Improving the Industrial Services Procurement Process Through Lean Six Sigma: A Case Study of a Peruvian Steel Manufacturing Company

Torres-Velásquez Julio Winston, Master in Operations and Supply Chain Management[1]
[1]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, *c23976@utp.edu.pe*

Abstract– ***The objective of this study was to determine the effect of Lean Six Sigma on the performance of the industrial services procurement process in a Peruvian steel manufacturing company. An applied, quantitative, longitudinal, and pre-experimental study was conducted using a pretest-posttest design. The census population comprised 360 procurement records: 180 before and 180 after the intervention. The DMAIC methodology integrated SIPOC, voice of the customer, value stream mapping, Pareto analysis, Ishikawa diagrams, the five whys, standardization, digital poka-yoke, parallel approvals, and statistical process control. Lead time decreased from 18.74 to 9.38 days (49.95%); returned requests declined from 22.78% to 6.67%; late quotations from 31.67% to 10.00%; and purchase orders containing errors from 12.22% to 2.78%. DPMO decreased from 222,222.22 to 64,814.81, the sigma level increased from 2.26 to 3.02, and process yield rose from 56.67% to 83.89%. The lead time reduction was statistically significant (Welch's $t = 18.05$; $p < 0.001$; Hedges' $g = 1.90$). The economic evaluation yielded an NPV of PEN 46,624.87, an IRR of 52.39%, a benefit-cost ratio of 1.53, and a payback period of 16.43 months. It was concluded that DMAIC reduced waste and variability, improving the efficiency and economic feasibility of the process.***

Keywords-- ***Lean Six Sigma, DMAIC, service procurement, lead time, DPMO***

Mejora del proceso de compras de servicios industriales mediante Lean Six Sigma: un estudio de caso en una empresa siderometalúrgica del Perú

Torres-Velásquez Julio Winston, Magister en Dirección de Operaciones y Cadena de Abastecimiento[1]
[1]Universidad Tecnológica del Perú, Perú, c23976@utp.edu.pe

Resumen*– El objetivo de esta investigación fue determinar el efecto de Lean Six Sigma sobre el desempeño del proceso de compras de servicios industriales en una empresa siderometalúrgica peruana. Se desarrolló un estudio aplicado, cuantitativo, longitudinal y preexperimental, con diseño pretest-postest. La población censal comprendió 360 expedientes: 180 antes y 180 después de la intervención. La metodología DMAIC integró SIPOC, voz del cliente, mapeo de flujo de valor, Pareto, Ishikawa, cinco porqués, estandarización, poka-yoke digital, aprobaciones paralelas y control estadístico. El lead time disminuyó de 18.74 a 9.38 días (49.95%); las solicitudes devueltas, de 22.78% a 6.67%; las cotizaciones fuera de plazo, de 31.67% a 10.00%; y las órdenes con errores, de 12.22% a 2.78%. El DPMO se redujo de 222,222.22 a 64,814.81, el nivel sigma aumentó de 2.26 a 3.02 y el yield de 56.67% a 83.89%. La reducción del lead time fue significativa (t de Welch = 18.05; $p < 0.001$; g de Hedges = 1.90). La evaluación económica obtuvo un VAN de S/ 46,624.87, una TIR de 52.39%, una relación beneficio/costo de 1.53 y una recuperación de 16.43 meses. Se concluye que DMAIC redujo desperdicios y variabilidad, mejorando la eficiencia y viabilidad económica del proceso.

***Palabras clave*-- Lean Six Sigma, DMAIC, compras de servicios, lead time, DPMO**

I. Introducción

Los procesos de compras de servicios industriales conectan la necesidad técnica del usuario interno con la definición del alcance, la búsqueda y evaluación de proveedores, la negociación, las aprobaciones y la emisión de la orden de compra. Aunque su producto inmediato es documental, su desempeño condiciona la continuidad operativa, el cumplimiento de mantenimientos, la disponibilidad de contratistas y el costo total de abastecimiento. En entornos siderometalúrgicos, donde coexisten servicios rutinarios, especializados y críticos, una demora administrativa puede trasladarse a paradas, atenciones de emergencia, mayores costos de transacción y exposición a riesgos operacionales. Por ello, el lead time, la calidad de la información y la trazabilidad constituyen dimensiones relevantes del desempeño de compras.

Lean Six Sigma (LSS) integra la eliminación de desperdicios y la mejora del flujo, propias de Lean, con la reducción de variación y defectos característica de Six Sigma. Los estudios iniciales en organizaciones de servicios mostraron que el enfoque puede aplicarse a procesos intangibles siempre que las necesidades del cliente se traduzcan en características críticas para la calidad y en indicadores observables [1], [2]. La literatura posterior ha explicado la complementariedad de ambas filosofías y la evolución hacia un sistema integrado de mejora continua [3]-[7]. En este marco, DMAIC proporciona una secuencia disciplinada para definir el problema, medir una línea base confiable, analizar causas raíz, implementar soluciones y establecer controles que impidan la regresión del proceso.

La consolidación teórica de LSS se sustenta en revisiones que distinguen su dimensión estadística, gerencial y cultural, y advierten que sus resultados dependen de la selección del proyecto, la calidad de los datos y la capacidad organizacional para sostener el cambio [8], [9]. Las revisiones multisectoriales muestran una expansión desde la manufactura hacia servicios, salud, educación, logística y administración, aunque también identifican heterogeneidad en las métricas, los diseños de evaluación y los horizontes de seguimiento [10], [11]. En particular, la evidencia en servicios destaca el valor de definir correctamente la unidad de análisis, la oportunidad de defecto y la voz del cliente interno, porque el desperdicio suele adoptar la forma de espera, transferencia de información, validación repetida y retrabajo documental [12].

La transferibilidad de LSS a procesos administrativos se observa en estudios de banca, servicios logísticos, salud ambulatoria, administración pública, industria alimentaria y mantenimiento aeronáutico [13]-[19]. Aunque los contextos difieren, estos trabajos convergen en tres mecanismos: visualización integral del flujo, prevención de errores en los puntos de entrada y gestión sistemática de colas y traspasos. Esta evidencia resulta pertinente para compras de servicios, donde el resultado depende de la coordinación entre usuarios técnicos, compradores, finanzas, legal, seguridad y proveedores, y no exclusivamente de la productividad de una sola persona o área.

En la cadena de suministro, LSS ha sido utilizado para mejorar almacenes, reducir costos logísticos, acortar la selección de proveedores y fortalecer la gestión de operaciones de distribución [14], [20]-[25]. El estudio de Tay y Aw [22] es especialmente cercano al problema de investigación porque vincula DMAIC con la selección y contratación de proveedores logísticos y resalta la visibilidad de la información, la estandarización y la comunicación entre actores.

