, enfoques metodológicos y fases de aplicación aportará al desarrollo del segundo objetivo. Finalmente, la interpretación de los resultados, beneficios y limitaciones permitirá dar cumplimiento al tercer objetivo, orientado a evaluar los hallazgos de la literatura revisada.

En relación con el bloque de análisis, el componente cualitativo se apoyará en el análisis de contenido desde la interpretación de aportes y limitaciones encontrados en los documentos seleccionados. El componente cuantitativo por su parte profiere en aclarar a partir de la valoración documental y del análisis descriptivo de frecuencias, tendencias y niveles de pertinencia de las fuentes revisadas.

Finalmente, el rigor metodológico se refleja en la transparencia del procedimiento, la coherencia entre las fases, la aplicación uniforme de los criterios de análisis y la fundamentación de las conclusiones, sustentadas en los documentos efectivamente revisados.

6. Resultados

6.1 Desarrollo del Primer Objetivo Específico

El primer objetivo específico de la monografía consistió en clasificar los estudios que abordaron la aplicación de Lean Six Sigma en la industria del acero a partir de la literatura revisada. Para dar respuesta a este objetivo, se organizó el corpus documental final en una matriz de análisis y valoración documental, de acuerdo con los criterios previstos

El proceso de clasificación se realizó después de una búsqueda inicial basada en ecuaciones construidas con palabras clave en español e inglés relacionadas con Lean Six Sigma, Six Sigma, Lean Manufacturing, industria del acero, steel industry, steel manufacturing, mejora continua, productividad, calidad y casos de éxito. A partir de las bases IEEE, Scopus, ResearchGate, Google Scholar, ScienceDirect y Web of Science se reunieron 547 documentos iniciales. Posteriormente, el corpus entregado para análisis quedó conformado por 17 archivos accesibles, los cuales fueron revisados, depurados y clasificados de acuerdo con su relación con el sector acero, la manufactura metalmecánica y la mejora continua.

La clasificación no trató los documentos como evidencia homogénea. Por el contrario, se diferenciaron los estudios con relación directa con la industria del acero o la metalurgia, los documentos con aporte metodológico o tecnológico transferible y las fuentes con baja relación sectorial directa. Esta decisión permitió conservar la trazabilidad de la búsqueda y, al mismo

tiempo, evitar que documentos externos al sector acero fueran interpretados como evidencia directa de implementación Lean Six Sigma en procesos siderúrgicos.

6.1.1 Criterios de clasificación documental

La matriz de clasificación se estructuró con dos componentes. El primero fue cualitativo y permitió registrar título, autores, año, base de datos, tipo de fuente, contexto, proceso intervenido, enfoque metodológico, herramientas de mejora, resultados y limitaciones. El segundo fue cuantitativo y permitió valorar cada documento en una escala de 1 a 5 según seis criterios: pertinencia temática, claridad metodológica, relación con el sector acero, evidencia de resultados, aplicabilidad Lean Six Sigma y contribución al primer objetivo.

Con base en los criterios establecidos, los documentos fueron organizados según los enfoques predominantes identificados. La clasificación mostró que el corpus no se limitó a un único tipo de intervención, sino que integró estudios basados en DMAIC y Six Sigma, aplicaciones de Lean Manufacturing, modelos de mejora con métodos avanzados, trabajos orientados a la digitalización y al control inteligente, análisis de factores organizacionales y referencias metodológicas transferibles desde otros sectores.

Tabla 1. Clasificación del corpus documental por enfoque predominante

<i>Enfoque predominante</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Documentos representativos</i>	<i>Aporte al primer objetivo</i>
DMAIC / Six Sigma	3	Koul et al. (2021); Peruchi et al. (2020)	Permitió clasificar intervenciones con estructura de medición, análisis causal, mejora y control.
DMAIC / Six Sigma con métodos avanzados	1	Duc et al. (2023)	Evidenció la integración de DMAIC con métodos de priorización multicriterio y análisis de alternativas.
Lean Manufacturing / VSM / TPM / SMED	3	Rathi et al. (2024); Furman y Małysa (2021); Salwin et al. (2021)	Agrupó herramientas orientadas a reducción de desperdicios, flujo, tiempos de cambio, disponibilidad y productividad.

<i>Enfoque predominante</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Documentos representativos</i>	<i>Aporte al primer objetivo</i>
Integración LSS con métodos avanzados	1	Eryarsoy et al. (2023)	Amplió el análisis hacia decisiones logísticas, localización y sostenibilidad.
Digitalización y control inteligente	4	Gajdzik et al. (2025); Panchal et al. (2024); Deng et al. (2022); Deng et al. (2023)	Complementó la mejora continua mediante datos, inteligencia de negocios, gemelos digitales y control automático.
Factores organizacionales	2	Alnadi y McLaughlin (2021); Porras Guzmán y Sierra-Liñan (2025)	Mostró que liderazgo, cultura, estandarización y participación del operador condicionaron la sostenibilidad de la mejora.
Evidencia metodológica transferible	3	Gültaş (2024); Rodríguez Noe y Rodríguez Risco (2024); Chancasanampa Narvaez et al. (2026)	Se conservó por trazabilidad, aunque su relación con el acero fue indirecta.

6.1.2 Hallazgos principales de la clasificación

El primer hallazgo evidenció que los enfoques DMAIC y Six Sigma continúan siendo relevantes en la clasificación de estudios orientados a la mejora de procesos industriales, especialmente asociados con calidad, capacidad de proceso y reducción de defectos. En este grupo se encuentran los trabajos de Koul et al. (2021), y Peruchi et al. (2020), los cuales emplearon herramientas como Pareto, Ishikawa, FMEA, análisis de capacidad, estadística multivariada y control de procesos. Dichos instrumentos facilitaron la vinculación entre los problemas operativos, sus causas raíz y las métricas de desempeño.

El segundo hallazgo mostró que Lean Manufacturing aportó un conjunto de herramientas prácticas para abordar desperdicios, flujo de materiales, tiempos de cambio, disponibilidad y productividad. En esta línea, los estudios de Rathi et al. (2024), Furman y Malysa (2021) y Salwin et al. (2021) permitieron reconocer intervenciones asociadas con SMED, TPM, VSM, Kaizen, TWI y la identificación de desperdicios donde resultara enfático denotar que estas aplicaciones concretas en escenarios como la laminación, la fabricación de tubos de acero y la organización de

la producción metalúrgica implico la reducción de tiempos asociado desde la estandarización y el control del flujo productivo bajo un papel céntrico.

Junto con estas aplicaciones más tradicionales, también se identificaron estudios que ampliaron la mirada sobre Lean Six Sigma hacia enfoques apoyados en métodos de decisión, logística y transformación digital. El trabajo de Eryarsoy et al. (2023), integró la estructura DMAIC con FAHP y DOE para analizar problemas relacionados con el transporte excesivo en manufactura. De manera complementaria, los estudios de Panchal et al. (2024), Gajdzik et al. (2025), Deng et al. (2022) y Deng et al. (2023), aunque no se ubicaron estrictamente dentro de Lean Six Sigma, aportaron elementos útiles para comprender la relación entre mejora continua y como la integración de datos dentro del modelo de inteligencia de negocios y la Industria 4.0/5.0 se considerar resultante dentro de gemelos digitales y sistemas de control inteligente en procesos vinculados con el acero y la metalmecánica.

Otro aspecto relevante fue que la mejora continua no apareció únicamente asociada al uso de herramientas técnicas, bajo esta proposición, los documentos de Alnadi y McLaughlin (2021) y Porras Guzmán y Sierra-Liñan (2025) permitieron evidenciar que factores como el liderazgo, la cultura organizacional coligada con la comunicación interna acompañado con la estandarización y la participación de los operadores; influyeron en la sostenibilidad de las intervenciones.

Tabla 2. *Síntesis de los documentos clasificados en la matriz*

<i>Autor(es) y año</i>	<i>Título</i>	<i>Nivel de relación</i>	<i>Enfoque predominante</i>	<i>Aporte principal</i>
Duc et al. (2023)	Application of Fuzzy TOPSIS and Harmonic Mitigation Measurement on Lean Six Sigma: A Case Study in Smart Factory	Media	DMAIC / Six Sigma con métodos avanzados	Aporta evidencia cuantitativa sobre DMAIC híbrido y selección multicriterio de alternativas.

<i>Autor(es) y año</i>	<i>Título</i>	<i>Nivel de relación</i>	<i>Enfoque predominante</i>	<i>Aporte principal</i>
Koul et al. (2021)	Reductions in the Prime Stock for Sales Generation in Steel Industry: A Lean Approach using DMAIC Tools	Alta	DMAIC / Six Sigma	Permite clasificar un caso directo de acero con estructura DMAIC y priorización de causas críticas.
Gültaş (2024)	Enhancing production processes in the medical industry: A Six Sigma case study with Industry 4.0 integration	Baja	Evidencia metodológica transferible	Aporta criterios metodológicos sobre Six Sigma e Industria 4.0, útiles de forma indirecta.
Rathi et al. (2024)	Implementation of Lean Manufacturing Methods to Improve Rolling Mill Productivity	Alta	Lean Manufacturing / VSM / TPM / SMED	Evidencia directa de mejora en rolling mill mediante Lean Manufacturing y métricas operativas.
Rodriguez Noe y Rodríguez Risco (2024)	Enhancing Profitability in a Peruvian Construction Company: A Lean Manufacturing and Human Resources Approach	Baja	Evidencia metodológica transferible	Se registró por trazabilidad del corpus, con aporte metodológico indirecto.
Furman y Małysa (2021)	The Use of Lean Manufacturing (LM) Tools in the Field of Production Organization in the Metallurgical Industry	Alta	Lean Manufacturing / VSM / TPM / SMED	Ayuda a clasificar herramientas Lean transferibles a la industria metalúrgica y del acero.
Salwin et al. (2021)	Using Value Stream Mapping to Eliminate Waste: A Case Study of a Steel Pipe Manufacturer	Alta	Lean Manufacturing / VSM / TPM / SMED	Aporta evidencia directa de reducción de desperdicios en manufactura de acero mediante VSM.
Gajdzik et al. (2025)	Sustainability and Smart Manufacturing: A Multi-Perspective Approach Towards Sustainable Development	Media	Digitalización y control inteligente	Complementa la lectura LSS con tendencias de digitalización y sostenibilidad en el sector acero.
Chancasanampa Narvaez et al. (2026)	Six Sigma Based Management Approach to Minimize Material Losses in Building Construction	Baja	Evidencia metodológica transferible	Aporta una referencia metodológica sobre Six Sigma y desperdicios, útil de forma transferible.
Alnadi y McLaughlin (2021)	Critical Success Factors of Lean Six Sigma from Leaders' Perspective	Media	Factores organizacionales	Permite interpretar factores no técnicos necesarios para sostener la mejora en empresas siderúrgicas.
Eryarsoy et al. (2023)	A Framework for Mitigating Excessive Transportation in the Context of Manufacturing Localization	Alta	Integración LSS con métodos avanzados	Amplía la aplicación de LSS hacia decisiones logísticas y sostenibilidad en manufactura.
Panchal et al. (2024)	Digital Transformation and Business Intelligence for a	Media	Digitalización y control inteligente	Complementa LSS al mostrar cómo datos y BI