Sin embargo, la literatura también reporta barreras asociadas con estructuras funcionales, datos fragmentados, resistencia al cambio y ausencia de gobernanza transversal [23], [24]. En consecuencia, una intervención sobre compras debe combinar herramientas técnicas con responsabilidades, reglas de decisión y mecanismos de seguimiento.

La sostenibilidad de LSS no depende únicamente del uso de herramientas. Los estudios sobre factores críticos coinciden en la importancia del patrocinio directivo, la vinculación con la estrategia, la formación del equipo, la disponibilidad de datos, la gestión del cambio y la disciplina de control [26]-[30]. De manera complementaria, los factores de fracaso incluyen proyectos mal delimitados, soluciones sin responsables, escasez de recursos y pérdida de seguimiento luego de la fase Mejorar [27].

El estudio se desarrolló en una empresa siderometalúrgica peruana con compras recurrentes de mantenimiento, limpieza industrial, izaje, transporte, inspección y servicios especializados. El diagnóstico inicial identificó solicitudes incompletas, cotizaciones recibidas después del cierre, secuencias de aprobación extensas y errores en las órdenes de compra. Estas fallas generaban esperas y reprocesos que reducían la capacidad de respuesta de abastecimiento y afectaban el cumplimiento de las fechas requeridas por las áreas usuarias. La concentración de evidencia previa en otros sectores y la menor cantidad de estudios sobre el ciclo integral de compras de servicios industriales configuran el espacio aplicado que aborda esta investigación.

La pregunta general fue: ¿cuál es el efecto de la aplicación de Lean Six Sigma sobre el desempeño del proceso de compras de servicios industriales de una empresa siderometalúrgica peruana?

La hipótesis estableció que la intervención reduciría de manera estadísticamente significativa el lead time y las tasas de solicitudes devueltas, cotizaciones fuera de plazo y órdenes de compra con errores; asimismo, disminuiría el DPMO e incrementaría el nivel sigma y el yield del proceso.

La contribución del estudio es práctica y metodológica. En el plano práctico, se implementó una arquitectura de mejora que articula controles de calidad de entrada, segmentación de servicios, gestión de RFQ, aprobaciones paralelas, poka-yoke digital y un tablero de SLA.

En el plano metodológico, se mantuvo consistencia entre expediente, defecto y oportunidad; se diferenciaron el yield de oportunidad y el yield del proceso; y se combinaron pruebas de significancia con tamaño del efecto, estabilidad del proceso y evaluación económica. De este modo, el estudio ofrece evidencia cuantitativa y una ruta replicable para procesos administrativos de abastecimiento con características semejantes.

A. Objetivo general

Determinar el efecto de la aplicación de Lean Six Sigma sobre el desempeño del proceso de compras de servicios industriales en una empresa siderometalúrgica peruana.

B. Objetivos específicos

1. Diagnosticar el desempeño inicial del proceso mediante lead time, solicitudes devueltas, cotizaciones fuera de plazo, órdenes de compra con errores, DPMO, nivel sigma y yield.
2. Identificar y priorizar las causas raíz que explican las esperas, la variabilidad y los defectos administrativos del proceso.
3. Diseñar e implementar mejoras Lean Six Sigma en las etapas de ingreso, validación, RFQ, evaluación, aprobación y emisión de órdenes de compra.
4. Comparar estadísticamente los indicadores pretest y postest para estimar la magnitud del efecto de la intervención.
5. Establecer un plan de control y evaluar la viabilidad económica de la solución propuesta.

II. Métodos y Procedimientos

A. Diseño de la investigación

La investigación fue aplicada, con enfoque cuantitativo y diseño preexperimental longitudinal de un solo proceso con mediciones antes y después. La intervención correspondió a X = aplicación de DMAIC; O1 representó la medición pretest y O2 la medición postest. El esquema fue O1 - X - O2. La ausencia de grupo de control limita la atribución causal absoluta, por lo que los resultados se interpretan como evidencia interna del proceso analizado y no como una estimación generalizable a toda empresa industrial.

Tabla I.
Diseño Metodológico De La Investigación

Elemento	Especificación
Tipo y enfoque	Aplicada; cuantitativa
Diseño	Preexperimental longitudinal, un solo proceso
Esquema	O1 - X - O2
Unidad de análisis	Expediente de compra de servicio industrial
Intervención	Lean Six Sigma mediante DMAIC
Variable de resultado	Desempeño del proceso de compras de servicios
Nivel de confianza	95%; alfa = 0.05

La Tabla I resume la correspondencia entre el problema, la intervención y la variable de resultado. Esta coherencia permite interpretar O2 respecto de O1 bajo una misma unidad de análisis, condiciones de inclusión y nivel de confianza. Aunque el diseño no incorpora grupo de control, la definición longitudinal y el censo por período fortalecen la comparabilidad interna.

B. Contexto, población y muestra

La población estuvo constituida por 360 expedientes de compras de servicios industriales procesados por una misma unidad de abastecimiento. El pretest comprendió 180 expedientes de septiembre a noviembre de 2025; la intervención se desarrolló entre diciembre de 2025 y enero de 2026; y el postest incluyó 180 expedientes de febrero a abril de 2026. Se empleó censo por período. Se incluyeron solicitudes con alcance técnico aprobado, al menos un evento de cotización y orden de compra emitida. Se excluyeron emergencias

operativas, compras directas por exclusividad documentada, ampliaciones contractuales y expedientes anulados por decisión del usuario.

TABLA II.
POBLACIÓN Y PERIODOS DE MEDICIÓN

Medición	Periodo de medición	Expedientes	Cobertura
Pretest	Septiembre 2025 - Noviembre 2025	180	100% de elegibles
Intervención	Diciembre 2025 - Enero 2026	No aplica	Diseño e implementación
Postest	Febrero 2026 – Abril 2026	180	100% de elegibles
Total analizado	Seis meses de medición	360	Censo por periodo

C. Técnicas, instrumentos y calidad de medición

Se utilizaron análisis documental, observación del proceso y entrevistas semiestructuradas a clientes internos. Los instrumentos fueron una ficha de extracción de marcas de tiempo, una lista de verificación de defectos, una guía de observación y una matriz de causas.

La validez de contenido fue evaluada mediante juicio de tres especialistas en abastecimiento, mejora de procesos y estadística aplicada. Para la clasificación de defectos, dos evaluadores revisaron de forma independiente 30 expedientes y se obtuvo kappa de Cohen = 0.91, interpretado como acuerdo casi perfecto. Las marcas de tiempo del ERP se consideraron trazables y no editables por el analista.

D. Variables e indicadores

La variable independiente fue la aplicación de Lean Six Sigma, operacionalizada mediante el cumplimiento de las cinco fases DMAIC. La variable dependiente fue el desempeño del proceso, medido con siete indicadores. Para el cálculo de DPMO se definieron tres oportunidades de defecto por expediente: (1) solicitud completa al primer envío, (2) paquete de cotización recibido dentro del plazo y (3) orden de compra emitida sin error.

$$Lead\ time\ (días) = Fecha\ OC - Fecha\ de\ recepción\ de\ solicitud \quad (1)$$

$$DPMO = \frac{Defectos}{(Expedientes\ x\ Oportunidad\ por\ expediente)} x\ 1{,}000{,}000 \quad (2)$$

$$Nivel\ Sigma = NORM.S.INV\left(1 - \frac{DPMO}{1{,}000{,}000}\right) + 1.5 \quad (3)$$

$$Yield\ del\ proceso = \frac{Expedientes\ sin\ ningun\ defecto}{Expedientes\ totales}\ x\ 100 \quad (4)$$

La operacionalización integra indicadores de rapidez, frecuencia de defectos y capacidad. El lead time representa el resultado temporal global; las tres tasas localizan puntos de falla; y DPMO, nivel sigma y yield sintetizan la conformidad. Mantener tres oportunidades constantes por expediente garantiza que la comparación pretest-postest utilice el mismo denominador conceptual. (Ver Tabla III)

TABLA III.
MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE INDICADORES

Indicador	Definición operacional	Fórmula
Lead time	Días calendario desde la recepción completa hasta la liberación de la OC	Días
Solicitudes devueltas	Expedientes rechazados por omisión o inconsistencia del requerimiento	$\frac{Devueltas}{Total} x\ 100$
Cotizaciones fuera de plazo	Expedientes con al menos una cotización requerida recibida después del cierre	$\frac{Fuera\ de\ plazo}{Total} x100$
OC con errores	Órdenes con corrección posterior por precio, moneda, impuesto, fecha o alcance	$\frac{OC\ erradas}{Total} x100$
DPMO	Defectos por millón de oportunidades	$\frac{Defectos}{Nx3} x1{,}000{,}000$
Nivel sigma	Capacidad equivalente con desplazamiento de 1.5 sigma	Z del yield de oportunidad + 1.5
Yield del proceso	Expedientes que atraviesan las tres oportunidades sin defecto	$\frac{Sin\ defecto}{Total} x\ 100$

E. Plan de análisis estadístico

El análisis descriptivo incluyó media, desviación estándar, frecuencias, proporciones e intervalos de confianza. El lead time se comparó mediante t de Welch, adecuada ante varianzas diferentes y muestras de igual tamaño; la magnitud se expresó con g de Hedges. Las tasas de defectos se contrastaron mediante pruebas z para dos proporciones. Se adoptó alfa = 0.05 y se reportaron p-valores bilaterales. Para controlar la estabilidad posterior se utilizó una carta de individuales basada en medias semanales, con límites calculados a partir del rango móvil. Los cálculos de capacidad se realizaron con tres oportunidades de defecto constantes por expediente.

III. IMPLEMENTACIÓN



Fig. 1. Ruta DMAIC aplicada al proceso de compras de servicios industriales.

A. Fase Definir

El acta del proyecto definió como problema la variabilidad y extensión del tiempo de atención, acompañada de defectos documentales. La voz del cliente interno priorizó tres necesidades: conocer el estado de la solicitud, recibir la orden antes de la fecha requerida y evitar devoluciones por requisitos que pudieran validarse al inicio.

Estas necesidades se tradujeron en CTQ: lead time menor o igual a 10 días en promedio, tasa de solicitudes devueltas menor o igual a 8% del total, cotizaciones fuera de plazo menor o igual a 12% del total de cotizaciones atendidas y órdenes con error menor o igual a 3% del total de órdenes.

TABLA IV.
PROJECT CHARTER

Componente	Definición
Problema	Lead time elevado, esperas interáreas y defectos recurrentes en expedientes y órdenes
Meta	Reducir el lead time al menos 40% y alcanzar 3.0 sigma en seis meses
Alcance inicial	Desde recepción de solicitud completa hasta liberación de la OC
Patrocinador	Gerencia de Cadena de Suministro
Líder	Responsable de compras de servicios
Equipo	Compras, usuarios técnicos, finanzas, legal, TI y maestros de proveedores

El project charter delimitó el problema, la meta, el alcance y las responsabilidades del proyecto. La exclusión de ejecución contractual, valorizaciones, pagos y emergencias evitó mezclar actividades con reglas y tiempos diferentes. A partir de esta delimitación, el SIPOC permitió representar las relaciones entre actores, entradas, decisiones y resultados del flujo de compra.

TABLA V
SIPOC DEL PROCESO

Proveedores	Entradas	Etapas del proceso	Salidas	Clientes
Área usuaria; Mantenimiento; Operaciones	Necesidad del servicio; TDR o alcance técnico; plazo requerido; criterios de aceptación	**1. Recepción y registro:** recibir el requerimiento, verificar su integridad y asignar responsables	Requerimiento registrado; expediente inicial; cronograma de contratación	Área usuaria; Compras
Área usuaria; Finanzas; Control de Gestión	Presupuesto disponible; centro de costo; estimación económica; prioridad del requerimiento	**2. Validación:** revisar el alcance, confirmar la disponibilidad presupuestal y subsanar información incompleta	Requerimiento validado; presupuesto confirmado; observaciones atendidas	Área usuaria; Finanzas; Compras
Base de proveedores; proveedores invitados; Abastecimiento	Lista de proveedores; especificaciones técnicas; condiciones comerciales; cronograma de cotización	**3. Solicitud de ofertas:** seleccionar proveedores, enviar invitaciones y absolver consultas	Cotizaciones técnicas y económicas; registro de consultas; propuestas consolidadas	Compras; Área usuaria
Proveedores; Área usuaria; Seguridad; Legal	Propuestas recibidas; criterios técnicos; precios; experiencia; documentación legal y de seguridad	**4. Evaluación:** comparar ofertas, verificar el cumplimiento técnico y analizar las condiciones económicas	Cuadro comparativo; evaluación técnica; análisis económico; recomendación de adjudicación	Área usuaria; Finanzas; Comité aprobador
Área usuaria; Finanzas; Jefaturas autorizadas	Cuadro comparativo; recomendación; presupuesto; niveles de autorización	**5. Aprobación:** gestionar las conformidades técnicas, económicas y administrativas	Aprobación documentada; proveedor adjudicado; condiciones finales negociadas	Compras; Área usuaria; Proveedor adjudicado
Compras; Legal; proveedor adjudicado	Aprobación final; datos del proveedor; términos comerciales; condiciones contractuales	**6. Formalización:** crear, revisar, aprobar y liberar la orden de compra	Orden de compra liberada; contrato o anexos, cuando corresponda; comunicación de adjudicación	Proveedor; Área usuaria; Mantenimiento; Operaciones
Compras; proveedor; Área usuaria	Orden de compra; expediente de contratación; comunicaciones y aprobaciones	**7. Cierre y trazabilidad:** comunicar el inicio, archivar documentos y dejar evidencia de las decisiones	Expediente completo; trazabilidad documental; información para seguimiento y control	Auditoría; Finanzas; Área usuaria; Gestión de proveedores

El SIPOC ampliado evidencia que el proceso es transversal: ninguna etapa depende exclusivamente de Compras. Las salidas intermedias de una fase se convierten en entradas de la siguiente, por lo que una omisión temprana se propaga hacia la cotización, evaluación o emisión. Esta lectura justificó intervenir tanto la calidad de entrada como las colas interáreas y la trazabilidad documental.