<i>Autor(es) y año</i>	<i>Título</i>	<i>Nivel de relación</i>	<i>Enfoque predominante</i>	<i>Aporte principal</i>
	SME: Systems Thinking Action Research Using ProOH Modelling			fortalecen el control de procesos.
Peruchi et al. (2020)	Integrating Multivariate Statistical Analysis Into Six Sigma DMAIC Projects: A Case Study on AISI 52100 Hardened Steel Turning	Alta	DMAIC / Six Sigma	Aporta evidencia robusta de Six Sigma en acero con análisis multivariado de CTQ.
Porras Guzmán y Sierra-Liñan (2025)	Design and Implementation of a Management Model with a Focus on the Operator to Improve Productivity in the Steel Industry	Alta	Factores organizacionales	Evidencia directa de mejora de productividad en acero con herramientas Lean y enfoque humano.
Deng et al. (2022)	Reinforcement Learning for Industrial Process Control: A Case Study in Flatness Control in Steel Industry	Alta	Digitalización y control inteligente	Aporta una perspectiva de medición y control avanzado para sostener mejoras de calidad en acero.
Deng et al. (2023)	Offline Reinforcement Learning for Industrial Process Control: A Case Study from Steel Industry	Alta	Digitalización y control inteligente	Complementa la clasificación con evidencia de control avanzado y uso de datos históricos en acero.

6.1.3 Resultados cuantitativos y cualitativos relevantes

La clasificación permitió distinguir aquellos documentos que presentaron resultados cuantitativos verificables, especialmente en indicadores como productividad, reducción de defectos, OEE, capacidad de proceso, disminución de desperdicios y control de calidad. Estos hallazgos resultaron fundamentales para diferenciar los estudios con evidencia práctica de aplicación frente a aquellos de carácter conceptual, revisiones teóricas o propuestas tecnológicas sin validación empírica.

Tabla 3. Resultados cuantitativos y cualitativos relevantes del corpus

<i>Documento</i>	<i>Resultado reportado</i>	<i>Interpretación para el primer objetivo</i>
Duc et al. (2023)	Defectos de diámetro exterior de 31,20 % a 4,5 %; productividad por persona/hora de 15 a 30 piezas; beneficio anual estimado de USD 11.184.	Evidenció el potencial de DMAIC híbrido y selección multicriterio en un caso industrial no siderúrgico.

<i>Documento</i>	<i>Resultado reportado</i>	<i>Interpretación para el primer objetivo</i>
Koul et al. (2021)	NCO, excessive rolling y made to stock explicaron más de tres cuartas partes del PSFS.	Permitió priorizar causas críticas en un proceso de laminación de placas de acero.
Rathi et al. (2024)	Disponibilidad mejorada en 11,37 %, desempeño en 5 % y OEE de 56,42 % a 73,52 %.	Mostró la utilidad de SMED y TPM en un proceso de rolling mill.
Salwin et al. (2021)	Aumento de productividad de línea de 17 % y reducción de 25 % en tiempo de empaque.	Sustentó el uso de VSM para reducir desperdicios en fabricación de tubos de acero.
Peruchi et al. (2020)	MCpk de 4,55 y reducción de probabilidad de defectos a niveles extremadamente bajos.	Mostró aplicación robusta de DMAIC multivariado en torneado de acero AISI 52100.
Porras Guzmán y Sierra-Liñan (2025)	Productividad incrementada de 46,62 % a 77,49 %.	Evidenció impacto de Lean, 5S, mantenimiento autónomo y enfoque en operador en la industria del acero.
Deng et al. (2022, 2023)	Los métodos de aprendizaje por refuerzo superaron enfoques tradicionales o de referencia en escenarios de simulación.	Aportaron evidencia sobre control avanzado de planitud en laminación de acero, aunque no se clasificaron como LSS.

6.1.4 Interpretación de categorías derivadas de la matriz

La matriz permitió transformar la revisión documental en categorías interpretativas. Esta organización fue necesaria porque el objetivo no consistió únicamente en listar documentos, sino en clasificarlos de acuerdo con su aporte metodológico, sectorial y práctico. En consecuencia, la respuesta al primer objetivo se sustentó en la relación entre herramientas de mejora, procesos intervenidos, indicadores reportados y vacíos identificados.

Tabla 4. Categorías interpretativas derivadas de la matriz

<i>Variable</i>	<i>Categorías identificadas</i>	<i>Utilidad para el primer objetivo</i>
Herramientas Lean/LSS	DMAIC, VSM, SMED, TPM, Kaizen, Ishikawa, Pareto, DOE, FAHP, análisis de capacidad, PCA y FMEA.	Permitieron clasificar los estudios según el tipo de intervención y la lógica metodológica utilizada.
Procesos intervenidos	Laminación, tubos de acero, torneado de acero, rectificado, prime stock, transporte, control de planitud, metalmecánica y construcción.	Permitieron diferenciar evidencia directa del sector acero frente a documentos transferibles.
Indicadores de resultado	Defectos, productividad, OEE, disponibilidad, capacidad de proceso, desperdicios, planitud, costos y tiempos de cambio.	Sirvieron para identificar los documentos con evidencia empírica de mejora.
Factores organizacionales	Liderazgo, cultura, comunicación, empoderamiento, estandarización, participación del operador y gestión del cambio.	Mostraron condiciones necesarias para sostener la mejora más allá de la herramienta técnica.

<i>Variable</i>	<i>Categorías identificadas</i>	<i>Utilidad para el primer objetivo</i>
Vacíos identificados	Casos únicos, simulaciones, documentos fuera del sector, enfoque parcial en Lean o digitalización y escaso seguimiento longitudinal.	Delimitaron el alcance de los hallazgos y evitaron generalizaciones absolutas.

6.1.5 *Análisis de la Clasificación Documental*

A partir de la clasificación realizada, los 17 documentos fueron organizados y valorados según su relación con Lean Six Sigma, Lean Manufacturing, mejora continua y el sector acero. La matriz permitió reconocer que la evidencia más sólida se concentró en procesos de laminación, fabricación de tubos, mecanizado de piezas de acero, gestión de prime stock, control de planitud, organización de la producción metalúrgica y estrategias de productividad en industrias siderúrgicas y metalmecánicas.

Los estudios con mayor pertinencia para el sector siderúrgico evidenciaron que las herramientas de mejora continua más utilizadas fueron DMAIC, VSM, SMED, TPM, Kaizen, Ishikawa, Pareto, FMEA, análisis de capacidad, DOE y análisis estadístico multivariado. La aplicación de estas metodologías estuvo orientada a la reducción de defectos y desperdicios, incremento de la disponibilidad operativa, el control de la variabilidad de los procesos, el mejoramiento de la productividad, la disminución de los tiempos de cambio y el fortalecimiento de la toma de decisiones basada en datos.

La revisión de la literatura también evidenció que no todos los estudios analizados se enmarcaron estrictamente en el enfoque Lean Six Sigma. Algunos trabajos abordaron temáticas relacionadas con Lean Manufacturing, la digitalización de procesos, la inteligencia de negocios, aprendizaje por refuerzo o factores organizacionales. Sin embargo, estos aportes contribuyeron significativamente para ampliar la percepción de la mejora continua en la industria siderúrgica, especialmente en un contexto donde la manufactura siderúrgica exige control de procesos,

integración tecnológica, sostenibilidad operacional, consolidación del liderazgo organizacional y garantizar la estandarización de las actividades productivas.

La evidencia más sólida se identificó en los estudios relacionados con la aplicación de DMAIC, Six Sigma, VSM, SMED, TPM y Lean Manufacturing aplicados en procesos propios de la industria del acero, la metalurgia y la manufactura metalmecánica. De manera complementaria, los estudios enfocados en digitalización, control inteligente, Industria 4.0, inteligencia de negocios y factores organizacionales enriquecieron la comprensión de la mejora continua desde una perspectiva más amplia, aunque estos enfoques no fueron clasificados como aplicaciones puras de Lean Six Sigma.

En conjunto, la matriz de análisis construida proporcionó una base ordenada y trazable para el desarrollo de los objetivos posteriores de la monografía, en particular aquellos orientados a comparar herramientas, interpretar beneficios y reconocer limitaciones de Lean Six Sigma en empresas manufactureras del sector siderúrgico.

6.2 Desarrollo del Segundo Objetivo Específico

El segundo objetivo específico se desarrolló con el propósito de comparar los enfoques, metodologías y herramientas de Lean Six Sigma aplicadas en procesos relacionados con la industria del acero. Mas allá de describir individualmente los documentos revisados, el análisis se orientó a establecer relaciones entre los diferentes estudios, con el fin de identificar las características de las intervenciones realizadas, el proceso industrial en el que se aplicó, las herramientas empleadas y los resultados que sustentaron su aporte a la mejora continua.

La comparación se fundamentó en la clasificación documental establecida durante el desarrollo del primer objetivo específico. A partir de esta base, los estudios fueron revisados

nuevamente bajo una lógica relacional y comparativa. En primer lugar, se identificó el enfoque predominante en cada investigación; luego se examinó el proceso industrial intervenido; posteriormente se analizaron las metodologías y las herramientas empleadas y finalmente, se contrastaron los indicadores de desempeño reportados y el grado de vinculación de cada estudio con el sector del acero. Esta secuencia de análisis permitió mantener una estructura de revisión ordenada, sistemática y coherente con la matriz de análisis documental.

Es importante señalar que no todos los documentos revisados correspondieron a aplicaciones estrictas de Lean Six Sigma en plantas siderúrgicas. Algunos se centraron en enfoques de Lean Manufacturing o Six Sigma de manera independiente, mientras que otros incorporaron tecnologías digitales, metodologías avanzadas para la toma de decisiones o factores organizacionales relacionados con la gestión de la mejora. No obstante, esta diversidad temática resultó enriquecedora, ya que permitió comprender cómo se ha abordado la mejora continua en procesos industriales del acero y en sectores con características productivas similares.