B. Fase Medir

El mapa del estado inicial separó tiempo de proceso y tiempo de espera. De los 18.74 días de lead time, solo 4.65 días correspondían a actividades de procesamiento; 14.09 días eran espera, equivalentes a 75.19% del ciclo. La eficiencia del ciclo de proceso (PCE) fue 24.81%. La mayor espera se concentró en RFQ y en la evaluación-aprobación.

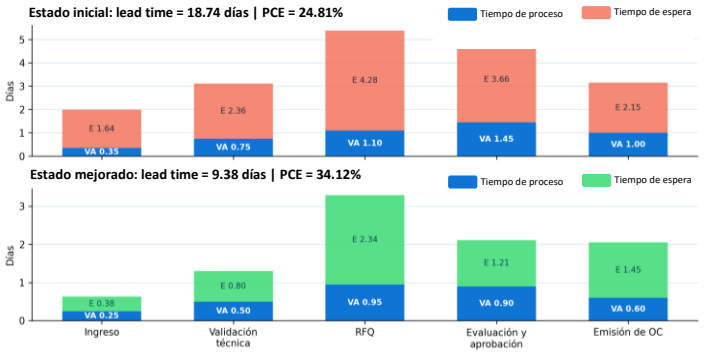


Fig. 2. Mapa del estado inicial y mejorado. VA: tiempo de proceso; E: espera.

TABLA VI
LÍNEA BASE DEL PROCESO

Indicador	Resultado pretest	Meta CTQ	Brecha
Lead time	18.74	Menor o igual a 10.00 días	8.74 días
Solicitudes devueltas	22.78%	Menor o igual a 8.00%	14.78 pp
Cotizaciones fuera de plazo	31.67%	Menor o igual a 12.00%	19.67 pp
OC con errores	12.22%	Menor o igual a 3.00%	9.22 pp
DPMO	222,222.22	Menor o igual a 66,807	155,415.22
Nivel sigma	2.26	Mayor o igual a 3.00	-0.74
Yield del proceso	56.67%	Mayor o igual a 80.00%	-23.33 pp

La Tabla VI evidencia que, durante el pretest, ninguno de los indicadores alcanzó la meta CTQ establecida. El lead time superó el objetivo en 8.74 días, mientras que la mayor brecha entre los indicadores porcentuales correspondió a las cotizaciones fuera de plazo, con 19.67 puntos porcentuales. Asimismo, el DPMO excedió el límite previsto en 155,415.22 defectos por millón de oportunidades, lo que se reflejó en un nivel sigma de 2.26, inferior en 0.74 puntos al valor esperado. Por su parte, el yield del proceso alcanzó únicamente el 56.67%, situándose 23.33 puntos porcentuales por debajo de la meta.

En conjunto, estos resultados muestran que el proceso presentaba inicialmente deficiencias simultáneas en tiempo de atención, calidad documental y capacidad, lo que justificó la aplicación de Lean Six Sigma para reducir esperas, reprocesos y errores administrativos.

C. Fase Analizar

Se registraron 147 ocurrencias de causa en expedientes retrasados o defectuosos. El Pareto indicó que las cuatro primeras causas concentraron 83.0% de los eventos: alcance o TDR incompleto, aprobaciones secuenciales, RFQ sin alertas de vencimiento y digitación duplicada. El Ishikawa agrupó las causas en método, personas, tecnología, información y gobierno. Los cinco porqués mostraron que la devolución no se originaba solo en descuido del usuario, sino en la ausencia de un control de calidad de entrada con campos obligatorios y reglas según la categoría de servicio.

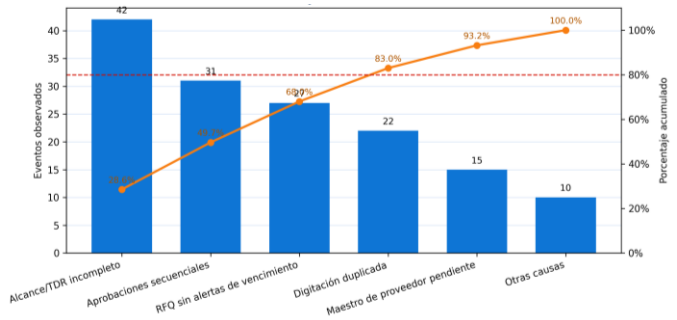


Fig. 3. Priorización de causas del retraso y los defectos administrativos.

La priorización de causas permitió asignar cada mejora a un mecanismo verificable. Las cuatro causas críticas y altas reunieron 122 de las 147 ocurrencias; por ello, la intervención se concentró en estandarización del TDR, paralelización de aprobaciones, alertas de RFQ y eliminación del reingreso manual, en lugar de distribuir esfuerzos entre causas de baja incidencia.

TABLA VII.
CAUSAS RAÍZ Y EVIDENCIA OBSERVADA

Causa raíz	Evidencia	Efecto principal	Prioridad
TDR sin estándar por categoría	42 ocurrencias (28.6%)	Devolución y retrabajo	Crítica
Aprobaciones completamente secuenciales	31 ocurrencias (21.1%)	Espera entre responsables	Crítica
RFQ sin alertas ni suplentes	27 ocurrencias (18.4%)	Cotización fuera de plazo	Alta
Reingreso manual de información	22 ocurrencias (15.0%)	Errores en la OC	Alta
Alta tardía de proveedor	15 ocurrencias (10.2%)	Bloqueo de emisión	Media
Otras causas	10 ocurrencias (6.8%)	Variabilidad residual	Baja

D. Fase Mejorar

La solución combinó rediseño del flujo y prevención de errores. Se creó un formulario digital de ingreso con campos obligatorios, catálogos de alcance y validación de presupuesto; se clasificaron los servicios en estándar, especializado y crítico para asignar rutas y SLA diferenciados; se reemplazaron aprobaciones innecesariamente secuenciales por revisiones paralelas cuando no existía dependencia lógica; se incorporaron recordatorios de RFQ a 48 y 12 horas; y se configuró una plantilla de OC con datos heredados del expediente y reglas para moneda, impuestos, vigencia y fechas.

TABLA VIII.
PORTAFOLIO DE MEJORAS IMPLEMENTADAS

Mejora	Desperdicio/causa	Mecanismo	Responsable
Formulario de requerimiento por categoría	Defectos de entrada	Campos obligatorios y checklist CTQ	Usuario / Compras
Ruta rápida para servicios estándar	Espera y sobreprocesamiento	Ruta abreviada bajo criterios de riesgo	Jefatura de Compras
Aprobaciones paralelas	Colas entre áreas	RACI y tareas simultáneas	Finanzas / Legal / Usuario
Gestión visual de RFQ	Cotizaciones tardías	Temporizador, alertas y proveedor alterno	Comprador
Poka-yoke en la OC	Errores de digitación	Herencia de datos y validaciones	TI / Compras
Tablero de SLA	Falta de trazabilidad	Semáforo, antigüedad de expedientes y alertas	Responsible de proceso

El VSM del estado mejorado registró 3.20 días de procesamiento y 6.18 días de espera, para un lead time total de 9.38 días. La reducción de la espera fue 56.14%, mientras la PCE aumentó de 24.81% a 34.12%. El cambio muestra que la intervención actuó principalmente sobre colas, traspasos y reprocesos. La PCE resultante no supone eliminar todos los tiempos sin valor, porque permanecen controles corporativos, técnicos y regulatorios necesarios.

E. Fase Controlar

El plan de control asignó dueño, frecuencia, límites y reacción para cada CTQ. Se estableció revisión semanal del aging, auditoría mensual de expedientes, actualización trimestral de plantillas y revisión semestral de la ruta de aprobaciones. La regla de reacción exige análisis inmediato cuando el promedio semanal supera el límite superior, cuando dos semanas consecutivas exceden el SLA o cuando cualquiera de las tasas de defecto supera su umbral.

TABLA IX
PLAN DE CONTROL DE RESULTADOS

KPI	Meta / límite	Frecuencia	Dueño	Acción de reacción
Lead time	Media menor o igual a 10 días.	Semanal	Jefe de Compras	Revisar expedientes fuera de control y causa especial
Solicitudes devueltas	Menor o igual a 8%	Mensual	Responsable del proceso	Auditar formulario y retroalimentar usuario
Cotizaciones tardías	Menor o igual a 12%	Mensual	Comprador	Activar suplente y revisar plazo de mercado
OC con errores	Menor o igual a 3%	Mensual	Analista de Compras	Bloquear causa y actualizar regla poka-yoke
Nivel sigma	Mayor o igual a 3.00	Mensual	Analista CI	Abrir mini-DMAIC si cae dos periodos
Yield	Mayor o igual a 80%	Mensual	Responsable del proceso	Pareto de expedientes defectuosos

El plan de control transforma cada resultado en una responsabilidad operativa. Las metas se vincularon con una frecuencia y una acción de reacción específica, lo que facilita distinguir variación común de causas especiales. El uso combinado de SLA, auditorías y carta de control reduce el riesgo de que la mejora dependa solamente de seguimiento informal.

La combinación de límites de control y metas de gestión permite dos lecturas complementarias: la carta identifica señales estadísticas de causa especial, mientras el SLA evalúa el compromiso de servicio. Por ello, un período puede permanecer bajo control y, aun así, requerir mejora si su promedio excede la meta; de forma inversa, un promedio favorable puede ocultar eventos atípicos que deben investigarse.

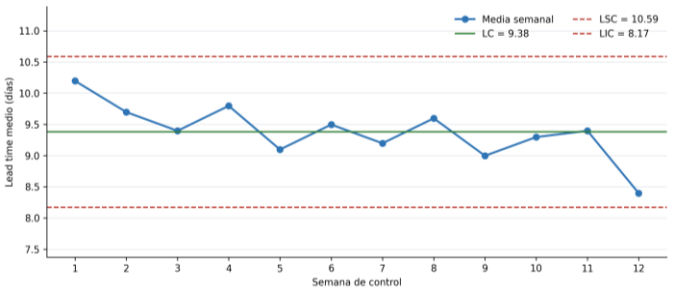


Fig. 4. Carta de individuales del lead time medio semanal posterior a la mejora.

Las 12 medias semanales observadas se mantuvieron entre LIC = 8.17 y LSC = 10.59 días, sin puntos fuera de control. El comportamiento evidencia estabilidad estadística durante el período evaluado y ausencia de causas especiales detectables. No obstante, el horizonte de 12 semanas exige mantener el monitoreo para confirmar la sostenibilidad ante cambios de demanda, mezcla de servicios y proveedores.

IV. RESULTADOS

A. Comparación de indicadores

La Tabla X resume la comparación pretest-postest. Todos los indicadores avanzaron en la dirección esperada. El lead time se redujo 49.95%, superando la meta mínima de 40%. Las mayores disminuciones relativas se observaron en órdenes de compra con errores (77.27%) y solicitudes devueltas (70.73%). El nivel sigma superó el umbral de 3.0 y el yield aumentó 27.22 puntos porcentuales.

TABLA X.
RESULTADOS PRETEST Y POSTEST

Indicador	Pretest	Postest	Variación	Cumplimiento
Lead time	18.74 días	9.38 días	-49.95%	Sí
Solicitudes devueltas	22.78% (41)	6.67% (12)	-70.73%	Sí
Cotizaciones fuera de plazo	31.67% (57)	10.00% (18)	-68.42%	Sí
OC con errores	12.22% (22)	2.78% (5)	-77.27%	Sí
DPMO	222,222.22	64,814.81	-70.83%	Sí
Nivel sigma	2.26	3.02	+0.75	Sí
Yield del proceso	56.67%	83.89%	+27.22 pp	Sí

El cumplimiento simultáneo de las siete metas muestra una mejora balanceada. La reducción del lead time no estuvo acompañada de deterioro de calidad; por el contrario, las tres tasas de defecto descendieron y los indicadores agregados de capacidad mejoraron. Esta consistencia respalda que el rediseño actuó sobre el sistema y no solo sobre una actividad aislada.

B. Validación estadística

El lead time pretest presentó media = 18.74 días y DE = 6.21; el postest, media = 9.38 y DE = 3.14. La diferencia media fue 9.36 días (IC95%: 8.34 a 10.38). La t de Welch fue 18.05, con 264.91 grados de libertad y $p < 0.001$. La g de Hedges = 1.90 indicó un efecto muy grande. Las comparaciones de proporciones también fueron significativas.

La Tabla XI confirma que la magnitud observada supera la variación esperable por muestreo. Además de la significancia de las pruebas, el intervalo de confianza del lead time no incluye cero y el tamaño del efecto es elevado. Las diferencias en proporciones expresadas en puntos porcentuales permiten interpretar el impacto práctico de cada mejora.