6.2.1 Criterios aplicados para la comparación

Con el propósito de orientar el análisis comparativo se establecieron seis criterios fundamentales: enfoque predominante, proceso intervenido, metodología aplicada, herramientas utilizadas, indicadores de resultado y nivel de vinculación con el sector siderúrgico. Estos criterios constituyeron el eje articulador del estudio, permitiendo organizar de manera sistemática la información recopilada y garantizar la coherencia del análisis.

De esta manera, la comparación metodológica permitió identificar los enfoques y diferenciar los enfoques predominantes de los estudios analizados, incluyendo DMAIC/Six Sigma, Lean Manufacturing, enfoques híbridos de Lean Six Sigma, propuestas de digitalización, sistemas

de control inteligente o factores organizacionales. Paralelamente, la comparación técnica se orientó a examinar las herramientas empleadas y la función que desempeñaron dentro de cada intervención. Finalmente, la comparación práctica permitió relacionar las metodologías implementadas con los resultados obtenidos, evidenciados en indicadores como la productividad, OEE, disponibilidad operativa, la reducción de defectos y desperdicios, control de planitud, el incremento de la capacidad de proceso y fortalecimiento de la gestión operativa.

6.2.1.1 Enfoque Predominante. En este primer criterio se evidenciaron distintos enfoques predominantes, en algunos casos, el eje central fue DMAIC/Six Sigma, con énfasis en el uso de datos, el análisis causal y el control estadístico; mientras que en otros prevaleció Lean Manufacturing, orientado al flujo de materiales, la reducción de desperdicios, los tiempos de operación y la disponibilidad de equipos.

Para el caso del grupo de DMAIC/Six Sigma se destacaron dos estudios los de Koul et al. (2021) y Peruchi et al. (2020), quienes abordaron retos asociados al acero y emplearon herramientas analíticas para causas, medir variables críticas y orientar la mejora; a diferencia de Rath et al. (2024), Salwin et al. (2021) y Furman y Matysa (2021) quienes se asociaron más con Lean Manufacturing, al centrarse en metodologías como SMED, TPM, VSM, 5S, Kaizen, Kanban, gestión visual y estandarización.

También se evidenció enfoques híbridos o complementarios, Duc et al. (2023) y Eryarsoy et al. (2023) integraron Lean Six Sigma con métodos avanzados de decisión, optimización y tecnologías digitales; Deng et al. (2022, 2023), Gajdzik et al. (2025) y Panchal et al. (2024) aportaron elementos de digitalización y control inteligente que reforzaron las fases de seguimiento y sostenimiento de las mejoras; y finalmente, Alnadi y McLaughlin (2021) y Porras Guzmán y

Sierra-Liñan (2025) destacaron que la implementación de LSS también depende de factores organizacionales como liderazgo, cultura, participación del personal y gestión del cambio.

Tabla 5. Comparación de documentos según enfoque predominante

<i>Enfoque predominante</i>	<i>Documentos representativos</i>	<i>Lectura comparativa</i>
DMAIC / Six Sigma	Koul et al. (2021); Peruchi et al. (2020)	Su aporte se concentró en la medición, el análisis causal, la capacidad de proceso y el control estadístico de variables críticas.
Lean Manufacturing	Rathi et al. (2024); Salwin et al. (2021); Furman y Małysa (2021)	Su aporte se orientó a la reducción de desperdicios, tiempos de cambio, esperas, fallas, desorden operativo y pérdidas de productividad.
LSS híbrido o con métodos avanzados	Duc et al. (2023); Eryarsoy et al. (2023)	Su aporte consistió en integrar DMAIC con TOPSIS, FAHP, DOE, optimización, RFID y sistemas digitales.
Digitalización y control inteligente	Deng et al. (2022); Deng et al. (2023); Gajdzik et al. (2025); Panchal et al. (2024)	Su aporte fue complementario, pues fortaleció el monitoreo, la trazabilidad, el control de proceso y la toma de decisiones basada en datos.
Factores organizacionales	Alnadi y McLaughlin (2021); Porras Guzmán y Sierra-Liñan (2025); Rodríguez-Noe et al. (2024)	Su aporte permitió comprender que liderazgo, cultura, estandarización y participación del personal condicionaron la sostenibilidad de la mejora.
Evidencia metodológica transferible	Gültaş (2024); Chancasanampa Narvaez et al. (2026)	Su aporte fue indirecto, pero útil para contrastar aplicaciones de Six Sigma, reducción de pérdidas e integración con tecnologías de Industria 4.0.

6.2.1.2 Proceso Intervenido. El segundo criterio permitió ubicar cada documento dentro de un proceso productivo o funcional. Esta lectura fue importante porque la utilidad de una herramienta Lean Six Sigma depende, en buena medida, del tipo de problema que enfrenta el proceso. Por ejemplo, no se comparó de la misma manera un estudio sobre laminación, un caso de fabricación de tubos, una operación de torneado de acero o una intervención logística, ya que cada contexto presentó necesidades técnicas distintas.

En los procesos de laminación y rolling mill, las herramientas se orientaron principalmente a disponibilidad, confiabilidad, tiempos de cambio, calidad dimensional y control de planitud.

Rathi et al. (2024) abordaron la productividad mediante SMED y TPM, mientras que Deng et al. (2022, 2023) se concentraron en el control de planitud mediante aprendizaje por refuerzo. Aunque de esta manera las propuestas partieron de metodologías diferentes, ambas respondieron a la necesidad de controlar procesos técnicamente exigentes y reducir variaciones que podían afectar el resultado final.

En otros procesos, la mejora se desarrolló desde problemas más específicos de flujo, calidad e inventario. Por su parte Salwin et al. (2021) dentro del marco de la fabricación de tubos de acero, recurrieron al Value Stream Mapping para revisar el comportamiento del proceso y reconocer actividades que generaban esperas con desplazamientos innecesarios y operaciones con bajo aporte de valor. En el caso del torneado de acero endurecido, Peruchi et al. (2020) emplearon un enfoque estadístico, debido a que el proceso involucraba varias características críticas de calidad que debían analizarse de manera conjunta. A su vez, Koul et al. (2021) estudiaron el problema de prime stock en placas de acero mediante DMAIC y herramientas de priorización de causas, lo que permitió relacionar las dificultades del inventario con decisiones de producción que no siempre respondían a los requerimientos reales.

Enlazando los puntos de vista con un polo de vista adicional, la revisión también mostró que la mejora continua en el sector del acero no se concentró únicamente en la línea de producción. Algunos estudios llevaron el análisis hacia aspectos logísticos, digitales y organizacionales, ampliando así la comprensión sobre el alcance de Lean Six Sigma. Eryarsoy et al. (2023) abordaron el transporte excesivo y la localización en manufactura de acero mediante la integración de LSS, FAHP y DOE.

De forma complementaria, los trabajos relacionados con digitalización y control inteligente permitieron reconocer que el uso de datos, la inteligencia de negocios y los sistemas de control pueden apoyar la toma de decisiones en procesos industriales complejos.

Tabla 6. Comparación según proceso intervenido

<i>Proceso intervenido</i>	<i>Herramientas predominantes</i>	<i>Problema o indicador asociado</i>	<i>Documentos</i>
Laminación / rolling mill	SMED, TPM, OEE, aprendizaje por refuerzo, control de planitud	Disponibilidad, tiempos de cambio, paradas, calidad de planitud y estabilidad operacional	Rathi et al. (2024); Deng et al. (2022, 2023)
Placas de acero / prime stock	DMAIC, Pareto, Ishikawa	Exceso de inventario, no conformidad de orden, rolling excesivo y producción made to stock	Koul et al. (2021)
Torneado de acero endurecido	MDMAIC, PCA, MCpk, análisis multivariado	Características críticas de calidad correlacionadas, capacidad de proceso y riesgo de defectos.	Peruchi et al. (2020)
Tubos de acero	VSM, takt time, OEE, mapa de estado actual y futuro	Desperdicios, esperas, flujo, empaque y productividad de línea	Salwin et al. (2021)
Producción metalúrgica	5S, VSM, SMED, TPM, Kaizen, Kanban, poka-yoke, Ishikawa	Organización de producción, eliminación de desperdicios y estandarización del trabajo.	Furman y Małysa (2021)
Logística y localización	LSS, FAHP, DOE, estructura DMAIC	Transporte excesivo, localización, sostenibilidad y decisiones de cadena de suministro	Eryarsoy et al. (2023)
Gestión del operador	5S, mantenimiento autónomo, estandarización, gestión del desempeño	Productividad, disciplina operativa, participación y sostenibilidad de la mejora	Porras Guzmán y Sierra-Liñan (2025)
Soporte digital y de control	BI, manufactura inteligente, RFID, DNC, sistemas de datos, Industria 4.0/5.0	Seguimiento, trazabilidad, control en tiempo real y sostenimiento de resultados	Duc et al. (2023); Gajdzik et al. (2025); Panchal et al. (2024)

6.2.1.3 Metodología Aplicada. El tercer criterio se centró en la metodología aplicada; la comparación permitió reconocer que DMAIC actuó como una estructura ordenadora en los estudios más cercanos a Six Sigma o Lean Six Sigma. En el trabajo de Koul et al. (2021), la secuencia metodológica sirvió para definir el problema de prime stock, medir sus causas, analizar la concentración del problema mediante Pareto, identificar causas raíz con Ishikawa y orientar

acciones de mejora. Apelando a un símil, Peruchi et al. (2020) adaptaron DMAIC a un enfoque multivariado donde el objetivo se cernió sobre la complejidad de variables críticas correlacionadas en el torneado de acero.

La comparación también mostró que otros documentos no siguieron DMAIC de manera explícita en todos los casos revisados, como Salwin et al. (2021) que estructuraron su intervención alrededor del mapa de flujo de valor, Rathí et al. (2024) articularon la mejora con SMED y TPM; y Furman y Malysa (2021) presentaron un conjunto de herramientas Lean aplicables a la organización de la producción metalúrgica. En consecuencia, esta diversidad metodológica evidenció que la mejora continua en el sector no respondió a un único camino de aplicación entablándose sobre particularidades de cada proceso.

De igual manera, algunos estudios mostraron que la estructura tradicional de Lean Six Sigma puede ampliarse mediante métodos avanzados de análisis y toma de decisiones desde el factor de adaptabilidad a problemas más complejos cuando se requiere análisis multicriterio, tratamiento de datos y apoyo tecnológico para orientar la toma de decisiones. Eryarsoy et al. (2023) integraron FAHP para priorizar causas y DOE para evaluar alternativas dentro de un marco inspirado en DMAIC. En una línea similar, Duc et al. (2023) combinaron un enfoque DMAIC híbrido con Fuzzy TOPSIS, optimización multiobjetivo y tecnologías asociadas a la fábrica inteligente.