TABLA XI
PRUEBAS DE HIPÓTESIS

Indicador	Estadístico	p-valor	Magnitud	Decisión
Lead time	t = 18.05	< 0.001	Diferencia 9.36 días; g = 1.90	Significativo
Solicitudes devueltas	z = 4.31	< 0.001	Diferencia 16.11 pp	Significativo
Cotizaciones fuera de plazo	z = 5.06	< 0.001	Diferencia 21.67 pp	Significativo
OC con errores	z = 3.40	< 0.001	Diferencia 9.44 pp	Significativo
Unidades con defecto	z = 5.65	< 0.001	Diferencia 27.22 pp	Significativo

C. Nivel sigma, DPMO y yield

El pretest acumuló 120 defectos en 540 oportunidades; el postest, 35 defectos en igual número de oportunidades. Por ello, el DPMO pasó de 222,222.22 a 64,814.81. El yield de oportunidad aumentó de 77.78% a 93.52%. Este indicador no debe confundirse con el yield del proceso: el primero considera oportunidades individuales; el segundo exige que el expediente complete las tres CTQ sin ningún defecto. Así, el yield del proceso pasó de 102/180 = 56.67% a 151/180 = 83.89%.

TABLA XII
CONSISTENCIA DE MÉTRICAS SIX SIGMA

Métrica	Pretest	Postest
Expedientes	180	180
Oportunidades	540	540
Defectos	120	35
DPMO	222,222.22	64,814.81
Yield de oportunidad	77.78%	93.52%
Nivel sigma	2.26	3.02
Expedientes sin defecto	102	151
Yield del proceso	56.67%	83.89%

La consistencia entre defectos, oportunidades y expedientes sin defecto permite auditar los cálculos Six Sigma. Los 120 y 35 defectos se evaluaron sobre 540 oportunidades en cada período, mientras el yield del proceso utilizó 180 expedientes como denominador. Esta separación evita confundir reducción de defectos individuales con cumplimiento integral del expediente.

D. Evaluación económica

La inversión estimada incluyó diseño del proceso, automatización del formulario, validaciones en ERP, capacitación, tablero y contingencia. Los beneficios anuales se calcularon a partir de la capacidad administrativa recuperada, la reducción de horas de reproceso, los menores costos de urgencia y la disminución de correcciones documentales. Con un horizonte de tres años y una tasa de descuento de 12%, la evaluación económica generó indicadores favorables.

TABLA XIII
INVERSIÓN INICIAL ESTIMADA

Concepto	Monto (S/)
Mapeo, análisis y rediseño del proceso	15,800.00
Formulario digital y automatización de flujo	21,600.00
Validaciones y plantillas en ERP	9,750.00
Capacitación y talleres DMAIC	7,200.00
Tablero de control	4,500.00
Contingencia	3,000.00
Total	61,850.00

La automatización del formulario y el flujo representó 34.9% de la inversión inicial, seguida del mapeo, análisis y rediseño con 25.5%. En conjunto, ambos componentes concentraron 60.5% del desembolso, lo que refleja que la solución combinó tecnología con rediseño del proceso, capacitación y mecanismos de control.

TABLA XIV
INDICADORES DE VIABILIDAD ECONÓMICA

Indicador	Resultado
Beneficio bruto anual	S/ 55,963.40
Costo recurrente anual	S/ 10,800.00
Flujo neto anual	S/ 45,163.40
VAN (3 años; 12%)	S/ 46,624.87
TIR	52.39%
Beneficio/costo	1.53
Periodo de recuperación	16.43 meses

Los cuatro criterios económicos condujeron a la misma decisión. El VAN fue positivo, la TIR superó ampliamente la tasa de descuento de 12%, la relación beneficio/costo fue mayor que uno y la recuperación se ubicó dentro del horizonte de tres años. La lectura conjunta reduce el riesgo de sustentar la viabilidad en un solo indicador financiero.

V. DISCUSIÓN

Los resultados evidencian que la aplicación de DMAIC mejoró de manera sustantiva el desempeño del proceso de compras de servicios industriales. La reducción de 49.95% del lead time confirma que una proporción relevante del ciclo inicial correspondía a esperas, transferencias y reprocesos, antes que a trabajo efectivo. Este hallazgo es coherente con la complementariedad teórica de Lean y Six Sigma: Lean hizo visible el flujo y eliminó actividades sin valor, mientras Six Sigma permitió definir defectos, cuantificar su frecuencia y controlar la variación [3]-[7]. El incremento de la PCE de 24.81% a 34.12% refuerza esta interpretación, pues la principal mejora provino de reducir la espera de 14.09 a 6.18 días.

La dirección de los cambios coincide con aplicaciones previas en servicios logísticos, almacenes, selección de proveedores, mantenimiento y distribución urbana [14], [19]-[22], [25]. En particular, Gutiérrez-Gutiérrez et al. [14] mostraron la utilidad de DMAIC, SIPOC y mapeo de procesos en servicios logísticos, mientras Adeodu et al. [20] emplearon el enfoque para elevar la eficiencia del ciclo en operaciones de almacén. Tay y Aw [22] documentaron que la visibilidad de la información, la estandarización y la claridad de responsabilidades son determinantes en la selección de proveedores. La coincidencia con el presente estudio respalda

el mecanismo de mejora, dado que el formulario por categoría, las alertas de RFQ y las rutas paralelas actuaron precisamente sobre esas condiciones.

Las reducciones de solicitudes devueltas, cotizaciones fuera de plazo y órdenes de compra con errores muestran que la intervención no se limitó a acelerar el flujo. El Pareto reveló que cuatro causas explicaban 83.0% de las ocurrencias: TDR incompleto, aprobaciones secuenciales, RFQ sin alertas y reingreso manual de información. El portafolio de mejoras mantuvo correspondencia causal con esos hallazgos mediante campos obligatorios, segmentación por riesgo, revisiones simultáneas, recordatorios y herencia de datos. Esta trazabilidad entre causa, acción e indicador fortalece la validez interna de la intervención y evita atribuir la mejora a una automatización genérica.

La disminución del DPMO de 222,222.22 a 64,814.81 y el incremento del nivel sigma de 2.26 a 3.02 indican una mejora de capacidad, no solo de velocidad. Asimismo, el yield de oportunidad pasó de 77.78% a 93.52%, mientras el yield del proceso aumentó de 56.67% a 83.89%. La diferencia es metodológicamente importante: el primer indicador evalúa cada oportunidad por separado, mientras el segundo exige que el expediente complete las tres CTQ sin defectos. Esta distinción responde a las recomendaciones de medir servicios mediante definiciones operacionales consistentes y evita sobreestimar la conformidad cuando una misma unidad presenta más de una falla [1], [2], [8], [12].