Tabla 7. Comparación según metodología aplicada y fases de mejora

<i>Fase o momento metodológico</i>	<i>Metodología aplicada / herramientas asociadas</i>	<i>Problemas o indicadores vinculados</i>	<i>Documentos de soporte</i>
Definir	Delimitación del problema, CTQ, alcance del proceso, identificación de desperdicios	Prime stock, defectos dimensionales, baja disponibilidad, transporte excesivo, desperdicios y planitud.	Koul et al. (2021); Peruchi et al. (2020); Eryarsoy et al. (2023); Salwin et al. (2021)

<i>Fase o momento metodológico</i>	<i>Metodología aplicada / herramientas asociadas</i>	<i>Problemas o indicadores vinculados</i>	<i>Documentos de soporte</i>
Medir	OEE, disponibilidad, productividad, tiempos de cambio, takt time, defectos, variables CTQ y datos de proceso	Línea base operativa y de calidad.	Rathi et al. (2024); Salwin et al. (2021); Peruchi et al. (2020); Duc et al. (2023)
Analizar	Pareto, Ishikawa, FMEA, PCA, MCpk, FAHP, Fuzzy TOPSIS y análisis de desperdicios	Causas raíz, correlación entre variables, priorización de alternativas y fuentes de variabilidad.	Koul et al. (2021); Peruchi et al. (2020); Eryarsoy et al. (2023); Duc et al. (2023)
Mejorar	SMED, TPM, VSM futuro, Kaizen, 5S, Kanban, poka-yoke, mantenimiento autónomo, DOE, RFID y DNC	Reducción de paradas, tiempos de cambio, desperdicios, defectos y reprocesos.	Rathi et al. (2024); Salwin et al. (2021); Furman y Małysa (2021); Porras Guzmán y Sierra-Liñan (2025)
Controlar	Capacidad de proceso, estandarización, tableros, BI, aprendizaje por refuerzo, control de planitud y seguimiento de indicadores	Sostenimiento de calidad, estabilidad del proceso, trazabilidad y toma de decisiones con datos.	Peruchi et al. (2020); Deng et al. (2022, 2023); Gajdzik et al. (2025); Panchal et al. (2024)

6.2.1.4 Herramientas Utilizadas e Indicadores de Resultado. El cuarto y el quinto criterio se analizaron de forma articulada, debido a que una herramienta adquiere sentido cuando se relaciona con el resultado que buscó mejorar. En este punto, se observó que las herramientas Six Sigma fueron más fuertes cuando los problemas se asociaron con calidad, defectos, variabilidad, características críticas y capacidad de proceso. Por ejemplo, Pareto, Ishikawa, FMEA, PCA, MCpk y CTQ permitieron pasar de una identificación general del problema a una explicación más precisa de sus causas y efectos.

Las herramientas Lean se orientaron principalmente a resolver dificultades relacionadas con el flujo de materiales, la disponibilidad de equipos, los tiempos de operación y la eliminación de desperdicios. Mientras que SMED y TPM se asociaron con la reducción de los tiempos de cambio, disminución de fallas y mejora de la disponibilidad operativa; VSM facilitó la representación del estado actual de los procesos y la identificación de oportunidades para diseñar estados futuros más eficientes. De manera complementaria metodologías como 5S, Kaizen, Kanban, la gestión visual y la estandarización contribuyeron a la organización del trabajo y a

fortalecer la participación operativa. De esta manera, la comparación mostró que Lean y Six Sigma no cumplen funciones idénticas, sino que se complementan desde perspectivas distintas del desempeño productivo, favoreciendo mejoras integrales en términos de eficiencia, calidad y estabilidad de procesos.

En relación con los indicadores de desempeño, los documentos más consistentes reportaron mejoras en productividad, OEE, disponibilidad operativa, reducción de defectos, capacidad de proceso, disminución de desperdicios, optimización de los tiempos de empaque y control de planitud del producto. No obstante, también se identificaron aportes de carácter cualitativo o estratégico, especialmente en ámbitos como digitalización, liderazgo y sostenibilidad. Por ello, el análisis distinguió entre evidencia directa con resultados medibles y evidencia complementaria que, aunque menos cuantificable, resulto útil para interpretar las condiciones de aplicación y sostenimiento de las mejoras.

Tabla 8. Comparación según herramientas utilizadas e indicadores de resultado

Herramientas utilizadas	Función dentro de la mejora	Indicadores de resultado o problemas asociados	Documentos
DMAIC, Pareto e Ishikawa	Análisis causal y priorización de problemas	Prime stock, no conformidades, rolling excesivo y producción made to stock	Koul et al. (2021)
MDMAIC, PCA, MCpk y CTQ	Control estadístico y análisis multivariado	Capacidad de proceso y reducción de riesgo de defectos	Peruchi et al. (2020)
SMED, TPM y OEE	Reducción de tiempos de cambio y mejora de disponibilidad	Disponibilidad, desempeño y OEE	Rathi et al. (2024)
VSM, takt time y análisis de desperdicios	Rediseño del flujo de valor	Productividad de línea y tiempo de empaque	Salwin et al. (2021)
5S, Kaizen, Kanban, gestión visual y estandarización	Orden operativo, disciplina de proceso y participación del personal	Productividad, estabilidad operativa y sostenibilidad de la mejora	Furman y Małysa (2021); Porras Guzmán y Sierra-Liñan (2025)

FAHP, DOE y LSS	Priorización multicriterio y evaluación de alternativas	Transporte excesivo, localización y decisiones logísticas	Eryarsoy et al. (2023)
BI, aprendizaje por refuerzo y control inteligente	Seguimiento, predicción y control basado en datos	Planitud, trazabilidad y sostenimiento de resultados	Deng et al. (2022, 2023); Panchal et al. (2024)

6.2.1.5 Nivel de Relación Sectorial. El sexto criterio permitió valorar la proximidad de cada documento con la industria del acero, diferenciando aquellos estudios que abordaron directamente procesos siderúrgicos de otros con un enfoque más general. Esta distinción fue necesaria para evitar tratar toda la evidencia como equivalente y otorgar mayor peso interpretativo a los trabajos que analizaron de manera específica operaciones como laminación, la fabricación de tubos de acero, el torneado de acero endurecido, la gestión de prime stock, el control de planitud, la logística de manufactura y la productividad del operador en entornos metalúrgicos.

En un segundo nivel se ubicaron documentos con relación metalúrgica o manufacturera transferible, los cuales aportaron herramientas, métodos o marcos de análisis útiles, aunque no siempre aplicados directamente a una planta siderúrgica. Finalmente, los documentos de digitalización, inteligencia de negocios, Industria 4.0 o factores organizacionales se interpretaron como evidencia complementaria. Estos no reemplazaron la evidencia directa del acero, pero ayudaron a comprender las condiciones actuales de sostenimiento, control y madurez organizacional que pueden acompañar proyectos Lean Six Sigma.

Tabla 9. Comparación según nivel de relación sectorial

Nivel de relación sectorial	Descripción	Documentos representativos	Uso dentro del análisis
Alta	Documentos aplicados directamente a procesos de acero, metalurgia o manufactura siderúrgica.	Koul et al. (2021); Peruchi et al. (2020); Rathi et al. (2024); Salwin et al. (2021); Eryarsoy et al. (2023);	Constituyeron la base principal para responder al segundo objetivo.

<i>Nivel de relación sectorial</i>	<i>Descripción</i>	<i>Documentos representativos</i>	<i>Uso dentro del análisis</i>
Media	Documentos con relación industrial, metodológica o tecnológica cercana al sector acero.	Deng et al. (2022, 2023); Porras Guzmán y Sierra-Liñan (2025) Duc et al. (2023); Furman y Małysa (2021); Gajdzik et al. (2025); Panchal et al. (2024); Alnadi y McLaughlin (2021)	Aportaron herramientas y condiciones complementarias para interpretar la mejora continua en entornos industriales.
Baja o transferible	Documentos de otros sectores que aportaron marcos Six Sigma, Lean, Industria 4.0 o reducción de pérdidas.	Gültaş (2024); Rodríguez-Noe et al. (2024); Chancasanampa Narvaez et al. (2026)	Se conservaron como soporte metodológico indirecto, no como evidencia directa del sector acero.

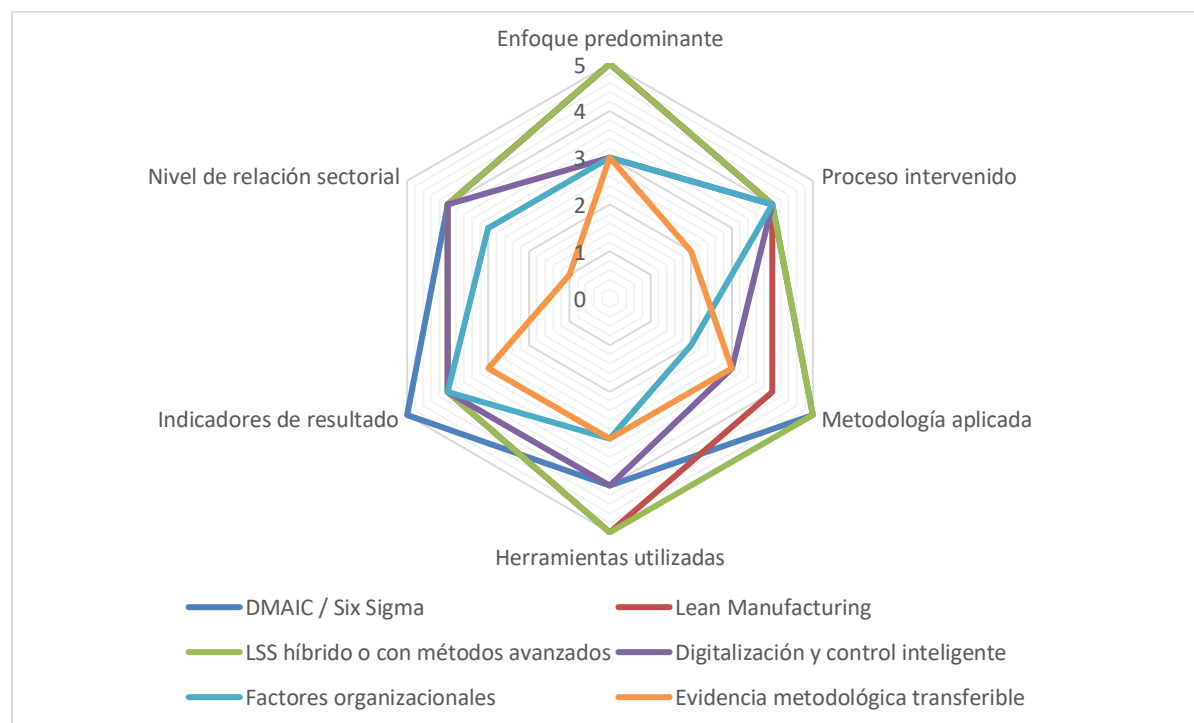
6.2.2 *Complejo de análisis comparativo basado en los criterios definidos*

Una vez desarrollada la comparación por criterios, se construyó un complejo de análisis para integrar los resultados en una sola lectura. Para mantener coherencia metodológica, este complejo no introdujo criterios nuevos; por el contrario, retomó los mismos títulos definidos en la Tabla 5: enfoque predominante, proceso intervenido, metodología aplicada, herramientas utilizadas, indicadores de resultado y nivel de relación sectorial. De esta forma, la matriz y el gráfico de radar funcionaron como una síntesis visual del análisis realizado previamente.

La valoración se realizó en una escala cualitativa de 1 a 5, donde 1 representó presencia baja y 5 presencia alta del criterio dentro de cada grupo de documentos. Esta puntuación no tuvo carácter estadístico ni pretendió medir la efectividad real de las metodologías en planta. Su finalidad fue organizar de manera pedagógica la comparación documental, mostrando qué enfoques resultaron más fuertes en cada criterio y cómo se complementaron dentro de la lectura general del segundo objetivo.

Tabla 10. Matriz de valoración del complejo de análisis comparativo según los criterios definidos

Grupo comparativo	Enfoque predominante	Proceso intervenido	Metodología aplicada	Herramientas utilizadas	Indicadores de resultado	Nivel de relación sectorial
DMAIC / Six Sigma	5	4	5	4	5	4
Lean Manufacturing	5	4	4	5	4	4
LSS híbrido o con métodos avanzados	5	4	5	5	4	4
Digitalización y control inteligente	3	4	3	4	4	4
Factores organizacionales	3	4	2	3	4	3
Evidencia metodológica transferible	3	2	3	3	3	1

Figura 1. Gráfico de radar del complejo de análisis comparativo según los criterios definidos

La lectura del radar permitió evidenciar con mayor claridad que los enfoques DMAIC/Six Sigma y LSS híbrido o con métodos avanzados mostraron mayor solidez en los criterios de enfoque predominante, metodología aplicada e indicadores de resultado. Esta consistencia fue coherente con su orientación hacia el análisis estructurado, la medición rigurosa y la explicación causal de problemas relacionados con calidad, variabilidad o decisiones técnicas. En contraste, Lean Manufacturing alcanzó una intensidad superior en el criterio de herramientas utilizadas, debido a la diversidad de instrumentos aplicados para reducir desperdicios, optimizar el flujo y fortalecer la organización del trabajo.

Aunque la digitalización y el control inteligente se relacionaron como componentes complementarios, no siempre se enmarcaron en Lean Six Sigma de manera estricta, pero aportaron significativamente al seguimiento, la trazabilidad y el sostenimiento de mejoras en procesos complejos de la industria del acero. De manera transversal, los factores organizacionales también se identificaron como elementos clave en la consolidación de los procesos de mejora continua., ya que la literatura revisada mostró que la mejora continua no depende únicamente de herramientas técnicas, sino también de liderazgo, cultura, comunicación interna, formación y participación activa del personal.

De manera general, el análisis permitió establecer que la comparación desarrollada en el segundo objetivo no debía interpretarse como una competencia entre herramientas, sino como una evidencia de que cada enfoque responde a necesidades distintas dentro de los procesos industriales. Mientras que Six Sigma proporciona rigor analítico y control estadístico para la reducción de la variabilidad, Lean Manufacturing contribuye a la eliminación de desperdicios y a la optimización del flujo de valor. Las metodologías avanzadas amplían la capacidad de análisis y apoyo a la toma de decisiones, mientras que las tecnologías de digitalización fortalecen el control de los procesos

y la trazabilidad de la información. Esta perspectiva integrada permite comprender la mejora continua en la industria del acero como un sistema multidimensional, donde la combinación de enfoques técnicos, digitales y humanos resulta esencial para enfrentar los desafíos actuales y futuros del sector.

6.3 Desarrollo del Tercer Objetivo Especifico

El tercer objetivo específico se centró en evaluar los hallazgos de la literatura revisada con el propósito de establecer conclusiones generales sobre la efectividad y las limitaciones de Lean Six Sigma en el sector del acero. Para iniciar este proceso se formuló una pregunta guía: ¿Qué tan útil ha resultado Lean Six Sigma para mejorar procesos en la industria del acero y bajo qué condiciones sus resultados pueden considerarse sólidos? Con esta base se retomaron la clasificación documental del primer objetivo y la comparación desarrollada en el segundo.

El análisis mostró una diversidad de enfoques, ya que se identificaron estudios aplicados directamente al acero, documentos de carácter metalúrgico, investigaciones de manufactura transferible, aportes digitales y trabajos centrados en factores organizacionales; ante esta variedad, el análisis distinguió entre evidencia directa y evidencia complementaria, evitando dar el mismo peso interpretativo a todos los documentos.

A partir de esta clasificación se valoró la efectividad de Lean Six Sigma considerando los resultados reportados, la relación con procesos siderúrgicos o metalmecánicos, el uso de herramientas específicas, la presencia de indicadores verificables y la capacidad de las intervenciones para sostener mejoras a largo plazo. En paralelo se examinaron las limitaciones, entre ellas el alcance de los estudios, la fragmentación de la literatura, la dependencia de casos

únicos, la escasa disponibilidad de datos, la madurez organizacional insuficiente, el componente tecnológico y la ausencia de seguimientos longitudinales en varios trabajos.

6.3.1 Criterios utilizados para evaluar los hallazgos

La evaluación de los hallazgos siguió una lógica similar a la matriz usada, aunque en esta etapa el objetivo fue valorar el aporte de cada documento a la comprensión de la efectividad y las limitaciones de Lean Six Sigma en el sector del acero. Para llevar a cabo esto, se definieron 5 criterios: Evidencia de mejora, aplicabilidad al acero, consistencia metodológica, sostenibilidad de los resultados y limitaciones.

La aplicación de estos criterios permitió pasar de una lectura descriptiva hacia una lectura crítica, porque no bastaba con señalar el uso de una herramienta, sino verificar si estaba vinculada a un problema productivo concreto, si generaba indicadores de mejora, si el proceso intervenido pertenecía realmente al sector del acero o provenía de otro contexto, y si existían condiciones organizacionales o técnicas que garantizaran la permanencia de los resultados.

Tabla 11. Criterios de evaluación de los hallazgos

<i>Criterio de evaluación</i>	<i>de</i>	<i>Sentido dentro del análisis</i>	<i>Hallazgos asociados</i>
Evidencia de mejora	de	Valoró si el documento tenía resultados cuantitativos o cualitativos asociados con productividad, calidad, disponibilidad, reducción de defectos, desperdicios y capacidad de proceso o control operacional.	Permitió evidenciar que estudios sustentaron con más claridad la efectividad de Lean Six Sigma o de las herramientas relacionadas.
Aplicabilidad sector acero	al	Diferenció estudios aplicados directamente a procesos siderúrgicos, metalúrgicos o metalmecánicos de los documentos metodológicos o de otros sectores.	Evitó extender resultados externos como si fueran evidencia directa.
Consistencia metodológica		Evaluó si la aplicación presentó un orden claro de diagnóstico, medición, análisis, mejora y control, o si aplicó herramientas aisladas sin estructura suficiente.	Ayudó a revisar la solidez de los casos revisados y su aporte.
Sostenibilidad de los resultados	de	Analizó si se incluyeron mecanismos de control, estandarización, seguimiento de indicadores, liderazgo, participación del personal o soporte digital.	Permitió identificar si la mejora se proyectó más allá de una intervención puntual.

<i>Criterio de evaluación</i>	<i>Sentido dentro del análisis</i>	<i>Hallazgos asociados</i>
Limitaciones identificadas	Revisó restricciones metodológicas, sectoriales, tecnológicas, organizacionales y de generalización.	Sirvió para delimitar el alcance de las conclusiones y proponer líneas de mejora futura.

6.3.2 Evaluación de la efectividad de Lean Six Sigma en el sector del acero

La revisión permitió identificar que Lean Six Sigma resultó efectiva cuando se aplicó a problemas claramente delimitados y acompañados de mediciones precisas. Los documentos con mayor solidez empírica reportaron mejoras en productividad, disponibilidad, OEE, reducción de defectos, capacidad de proceso, control de planitud y disminución de desperdicios. En particular, los estudios sobre laminación, fabricación de tubos de acero, torneado de acero endurecido, gestión de prime stock y productividad del operador ofrecieron evidencia más directa vinculada al sector siderúrgico.

En los trabajos con orientación Six Sigma, la efectividad se manifestó principalmente en el control de la variabilidad y en la identificación de causas raíz. Koul et al. (2021) aportaron un caso representativo al analizar la generación de prime stock mediante DMAIC, Pareto e Ishikawa, lo que permitió priorizar causas críticas del problema. De manera similar, Peruchi et al. (2020) demostraron que el análisis multivariado dentro de DMAIC fue pertinente cuando las características críticas de calidad estaban correlacionadas, como ocurrió en el torneado de acero AISI 52100 endurecido.

Por su parte, las aplicaciones Lean fueron más visibles en procesos donde el problema principal se relacionaba con desperdicios, disponibilidad, tiempos de cambio, esperas, empaque o flujo productivo; Rathi et al. (2024) generaron mejoras en disponibilidad, desempeño y OEE a partir del uso de SMED y TPM en una línea industrial, mientras que Salwin et al. (2021) demostraron aumentos en la productividad y reducción en tiempos de empaque mediante Value

Stream Mapping en una empresa que fabrica tubos de acero. En estos casos, la efectividad no dependió tanto de un análisis estadístico profundo, sino de la capacidad de las herramientas para visibilizar el desperdicio y reorganizar el flujo productivo.