La validación estadística respalda la relevancia de los cambios observados. El lead time presentó una diferencia media de 9.36 días, con IC95% de 8.34 a 10.38, $p < 0.001$ y g de Hedges = 1.90, valor compatible con un efecto muy grande. Las cuatro comparaciones de proporciones también fueron significativas. Por tanto, el resultado no depende únicamente de porcentajes descriptivos. No obstante, el diseño preexperimental sin grupo de control impide descartar por completo factores concurrentes; la inferencia debe limitarse al proceso y a los períodos analizados, en concordancia con la prudencia metodológica recomendada por las revisiones de LSS [8]-[11].

El plan de control es central para convertir la mejora inicial en desempeño sostenido. La literatura identifica liderazgo, patrocinio, infraestructura de datos, formación y gestión del cambio como factores críticos [26]-[30]; asimismo, advierte que la ausencia de responsables y seguimiento favorece la regresión [27]. En el estudio, cada CTQ quedó vinculado con una meta, frecuencia, dueño y acción de reacción. Las 12 medias semanales permanecieron dentro de los límites de control, lo que demuestra estabilidad durante el horizonte observado. Sin embargo, esta evidencia debe complementarse con seguimiento posterior para confirmar que el comportamiento se mantiene ante cambios en demanda, mezcla de servicios o proveedores.

La evaluación económica complementa la significancia operativa. El VAN de S/ 46,624.87, la TIR de 52.39%, la relación beneficio/costo de 1.53 y el período de recuperación de 16.43 meses muestran que la inversión estimada es financieramente conveniente bajo los supuestos definidos. La TIR supera la tasa de descuento de 12% y el VAN positivo indica creación de valor esperada. Sin embargo, los beneficios de tres años constituyen una proyección sustentada en el desempeño postest; por ello, deben verificarse mediante el registro de horas recuperadas, urgencias evitadas y correcciones documentales durante la operación.

El estudio aporta evidencia en un proceso administrativo menos representado que manufactura, salud o logística física. Las aplicaciones en banca, administración pública y servicios confirman que LSS puede trasladarse a flujos intensivos en información cuando se adaptan sus CTQ y herramientas [13], [15]-[18], [28], [29]. En compras de servicios industriales, el valor del enfoque radica en integrar la perspectiva técnica, comercial y de control dentro de un mismo flujo. La replicación en otras organizaciones requerirá recalibrar categorías de servicio, niveles de aprobación, plazos de mercado y reglas de riesgo, pero puede conservar la lógica DMAIC y la arquitectura de indicadores.

Las limitaciones principales corresponden al diseño sin grupo de control, el análisis de una sola organización y el horizonte de control de 12 semanas. Además, la comparación pretest-postest puede verse afectada por variaciones en complejidad, monto, categoría de servicio o disponibilidad de proveedores. Futuras investigaciones deberían incorporar series temporales más extensas, estratificación por familia de servicio, modelos que controlen factores concurrentes y réplicas en otras empresas industriales. También conviene contrastar los beneficios económicos proyectados con ahorros efectivamente registrados y evaluar la experiencia del cliente interno y del proveedor como resultados complementarios.

VI. Conclusiones

La aplicación de Lean Six Sigma produjo una mejora estadísticamente significativa y operacionalmente relevante en el proceso de compras de servicios industriales. El lead time se redujo de 18.74 a 9.38 días y, simultáneamente, disminuyeron los defectos de entrada, cotización y emisión de órdenes.

El diagnóstico inicial evidenció un proceso alejado de las metas CTQ: lead time de 18.74 días, 22.78% de solicitudes devueltas, 31.67% de cotizaciones fuera de plazo y 12.22% de órdenes con errores. El DPMO fue 222,222.22, el nivel sigma 2.26 y el yield del proceso 56.67%, lo que estableció una línea base consistente para orientar la intervención.

El análisis priorizó cuatro causas que concentraron 83.0% de las ocurrencias: TDR sin estándar por categoría, aprobaciones completamente secuenciales, RFQ sin alertas ni proveedores suplentes y reingreso manual de información. La concentración obtenida permitió dirigir los recursos hacia causas con incidencia demostrada en las esperas y los defectos.

Se implementaron un formulario por categoría con campos obligatorios, una ruta abreviada para servicios estándar, aprobaciones paralelas, alertas de RFQ, poka-yoke en la orden de compra y un tablero de SLA. Estas medidas redujeron la

espera de 14.09 a 6.18 días y elevaron la PCE de 24.81% a 34.12%, manteniendo los controles técnicos, corporativos y regulatorios necesarios.

La comparación pretest-postest confirmó mejoras significativas en todos los indicadores contrastados. Para el lead time se obtuvo t de Welch = 18.05, $p < 0.001$ y g de Hedges = 1.90; el DPMO se redujo 70.83%, el nivel sigma alcanzó 3.02 y el yield del proceso aumentó a 83.89%. Estos resultados permiten aceptar la hipótesis de investigación dentro del proceso y los períodos evaluados.

Se estableció un plan de control con metas, frecuencias, responsables y acciones de reacción para cada CTQ. La estabilidad se verificó durante 12 semanas y la evaluación económica determinó un VAN de S/ 46,624.87, TIR de 52.39%, relación beneficio/costo de 1.53 y recuperación en 16.43 meses.

REFERENCIAS

[1] J. Antony, "Six Sigma in the UK service organisations: results from a pilot survey," Managerial Auditing Journal, vol. 19, no. 8, pp. 1006-1013, 2004. https://doi.org/10.1108/02686900410557908

[2] J. Antony, F. J. Antony, M. Kumar, and B. R. Cho, "Six sigma in service organisations: benefits, challenges and difficulties, common myths, empirical observations and success factors," International Journal of Quality & Reliability Management, vol. 24, no. 3, pp. 294-311, 2007. https://doi.org/10.1108/02656710710730889

[3] T. Bendell, "A review and comparison of Six Sigma and the lean organisations," The TQM Magazine, vol. 18, no. 3, pp. 255-262, 2006. https://doi.org/10.1108/09544780610659989

[4] M. P. J. Pepper and T. A. Spedding, "The evolution of lean Six Sigma," International Journal of Quality & Reliability Management, vol. 27, no. 2, pp. 138-155, 2010. https://doi.org/10.1108/02656711011014276

[5] R. D. Snee, "Lean Six Sigma - getting better all the time," International Journal of Lean Six Sigma, vol. 1, no. 1, pp. 9-29, 2010. https://doi.org/10.1108/20401461011033130

[6] S. Salah, A. Rahim, and J. A. Carretero, "The integration of Six Sigma and lean management," International Journal of Lean Six Sigma, vol. 1, no. 3, pp. 249-274, 2010. https://doi.org/10.1108/20401461011075035