Asimismo, la literatura revisada mostró que los enfoque híbridos y digitales ampliaron el alcance de la mejora. Eryarsoy et al. (2023) incorporaron FAHP y DOE en un marco LSS orientado a transporte excesivo y localización en manufactura, mientras que Deng et al. (2022, 2023) aportaron evidencia sobre control inteligente de planitud en la industria del acero. Aunque estos últimos estudios no constituyen aplicaciones puras de Lean Six Sigma, sí demostraron que la efectividad de la mejora en procesos siderúrgicos puede fortalecerse mediante el uso de datos, control avanzado y sistemas de apoyo a la decisión.

Tabla 12. *Evaluación de la efectividad según tipo de evidencia revisada*

<i>Tipo de evidencia</i>	<i>Nivel de aporte a la efectividad</i>	<i>Hallazgo evaluado</i>	<i>Documentos de soporte</i>
DMAIC/ Six Sigma aplicado al acero	Alta	Reducción de variabilidad, análisis causal, capacidad de proceso, priorización de problemas y control estadístico.	Koul et al. (2021); Peruchi et al. (2020)
Lean Manufacturing en procesos siderúrgicos o metalúrgicos	Alta	Mejoras en disponibilidad, OEE, flujo, productividad, tiempos de empaque y reducción de desperdicios.	Rathi et al. (2024); Salwin et al. (2021); Furman & Malysa (2021)
LSS con métodos avanzados	Media-alta	Ampliación del análisis hacia decisiones logísticas, priorización multicriterio, experimentación y soporte tecnológico.	Eryarsoy et al. (2023); Duc et al. (2023)
Digitalización y control inteligente	Media como evidencia LSS; alta como soporte de control	Fortalecimiento de seguimiento, trazabilidad, control de planitud y uso de datos históricos.	Deng et al. (2022, 2023); Gajdzik et al. (2025); Panchal et al. (2024)
Factores organizacionales	Media-alta como condición de sostenibilidad	Liderazgo, cultura, participación del operador, estandarización y disciplina operativa.	Alnadi & McLaughlin (2021); Porras Guzmán & Sierra- Liñan (2025)
Evidencia metodológica transferible	Media o baja para el sector acero	Aporta criterios de comparación, pero no permite concluir de forma	Gültaş (2024); Rodríguez-Noe et al. (2024);

<i>Tipo de evidencia</i>	<i>Nivel de aporte a la efectividad</i>	<i>Hallazgo evaluado</i>	<i>Documentos de soporte</i>
		directa sobre procesos siderúrgicos.	Chancasanampa Narvaez et al. (2026)

6.3.3 Beneficios generales identificados en la literatura revisada

La integración de los hallazgos permitió establecer que los beneficios de Lean Six Sigma en el sector del acero se concentraron en cuatro dimensiones principales: mejora de la productividad, reducción de desperdicios, control de calidad y fortalecimiento de la gestión operativa. Esta clasificación resultó coherente con la naturaleza de la industria siderúrgica, en la que los costos de producción, la estabilidad de los procesos, la calidad dimensional y el uso eficiente de los recursos inciden directamente en la competitividad.

La productividad se evidenció como uno de los beneficios más frecuentes, esto debido a la mayor disponibilidad de equipos, reducción de tiempos de cambio, reorganización del flujo, participación del operador y mejor aprovechamiento de los recursos, por lo que, desde este punto de vista, Lean Manufacturing demostró una ventaja práctica al intervenir en problemas visibles de la planta como esperas, paradas, movimientos innecesarios, desorden operativo y reprocesos.

La reducción de defectos y el control de la variabilidad se asociaron con principalmente a Six Sigma y al enfoque DMAIC. Los estudios con orientación estadística evidenciaron que los procesos del acero requieren mediciones confiables, identificación de CTQ, análisis de capacidad y control de variables críticas lo cual resulta esencial en una industria que demanda rapidez, pero también cumplimiento estricto de tolerancias técnicas y de calidad.

Finalmente, se identificaron beneficios menos inmediatos pero relevantes, como la digitalización, la inteligencia de negocios y el control inteligente, que contribuyeron al sostenimiento de los resultados. Además, los factores organizacionales facilitaron la apropiación

de las mejoras, por lo que la efectividad de Lean Six Sigma no dependió únicamente de la herramienta aplicada sino de la articulación entre métodos, datos, procesos, personas y mecanismos de control.

Tabla 13. *Beneficios generales y condiciones de validez identificados*

<i>Beneficio identificado</i>	<i>Manifestación en la literatura</i>	<i>Condición de validez</i>	<i>Documentos de soporte</i>
Productividad y desempeño operativo	Incremento de productividad, mejora de disponibilidad, aumento de OEE y reducción de tiempos improductivos.	Fue más consistente cuando existieron indicadores de línea base y medición posterior.	Rathi et al. (2024); Salwin et al (2021); Porras Guzmán & Sierra-Liñan (2025)
Calidad y reducción de variabilidad	Priorización de causas raíz, reducción de defectos, mejora de capacidad y control de características críticas.	Dependió de datos confiables, sistemas de medición y aplicación ordenada de DMAIC.	Koul et al. (2021); Peruchi et al. (2020)
Reducción de desperdicios	Identificación de actividades sin valor, reducción de tiempos de empaque, disminución de paradas y mejor uso de recursos.	Fue más clara en estudios Lean con VSM, SMED, TPM, 5S y estandarización.	Salwin et al (2021); Rathi et al. (2024); Furman & Malysa (2021)
Control y sostenimiento	Seguimiento de indicadores, control de planitud, uso de datos históricos, trazabilidad y soporte digital.	Su aporte fue complementario y requirió integración con objetivos de mejora operacional.	Deng et al. (2022, 2023); Gajdzik et al. (2025); Panchal et al. (2024)
Gestión humana y cultura de mejora	Liderazgo, participación del operador, comunicación, estandarización y disciplina operacional.	Condicionó la permanencia de las mejoras y la adopción real de las herramientas.	Alnadi & McLaughlin (2021); Porras Guzmán & Sierra-Liñan (2025)

6.3.4 Limitaciones de Lean Six Sigma evidenciadas en el sector del acero

Si bien la literatura revisada permitió identificar efectos favorables, también evidenció limitaciones que debían ser consideradas antes de tener el Lean Six Sigma como la solución general para la industria del acero. En primer lugar, la documentación estaba dispersa, la mayor parte de los documentos correspondió a estudios de caso, investigaciones desde otros sectores y propuestas tecnológicas; lo que permitió construir una lectura útil pero no generalizada sobre las empresas siderúrgicas.

Una segunda limitación estuvo relacionada con las diferentes metodologías, ya que no todos los documentos aplicaron Lean Six Sigma de forma completa: algunos solo utilizaron herramientas Lean, otros recurrieron a Six Sigma y algunos utilizaron métodos avanzados. Por ende, la revisión mostro varios enfoques de mejora continua más que una aplicación uniforme de LSS.

La tercera limitación se relacionó con la disponibilidad y calidad de los datos, ya que en los procesos siderúrgicos la medición confiable es especialmente importante porque las variables metalúrgicas, térmicas y logísticas pueden afectar simultáneamente el resultado. Por lo tanto, las herramientas Six Sigma pierden fuerza cuando no existen sistemas de medición robustos, trazabilidad del proceso, datos históricos o indicadores correctamente definidos.

En la literatura también se identificaron limitaciones organizacionales, en factores como el liderazgo, la mejora continua, la capacitación y la comunicación interna las cuales fueron condiciones necesarias para que las herramientas implementadas no se conviertan en acciones aisladas y sin continuidad. En plantas tradicionales del sector industrial la resistencia al cambio, la falta de formación y la poca apropiación del personal pueden reducir la efectividad de Lean Six Sigma aun cuando las herramientas estas técnicamente bien seleccionadas.

Finalmente, con esta revisión se pudo observar limitación relacionada con el tiempo, debido a que varios resultados de mejora de los estudios reportados no presentan seguimientos prolongados limitando así la capacidad de sostenibilidad y estabilidad en el tiempo. De este modo las etapas de control, estandarización y monitoreo posterior de los procesos desempeñaron un papel fundamental para consolidar las mejoras alcanzadas y garantizar su sostenibilidad en el tiempo.

Tabla 144. *Limitaciones identificadas*

<i>Limitación</i>	<i>Evidencia observada</i>	<i>Implicación para la monografía</i>
Documentación dispersa	La mayor parte de los documentos correspondió a estudios de caso, investigaciones desde otros sectores y propuestas tecnológicas	Permitió construir una lectura útil pero no generalizada sobre las empresas siderúrgicas
Aplicación de diferentes metodologías	No todos los estudios desarrollaron Lean Six Sigma completo; varios aplicaron Lean, Six Sigma o herramientas digitales independientes	La efectividad tuvo varios enfoques de mejora continua según la metodología o herramienta aplicada
Limitaciones organizacionales	Liderazgo, mejora continua, capacitación y comunicación interna condicionaron la sostenibilidad	Condiciones necesarias para que las herramientas implementadas no se conviertan en acciones aisladas y sin continuidad
Escaso seguimiento prolongado	Varios resultados de mejora de los estudios reportados sin demostrar ampliamente su permanencia en el tiempo.	Las etapas de control, estandarización y monitoreo posterior de los procesos desempeñaron un papel fundamental

6.3.5 Balance crítico para el tercer objetivo

Un análisis crítico permitió establecer que Lean Six Sigma fue una metodología adecuada para el sector del acero, pero su efectividad dependió de la forma en que se adaptó a la necesidad de mejora. Los estudios revisados evidenciaron que cuando las oportunidades de mejora estuvieron relacionadas con variabilidad, defectos o capacidad de proceso, Six Sigma y DMAIC mostraron ser las metodologías más efectivas. En los casos relacionados con desperdicios, tiempos de operación, disponibilidad o flujo, Lean Manufacturing demostró ser eficaz con las herramientas enfocadas a optimización de procesos y eliminación de actividades que no agregan valor. Y cuando el reto implicó control avanzado, trazabilidad o sostenimiento, la digitalización y los sistemas de datos ofrecieron un apoyo complementario.

De este modo, la literatura revisada permitió afirmar que la efectividad de Lean Six Sigma fue mayor cuando existió una combinación coherente entre el, problema, el proceso, herramienta, indicador y condición organizacional. Para el sector del acero, esta articulación fue de gran

importancia porque se trata de una industria con procesos intensivos, altos costos operativos, exigencias técnicas rigurosas y necesidad de mantener una estabilidad productiva.

Las conclusiones generales del tercer objetivo se realizaron con una interpretación cuidadosa ya que se evidencio que todavía existen vacíos en estudios integrales, seguimiento longitudinal, aplicación en empresa colombianas e integración con sostenibilidad.

Tabla 155. Conclusiones generales sobre la efectividad y las limitaciones

Aspecto evaluado	Conclusión general	Alcance o precisión necesaria
Efectividad operacional	Lean Six Sigma mostró utilidad para mejorar productividad, disponibilidad, OEE, flujo, reducción de desperdicios y tiempos de operación.	Su impacto fue más claro cuando se aplicaron herramientas Lean en procesos con problemas visibles de flujo y disponibilidad.
Efectividad en calidad	DMAIC y Six Sigma fortalecieron el análisis causal, el control de variabilidad y la capacidad de proceso.	Su aplicación exigió datos confiables, medición estable y competencias estadísticas.
Adaptabilidad al acero	La metodología se adaptó a laminación, tubos, torneado, prime stock, logística, control de planitud y productividad operativa.	No todas las evidencias fueron directamente siderúrgicas; por ello se mantuvo diferenciación sectorial.
Sostenibilidad de la mejora	Los resultados dependieron de control posterior, estandarización, liderazgo, participación del operador y sistemas de seguimiento.	Sin apropiación organizacional, la mejora puede quedarse en acciones puntuales.
Limitación principal	La evidencia disponible siguió siendo dispersa, heterogénea y apoyada en varios casos únicos.	Se requirieron más estudios multicaso, longitudinales y contextualizados en empresas del sector acero.
Cierre interpretativo	Lean Six Sigma se interpretó como una estrategia útil, flexible y complementaria para la mejora continua del acero.	Su valor dependió de combinar herramientas técnicas, datos, cultura organizacional y tecnologías de control.

6.3.6 Síntesis del tercer objetivo

De acuerdo con la evaluación realizada, se concluyó que Lean Six Sigma apporto un enfoque estructurado para mejorar los procesos productivos en la industria del acero, principalmente cuando se integraron herramientas de diagnóstico, medición, análisis causal y reducción de desperdicios. La literatura revisada mostro beneficios concretos en productividad, disponibilidad, OEE, reducción de defectos, disminución de desperdicios y fortalecimiento de la gestión operativa.

7. Discusión

En términos generales, la presente investigación permitió reconocer la frontera de Lean Six Sigma, donde se puede evidenciar que ha sido estudiada como una alternativa relevante para enfrentar problemas de productividad, calidad, desperdicio y variabilidad en procesos industriales dentro del contexto del acero. Sin embargo, también se pudo evidenciar que en la literatura se encuentra dispersa de modo de que no se halla en un único cuerpo de conocimiento, sino distribuida entre estudios de caso, aplicaciones Lean, enfoques Six Sigma, propuestas digitales, investigaciones metalúrgicas y documentos transferibles desde otros sectores.

Por otro lado, si bien la matriz planteada permitió entender esta dispersión, al clasificar los documentos se evidenció que el corpus no respondía a una sola categoría metodológica, en su lugar, corresponde a una combinación de enfoques. Ahora bien, esta clasificación dentro de su hilo conductor permitió reconocer que estudios albergaban relación directa con el acero y cuales aportaban de manera complementaria, donde el análisis habría corrido un sesgo de elección al presentar evidencia siderúrgica sobre documentos que provenían de sectores distintos.

En materia, los documentos se llevaron al punto comparativo donde los enfoques, procesos, metodologías, herramientas, indicadores y nivel de relación sectorial demostró tener la premisa de que las herramientas no se pueden evaluar de una forma aislada, es decir, un diagrama de Pareto o Ishikawa llegan a tener sentido cuando el problema requería priorizar causas; un VSM dentro del proceso signífico comprender el flujo; SMED y TPM llegaron a ser adecuados cuando existían tiempos de cambio, fallas o baja disponibilidad y por último el análisis multivariado fue necesario cuando las características críticas de calidad presentaban una correlación entre sí.

A partir de la comparación anteriormente descrita, al momento de analizar la efectividad y las limitaciones de Lean Six Sigma con mayor fundamento, la evidencia indicó que la metodología

tuvo resultados favorables cuando se aplicó con una relación clara entre problema, herramienta e indicador. Apelando a un símil, los casos asociados con Rolling mil, fabricación de tubos, torneado de acero, prime stock y productividad del operador manifestaron mejoras cuantitativas o cualitativas que respaldaron la utilidad de la mejora continua en entorno siderúrgicos o metalmeccánicos.

No obstante, matizando estos resultados la investigación permitió establecer la frontera de que el uso de Lean Six Sigma no permite garantizar por sí misma resultados superiores en cualquier empresa del sector acero. En efecto, su desempeño dependió de condiciones previas donde la disponibilidad de datos se asociaba dentro del campo la calidad de la medición y así siendo resultante en la claridad del problema entendiendo una madurez de los sistemas de gestión y la participación del personal acompañado por la dirección; por ello, la metodología se considera más sólida desde el entendido que no se aplicó no como una “lista de herramientas” sino como una forma organizada de interpretar y transformar el proceso.

Otro aspecto relevante fue la relación entre Lean Sigma y la digitalización. Dentro de esta línea los documentos de control inteligente mostraron una tendencia de la mejora continua en el acero al momento de correlacionar la inteligencia de negocios y manufactura inteligente desplazándose hacia esquemas más apoyados en datos. Por otro lado, estos enfoques no siempre fueron Lean Six Sigma en sentido estricto, es decir, aportaron una lectura actual donde los proyectos de mejora necesitaban cada vez más trazabilidad, monitoreo en tiempo real, análisis histórico y capacidad de respuesta ante desviaciones; en concordancia la digitalización no reemplazó como tal el Lean Six Sigma, pero si amplió sus posibilidades de control y sostenimiento.

Fundamentalmente, el factor humano mantiene un papel central dentro de esta discusión debido a su factor del liderazgo, cultura organizacional y participación hablando desde el contexto

del operador, pues ello permite entablar que técnicas se sostienen cuando el personal lo entiende, logra ser adoptado y que a su vez se mantenga el cambio. Ahora bien, en industrias como el acero, aunque la operación diaria exige cumplir turnos siguiendo procesos y dominar la parte técnica para así controlar riesgos; el lado humano pasa al plano principal influyendo de manera primordial.

Desde una perspectiva académica, los hallazgos concuerdan con el propósito del hilo conductor de la investigación compuesto a partir de una lectura objetiva, es decir, qué herramientas se han utilizado aplicado sobre procesos que definen resultados y limitaciones que conllevaron a reunir documentos recientes, clasificarlos, comprar y evaluarlos bajo una misma lógica.

Teniendo una perspectiva práctica sobre el corpus documental, diversos autores sugieren que la industria siderúrgica conlleva un potencial de mitigación sobre componentes de calidad, productividad y desperdicio mediante Lean Six Sigma. Sin embargo, esto se debe focalizar dentro de un contexto donde la adopción de herramientas responda a las necesidades reales del proceso y no a una práctica mecánica. En este sentido, el efecto de estudio conlleva a diversificar las metodologías, dentro de ello DMAIC se orienta al control de la variabilidad y calidad de forma complementariamente a Lean Manufacturing para desperdicios y problemas de flujo, dejando como ultimo engranaje a las decisiones complejas que deberían tener un nivel de correlación dentro de la digitalización especialmente cuando las decisiones requieran mayor trazabilidad y sostenimiento en el tiempo.

Bajo las limitaciones del propio estudio, se manejó un índice de dependencia de información secundaria y de documentos disponibles en texto completo, esto conlleva a que el incluyera evidencia directa del acero en conjunto de documentos complementarios con el fin de ampliar el análisis. No obstante, al no haberse evaluado implementaciones propias en planta las

conclusiones se fundamentaron en los resultados reportados por la literatura revisada y no en mediciones experimentales desarrolladas por los autores de la monografía.

En síntesis, Lean Six Sigma se instauro como fuente efectiva cuando se articula con problemas determinados desde condiciones organizacionales favorables a modo de verificar indicadores verificables. Sus principales limitantes surgen cuando la evidencia fue parcial, es decir, cuando los estudios no presentaron control y trazabilidad suficiente o cuando las herramientas se analizaron sin considerar factores como la cultura organizacional, calidad en datos y complejidad técnica de los procesos siderúrgicos. En ese sentido, los resultados permitieron entender que Lean Six Sigma solo generó aportes relevantes cuando se aplicó de forma ajustada a las condiciones del proceso, con disciplina en su desarrollo y con continuidad después de la intervención inicial.

Referencias

- Agencia Nacional de Minería. (2024). panorama de la industria del acero en Colombia oportunidades y retos en la siderúrgica de aceros PLANOS. <https://www.anm.gov.co/version-2-noviembre-2024>
- Alnadi, M., & McLaughlin, P. (2021). Critical success factors of Lean Six Sigma from leaders' perspective. *International Journal of Lean Six Sigma*, 12(5), 1073–1088. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-06-2020-0079>
- Barahona, L., & Navarro, J. (2013). Mejora del proceso de galvanizado en una empresa manufacturera de alambres de acero aplicando la metodología Lean Six Sigma [Tesis de grado, Universidad Católica Del PERÚ]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/4925>
- Calderón, J., Granillo, R., Robles, F., & Gomez, H. (2025). Aplicación de redes neuronales en la industria siderúrgica. *Research Society And Development*, 14(n4). <https://doi.org/10.33448/rsd-v14i4.48712>
- Carrillo-Landazabal , M. S., Vargas-Ortiz, M. L. E., Severiche-Sierra, D. C. A., Peralta-Ordosgoitia , I. J. T., & Ortega Vélez , I. V. P. (2022). Metodología DMAIC de Lean Seis Sigma: Una revisión en el contexto del ruido industrial - sector metalmecánico. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(2), 3148-3163. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i2.2081
- Centro Europeo de Postgrado [CEUPE]. (s. f.). ¿Qué es una empresa manufacturera? Recuperado el 30 de noviembre de 2025, de <https://www.ceupe.com/blog/empresa-manufacturera.html>
- Chancasanampa Narvaez, K. W., Cueva Villaverde, J. B., Delzo Chihuan, E., & Arteaga Rojas, J. S. A. (2026). Six Sigma based management approach to minimize material losses in