[7] R. Shah, A. Chandrasekaran, and K. Linderman, "In pursuit of implementation patterns: the context of Lean and Six Sigma," International Journal of Production Research, vol. 46, no. 23, pp. 6679-6699, 2008. https://doi.org/10.1080/00207540802230504

[8] P. Nonthaleerak and L. C. Hendry, "Six Sigma: literature review and key future research areas," International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage, vol. 2, no. 2, pp. 105-161, 2006. https://doi.org/10.1504/IJSSCA.2006.010111

[9] J. Singh and H. Singh, "Continuous improvement philosophy - literature review and directions," Benchmarking: An International Journal, vol. 22, no. 1, pp. 75-119, 2015. https://doi.org/10.1108/BIJ-06-2012-0038

[10] V. R. Sreedharan and R. Raju, "A systematic literature review of Lean Six Sigma in different industries," International Journal of Lean Six Sigma, vol. 7, no. 4, pp. 430-466, 2016. https://doi.org/10.1108/IJLSS-12-2015-0050

[11] V. Sunder M., L. S. Ganesh, and R. R. Marathe, "A morphological analysis of research literature on Lean Six Sigma for services," International Journal of Operations & Production Management, vol. 38, no. 1, pp. 149-182, 2018. https://doi.org/10.1108/IJOPM-05-2016-0273

[12] A. Chakraborty and T. K. Chuan, "An empirical analysis on Six Sigma implementation in service organisations," International Journal of Lean Six Sigma, vol. 4, no. 2, pp. 141-170, 2013. https://doi.org/10.1108/20401461311319338

[13] F.-K. Wang and K.-S. Chen, "Applying Lean Six Sigma and TRIZ methodology in banking services," Total Quality Management & Business Excellence, vol. 21, no. 3, pp. 301-315, 2010. https://doi.org/10.1080/14783360903553248

[14] L. Gutiérrez-Gutiérrez, S. de Leeuw, and R. Dubbers, "Logistics services and Lean Six Sigma implementation: a case study," International Journal of Lean Six Sigma, vol. 7, no. 3, pp. 324-342, 2016. https://doi.org/10.1108/IJLSS-05-2015-0019

[15] A. W. Kam et al., "Using Lean Six Sigma techniques to improve efficiency in outpatient ophthalmology clinics," BMC Health Services Research, vol. 21, 2021. https://doi.org/10.1186/s12913-020-06034-3

[16] E. Psomas, E. Keramida, and N. Bouranta, "Practical implications of Lean, Six Sigma and Lean Six Sigma in the public administration sector: a systematic literature review," International Journal of Lean Six Sigma, vol. 13, no. 6, pp. 1277-1307, 2022. https://doi.org/10.1108/IJLSS-04-2021-0078

[17] J. Antony, B. Rodgers, and E. A. Cudney, "Lean Six Sigma for public sector organizations: is it a myth or reality?" International Journal of Quality & Reliability Management, vol. 34, no. 9, pp. 1402-1411, 2017. https://doi.org/10.1108/IJQRM-08-2016-0127

[18] L. B. M. Costa, M. Godinho Filho, L. D. Fredendall, and F. J. Gómez Paredes, "Lean, six sigma and lean six sigma in the food industry: a systematic literature review," Trends in Food Science & Technology, vol. 82, pp. 122-133, 2018. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.10.002

[19] J. Hill, A. J. Thomas, R. K. Mason-Jones, and S. El-Kateb, "The implementation of a Lean Six Sigma framework to enhance operational performance in an MRO facility," Production & Manufacturing Research, vol. 6, no. 1, pp. 26-48, 2018. https://doi.org/10.1080/21693277.2017.1417179

[20] A. Adeodu, R. Maladzhi, M. G. Kana-Kana Katumba, and I. Daniyan, "Development of an improvement framework for warehouse processes using lean six sigma (DMAIC) approach: a case of third party logistics (3PL) services," Heliyon, vol. 9, e14915, 2023. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14915

[21] G. Şişman, "Implementing Lean Six Sigma methodology to reduce the logistics cost: a case study in Turkey," International Journal of Lean Six Sigma, vol. 14, no. 3, pp. 610-629, 2023. https://doi.org/10.1108/IJLSS-02-2022-0054

[22] H. L. Tay and H. S. Aw, "Improving logistics supplier selection process using lean six sigma - an action research case study," Journal of Global Operations and Strategic Sourcing, vol. 14, no. 2, pp. 336-359, 2021. https://doi.org/10.1108/JGOSS-05-2020-0025

[23] S. M. Ali, M. A. Hossen, Z. Mahtab, G. Kabir, S. K. Paul, and Z. U. H. Adnan, "Barriers to lean six sigma implementation in the supply chain: an ISM model," Computers & Industrial Engineering, vol. 149, 106843, 2020. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106843

[24] I. J. Orji and C. M. U-Dominic, "Organizational change towards Lean Six Sigma implementation in the manufacturing supply chain: an integrated approach," Business Process Management Journal, vol. 28, no. 5/6, pp. 1301-1342, 2022. https://doi.org/10.1108/BPMJ-04-2022-0169

[25] J. Lemke, K. Kijewska, S. Iwan, and T. Dudek, "Six Sigma in urban logistics management - a case study," Sustainability, vol. 13, no. 8, 4302, 2021. https://doi.org/10.3390/su13084302

[26] A. Brun, "Critical success factors of Six Sigma implementations in Italian companies," International Journal of Production Economics, vol. 131, no. 1, pp. 158-164, 2011. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.05.008

[27] S. Albliwi, J. Antony, S. A. H. Lim, and T. van der Wiele, "Critical failure factors of Lean Six Sigma: a systematic literature review," International Journal of Quality & Reliability Management, vol. 31, no. 9, pp. 1012-1030, 2014. https://doi.org/10.1108/IJQRM-09-2013-0147

[28] A. Laureani and J. Antony, "Critical success factors for the effective implementation of Lean Sigma: results from an empirical study and agenda for future research," International Journal of Lean Six Sigma, vol. 3, no. 4, pp. 274-283, 2012. https://doi.org/10.1108/20401461211284743

[29] A. Laureani and J. Antony, "Leadership - a critical success factor for the effective implementation of Lean Six Sigma," Total Quality Management & Business Excellence, vol. 29, no. 5-6, pp. 502-523, 2018. https://doi.org/10.1080/14783363.2016.1211480

[30] B. B. Silva, R. C. Mergulhão, C. Favoretto, and G. H. S. Mendes, "Critical success factors of Six Sigma implementations in companies in Brazil," International Journal of Lean Six Sigma, vol. 10, no. 1, pp. 143-160, 2019. https://doi.org/10.1108/IJLSS-01-2018-0008