- building construction. *Civil Engineering Journal*, 12(2), 714–730.
<https://doi.org/10.28991/CEJ-2026-012-02-017>
- Chaviano-Tovar, L., Del Risco-Alonso, S., Castelló-González, J., Del Risco- Alfonso, R., & Ortega-Zayas Bazán, J. (2021). La capacidad del proceso como criterio de calidad en parámetros de piezas en bruto: Caso de estudio. *Revista Cubana de Ingeniería*, 12(1), 81–88. <https://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/771>
- Congreso de la República de Colombia. (2001). Ley 697 de 2001: Por la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía y se promueve el uso de energías alternativas [Ley]. *Diario Oficial*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4449>
- Cortez Merjil, J. F., Valles Chávez, A., Parada González, M., García Castellanos, H., & Reyes Martínez, R. M. (2021). Aplicación de la metodología DMAIC de seis sigma para la reducción de defectos de cerraduras automotrices. *REVISTA IPSUMTEC*, 4(3), 9– 18. <https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v4i3.70>
- Cuggia-Jiménez, Cynthia, Orozco-Acosta, Erick, & Mendoza-Galvis, Darwin. (2020). Manufactura esbelta: una revisión sistemática en la industria de alimentos. *Información tecnológica*, 31(5), 163-172. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000500163>
- Deng, J., Sierla, S., Sun, J., & Vyatkin, V. (2022). Reinforcement learning for industrial process control: A case study in flatness control in steel industry. *Computers in Industry*, 143, Article 103748. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103748>
- Deng, J., Sierla, S., Sun, J., & Vyatkin, V. (2023). Offline reinforcement learning for industrial process control: A case study from steel industry. *Information Sciences*, 632, 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.03.019>

- Duc, M. L., Nedoma, J., Bilik, P., Martinek, R., Hlavaty, L., & Thao, N. T. P. (2023). Application of fuzzy TOPSIS and harmonic mitigation measurement on Lean Six Sigma: A case study in smart factory. *IEEE Access*, 11, 81577–81599. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3299326>
- Eryarsoy, E., Nalcioğlu, H., Kilic, H. S., Yalcin, A. S., Zaim, S., & Delen, D. (2023). A framework for mitigating excessive transportation in the context of manufacturing localization. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 31(2), 619–630. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2022.3229061>
- Furman, J., & Małysa, T. (2021). The use of lean manufacturing (LM) tools in the field of production organization in the metallurgical industry. *Metalurgija*, 60(3–4), 431–433. <https://hrcak.srce.hr/256128>
- Gajdzik, B., Wolniak, R., Grebski, W., Szymshal, J., & Grebski, M. E. (2025). Sustainability and smart manufacturing: The transformation of the steelwork industry. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781032697611>
- Ghasemibojd, F., Franchetti, M.J. & George, B. Green lean six sigma for sustainable development: a systematic review of evolution, challenges, and future pathways. *Clean Techn Environ Policy* (2025). <https://doi.org/10.1007/s10098-025-03281-y>
- Gómez, C. (2025, 30 octubre). Incertidumbres internas y externas tienen en vilo a las siderúrgicas. *Portafolio.co*. <https://www.portafolio.co/negocios/estas-son-las-preocupaciones-que-tiene-en-alerta-a-la-industria-siderurgica-643276#:~:text=C%C3%A1mara%20Colombiana%20de%20Infraestructura%20tras,20%20a%C3%B1os%20en%20el%20carga>

- González, M. Y. (2025, 6 mayo). Método Just In Time (JIT): qué es, para qué sirve y cómo aplicarlo. Slimstock. Recuperado 12 de mayo de 2026, de <https://www.slimstock.com/es/blog/just-in-time/s>
- Gültaş, M. P. (2024). Enhancing production processes in the medical industry: A Six Sigma case study with Industry 4.0 integration. *Journal of Turkish Operations Management*, 8(2), 363–373. <https://doi.org/10.56554/jtom.1395981>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2015). Norma técnica colombiana NTC-ISO 9001:2015. Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos [PDF]. ICONTEC. <https://www.guadalupanolasalle.edu.co/sgc/ISO9001-2015-Requisitos.pdf>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2015). Norma técnica colombiana NTC-ISO 14001:2015. Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso [PDF]. ICONTEC. <https://www.forpo.gov.co/es/planeacion-gestion-y-control/control-interno-1/normatividad-2/5163-ntc-iso-14001-2015/file>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020). Norma técnica colombiana NTC 2289: Barras corrugadas y lisas de acero de baja aleación, para refuerzo de concreto [PDF]. ICONTEC. <https://www.cementoscauca.com.co/wp-content/uploads/2018/08/NTC-2289-EN-PDF.pdf>
- International Organization for Standardization. (2011a). ISO 13053-1:2011— Quantitative methods in process improvement—Six Sigma—Part 1: DMAIC methodology. <https://www.iso.org/standard/52901.html>
- International Organization for Standardization. (2011b). ISO 13053-2:2011— Quantitative methods in process improvement—Six Sigma—Part 2: Tools and techniques. <https://www.iso.org/standard/52902.html>

- ISO. (2015a). ISO 9000:2015—Sistemas de gestión de la calidad. Fundamentos y vocabulario (versión en español). <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:es>
- ISO. (2015b). ISO 14001:2015—Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso (versión en español). <https://www.iso.org/standard/60857.html>
- ISO. (2015c). Gestión de la calidad: el camino hacia la mejora continua. Organización Internacional de Normalización. <https://www.iso.org/es/gestion-calidad>
- Jing, H., Muhammad, I., Fatima, F., & Rao, S. (2023). The role of Lean Six Sigma in driving Sustainable Manufacturing Practices: An analysis of the relationship between lean Six Sigma principles, data-driven decision making, and environmental performance. *Frontiers In Environmental Science*, Volume 11-2023. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1184488>
- Koul, S., Samantaray, P., & Atul, V. (2021). Reductions in the prime stock for sales generation in steel industry: A lean approach using DMAIC tools. *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 27(1), 23–44. <https://doi.org/10.46970/2021.27.1.2>
- La República. (2021, 11 agosto). La industria de acero genera 45.000 empleos y es fundamental para la reactivación. *Diario la República*. <https://www.larepublica.co/economia/la-industria-de-acero-genera-45-000-empleos-y-es-fundamental-para-la-reactivacion-3215442#:~:text=Esta%20industria%20tambi%C3%A9n%20es%20clave,de%20los%20empleos>
- Lestari, Fitra & Kurniawan, Rahmad & Ismail, Kamariah & Abdul Hamid, Abu Bakar. (2020). Supply chain relationship in a downstream sector. *Uncertain Supply Chain Management*. 423-438. <https://doi.org/10.5267/j.uscm.2019.10.002>
- Marín-Calderón, A.V., Valenzuela-Galván, M., Cuamea-Cruz, G., Brau-Ávila, A., (2023). Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para disminuir desperdicios en una unidad

- de fabricación de paneles modulares de poliestireno. Ingeniería Investigación y Tecnología, 24 (01), 1-12. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2023.24.1.007>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s. f.). *Producción y consumo sostenible* - . <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/produccion-y-consumo-sostenible/>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial & Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes. (2010). Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10 [PDF]. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. <https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3871-10684.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente. (1997). Política nacional de producción más limpia [PDF]. Ministerio del Medio Ambiente. https://oab.ambientebogota.gov.co/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/11/politica_nacional_de_produccion_mas_limpia.pdf
- Mokrzycki, E. & Gawlik, L. (2025). Possibilities of reducing greenhouse gas emissions in the steel industry. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 19(11), 489–501. <https://doi.org/10.12913/22998624/209894>
- Otero Bracamonte, J., & Castañeda Sanabria, A. (2024). Impacto de la implementación del enfoque Lean Seis Sigma en una empresa manufacturera para lograr su permanencia en el mercado. *Revista Ingeniería Industrial: Actualidad y Nuevas Tendencias*, 17(33), 49–62. <https://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/Inge-Industrial/vol9-n33/art03.pdf>
- Panchal, G., Clegg, B., Koupaie, E. E., Masi, D., & Collis, I. (2024). Digital transformation and business intelligence for a SME: Systems thinking action research using ProOH modelling. *Procedia Computer Science*, 232, 1809–1818. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.003>

- Peruchi, R. S., Rotela Junior, P., Brito, T. G., Paiva, A. P., Balestrassi, P. P., & Araújo, L. M. M. (2020). Integrating multivariate statistical analysis into Six Sigma DMAIC projects: A case study on AISI 52100 hardened steel turning. *IEEE Access*, 8, 34246–34255. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2973172>
- Porras Guzmán, C. A., & Sierra-Liñan, F. (2025). Design and implementation of a management model with a focus on the operator to improve productivity in the steel industry. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 73(11), 64–78. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V73I11P106>
- Presidencia de la República de Colombia. (2008). Decreto 1299 de 2008: Por el cual se reglamenta el departamento de gestión ambiental de las empresas a nivel industrial y se dictan otras disposiciones [Decreto]. *Diario Oficial*. https://corporinoquia.gov.co/images/docsPdf/decreto_1299_2008.pdf
- Rathi, S. S., Sahu, M. K., & Kumar, S. (2024). Implementation of lean manufacturing methods to improve rolling mill productivity. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, 11(111), 243–256. <https://doi.org/10.19101/IJATEE.2023.10102004>
- Rodríguez-Noe, C. S., Rodríguez-Risco, N. Y., & Quiroz-Flores, J. C. (2024). Enhancing profitability in a Peruvian construction company: A Lean Manufacturing and human resources approach. In *Proceedings of the 5th South American Industrial Engineering and Operations Management Conference*. IEOM Society International. <https://doi.org/10.46254/SA05.20240241>
- Ruge, J. (2023). Apoyo técnico en el desarrollo del análisis de ciclo de vida (ACV) para el proceso de elaboración de una cubierta arquitectónica galvanizada y una cubierta arquitectónica

- galvanizada pre-pintada para la Empresa Casostenible S.A.S. [Trabajo de grado de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas].
https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UDISTRITA2_e4322a699c5f8c5520f93042ed247e06
- Salwin, M., Jacyna-Gółda, I., Bańka, M., Varanchuk, D., & Gavina, A. (2021). Using value stream mapping to eliminate waste: A case study of a steel pipe manufacturer. *Energies*, 14(12), Article 3527. <https://doi.org/10.3390/en14123527>
- Sociedad Colombiana de Arquitectos. (2023, 3 octubre). Panorama del acero en Colombia – SCA. <https://sociedadcolombianadearquitectos.org/panorama-del-acero-en-colombia-desde-la-perspectiva-de-la-directora-ejecutiva-del-comite-de-productores-de-acero-de-la-andi/#:~:text=Adem%C3%A1s%2C%20destaca%20que%20el%20acero,Reforzar%20el%20Futuro%20de%20Colombia>
- World Steel Association. (2023). World Steel in Figures 2023. Brussels, Belgium. Recuperado de <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2023/>